

MÜHENDİSLİK ALANINDAKİ GELİŞMELER

Editör

Doç. Dr. Alper BİDECI



MÜHENDİSLİK ALANINDAKİ GELİŞMELER

Editör

Doç. Dr. Alper BİDECI



Mühendislik Alanındaki Gelişmeler
Doç. Dr. Alper BİDECI

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design

Baskı: Mart 2022

Yayıncı Sertifika No: 49837

ISBN: 978-625-8109-13-9

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

Baskı ve Cilt:REPRO BİR

Repro Bir Mat Kağ. Rek. Tas. Tic. Ltd. Şti.

İvogsan 1518. Sokak 2/30 Mat-Sit iş Merkezi Ostim

Yenimahalle/Ankara

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1	5
Openstreetmap Verileri ve 3B CBS Teknolojisi Kullanılarak Sanal Kent Modelinin Geliştirilmesi Üzerine Bir Araştırma Ahmet USLU	
Bölüm 2	15
Sürdürülebilir Malzeme Olan Ahşabın Yapısı ve Özellikleri Özlem ÇALIŞKAN, Erdem MERİÇ	
Bölüm 3	27
Kompozit Malzeme Ve Alaşımların Sonoelektrokimyasal Birikimi Hikmet OKKAY	
Bölüm 4	43
Zeytinyağının Lezzet Bileşenleri Mehmet Murat CEYLAN	
Bölüm 5	61
Süt ve Süt Ürünlerinde Ultrasonikasyon Menekşe BULUT	
Bölüm 6	75
Kuvvet Sensörlerinde Kullanılan Elektriksel Ölçme Yöntemleri Bülent AYDEMİR	
Bölüm 7	111
Plastiklerin ISO 527 Standardına Göre Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi Bülent AYDEMİR	
Bölüm 8	129
Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbininde Çift Kafesli Azaltılmış ve Tam Derece Modelleri ile Arıza Analizlerinin İncelenmesi Mehmet Kenan DÖŞOĞLU, Mustafa DURSUN	

Bölüm 9	147
Kalite Fonksiyon Göçerimi Yöntemi ve Bir Uygulama Müfide Narlı, Hasret Çelik	
Bölüm 10	167
TS 647 Ve Avrupa Ahşap Yapı Standardı Eurocode 5'in Örneklerle Karşılaştırılması Özlem ÇALIŞKAN, Murat Yüncüler	
Bölüm 11	197
Soğutucu Akışkan Seçimlerinde Dikkat Edilmesi Gereken Parametreler ve Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Yeni Nesil Soğutucu Akışkanlar Hande UFAT	
Bölüm 12	213
Veri Zarflama Analizi Kamil ÇELİK, Cevriye GENCER	

Bölüm 1

Openstreetmap Verileri ve 3B CBS Teknolojisi Kullanılarak Sanal Kent Modelinin Geliştirilmesi Üzerine Bir Araştırma

Ahmet USLU¹

¹ Öğr. Gör. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü
e-mail: ahmet.uslu1@dpu.edu.tr
ORCID ID: 0000-0001-8745-423X

1. GİRİŞ

Sanal üç boyutlu (3B) kent modelleri, kentsel çevrede yer alan varlıkların anlamsal ve geometrik bilgilerini içeren çeşitli bileşenleri olarak tasvir edilmiştir (Aliaga, 2012). 3B kent modelleri, bölgesel planlama, ulaşım, çevre koruma, arazi düzenlemesi, risk ve afet yönetimi için uygulamalar geliştirmek amacıyla oldukça önemlidir (Aliaga, 2012). Geleneksel 2B haritalar ile karşılaştırıldığında 3B kent modelleri daha fazla bilgi ve etkileşimli yöntemler sağlayabilir (Miao vd., 2017). Aynı zamanda enerji, sıcaklık, güneş ışığı ve insan aktiviteleri gibi farklı kaynaklardan gelen bilgileri tek bir çerçevede görsel olarak entegrasyonuna izin verir (Mao vd., 2020). 3B mekânsal verilerin dijital dönüşümü ve bunların standartlaştırılmış veri modelleri, karar verme sürecini daha açıklayıcı daha kolay ve daha anlaşılır hale getirmiştir (Schrotter ve Hürzeler, 2020). Günümüzde, gezilebilir 3B modeller aracılığıyla Web’de kentsel verileri paylaşma ihtiyacı artmıştır (Schrotter ve Hürzeler, 2020). Bilgisayar grafiklerindeki gelişmeler ve artan ağ hızı sayesinde 3B sanal dünyada gerçek zamanlı olarak gezinmek mümkün hale gelmiştir (Mao vd., 2020). Özellikle 3B Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojileri, OpenStreetMap’ten elde edilen kentsel verilerin doğrudan web tarayıcısında eklentisiz 3B görüntülenmesine imkanını sağlayarak özel uygulamaların indirilmesi ve kurulması ihtiyacını ortadan kaldırmıştır (Gesquière ve Marin, 2012; Biljecki vd., 2015). Bu öğeler, kullanıcıların akıllı telefon, bilgisayar ve tablet gibi çoklu platformlarda internet bağlantısı ile devasa kentsel verilere erişimini mümkün kılmıştır (Nishanbaev, 2020). OpenStreetMap verileri kullanılarak 3B CBS teknolojisine dayalı kentsel verilerin görselleştirilmesini içeren akıllı şehir uygulamaları (Chaturvedi vd., 2019) kentsel alanların enerji verimliliği (Mon Salvete vd., 2015), kentsel bina enerji modellemesi (Chen vd., 2019), 3B Kadastro (Wang ve Yu, 2021) ve afet yönetimi (Kilsedar vd., 2019) araştırmaları büyük ilgi görmüştür. Bu çalışmada, kentsel ortamların ayrıntılı keşfi ve analizi için sanal, interaktif ve sürükleyici bir deneyim oluşturulması amaçlanmıştır. Konya ili, Selçuklu ilçesi Bosna Hersek Mahallesi’nde yer alan yapıların dijital 3B modellerinin oluşturulması ve daha sonra bu modellerin web tabanlı 3B CBS platformu olan Cesium üzerinde yayınlanmasını içeren bir yaklaşım geliştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Çalışma Alanı ve Çalışmada Kullanılan Materyaller

Konya ili, Selçuklu ilçesi, Bosna Hersek Mahallesi'nin kuzey bölümünde yer alan 190 adet yapı model olarak belirlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çalışma alanı

Çalışmada veri kaynağı olarak OpenStreetMap'ten elde edilen bima verileri kullanılmıştır. Binaların 3B modellerini oluşturmak için SketchUp yazılımı ve 3B modelleri sanal dünya üzerinde görselleştirme için açık kaynak kodlu Cesium platformu kullanılmıştır.

2.2 Yöntem

Çalışmanın yöntemi için ayrıntılı literatür araştırması sonucu elde edilen kaynaklardan yararlanılmıştır. Şekil 2'de 3B kent modeli oluşturmak ve 3B kent modelini web tabanlı sanal dünya üzerinde görselleştirmek için uygulanan iş akışı gösterilmiştir.

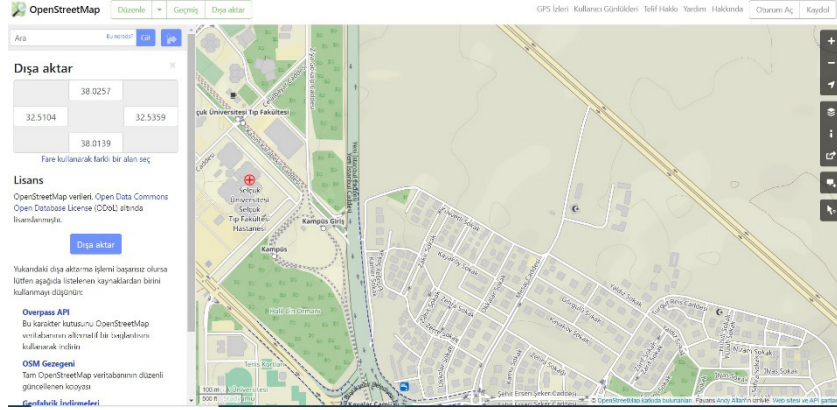


Şekil 2. Çalışmanın yöntemi

3. BULGULAR

3.1 OpenStreetMap Bina Verilerinin Elde Edilmesi

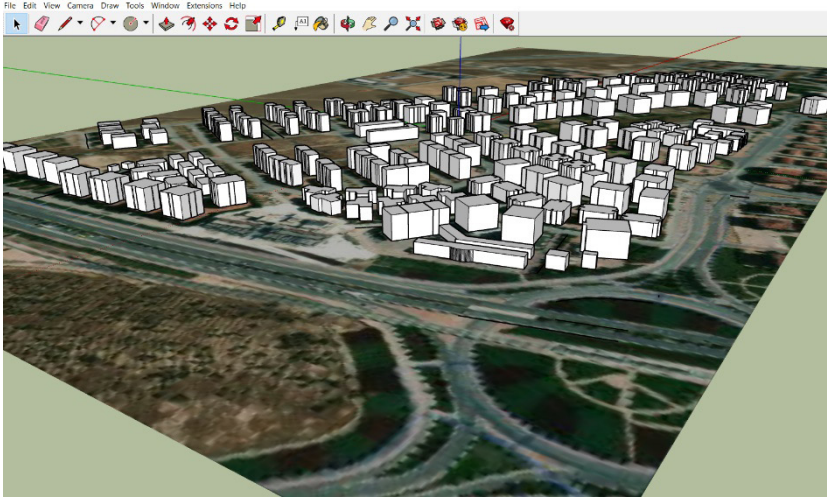
Çalışma alanında yer alan 190 adet binanın verileri OpenStreetMap platformundan WGS84/UTM Dilim 36 koordinat sisteminde ve “.osm” uzantılı dosya formatında ücretsiz olarak elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. OpenStreetMap bina verilerinin elde edilmesi (URL-1)

3.2 3B Kent Modeli Oluşturma

3B kent modeli oluşturma işlemi için SketchUp yazılımı kullanılmıştır. SketchUp, mimarlar, mühendisler, film yapımcıları, oyun geliştiricileri için tasarlanmış bir 3B modelleme yazılımıdır (URL-2). Öncelikle OpenStreetMap platformundan elde edilen bina verileri SketchUp yazılımına aktarılmıştır. Binaların sınırını ifade eden geometrik çizgisel izler ile Google Earth'den elde edilen uydu fotoğrafı üst üste çakıştırılmış ve yükseklik bilgileri girilerek 190 adet binanın 3B katı modeli oluşturulmuştur. (Şekil 4).

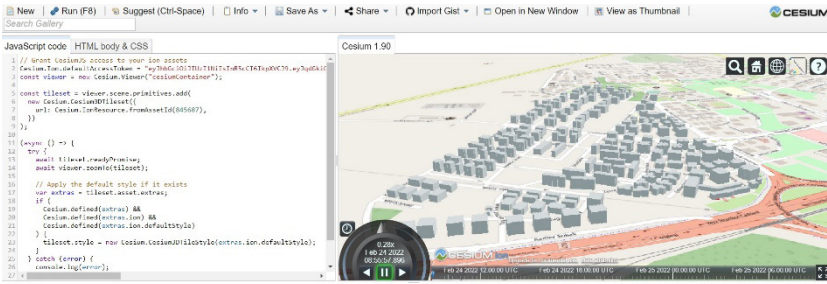


Şekil 4. SketchUP yazılımında 3B modelleme süreci

Daha sonra, oluşturulan dijital kent modeli 3B CBS teknolojisi aracılığıyla web tabanlı sanal dünya üzerinde görselleştirilmesi için “.dae” uzantılı model dosyası olarak kaydedilmiştir.

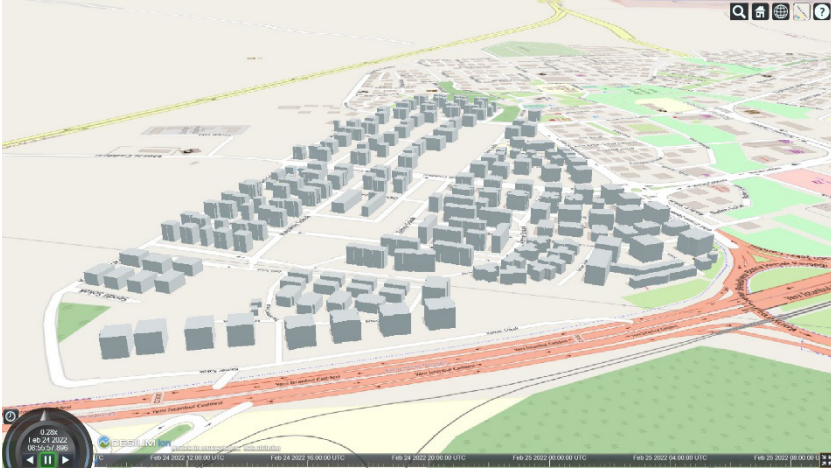
3.3 Web Tabanlı Sanal Dünya Üzerinde Görselleştirme

3B kent modelinin web tabanlı sanal dünya üzerinde etkileşimli olarak görselleştirilmesi için Cesium platformu seçilmiştir. Cesium, eklentiler olmadan bir web tarayıcısında 3B haritalar ve küreler oluşturmak için HTML 5 ve WebGL'i kullanan açık kaynaklı bir 3B CBS platformudur (URL-3). Cesium görselleştirme işlemlerinde birçok 3B model dosyalarının format türünü desteklemektedir (URL-3). 3B kent modelinin etkileşimli sunumu için Cesium kütüphanesi kullanılarak bir web arayüzü geliştirilmiştir (Şekil 5).

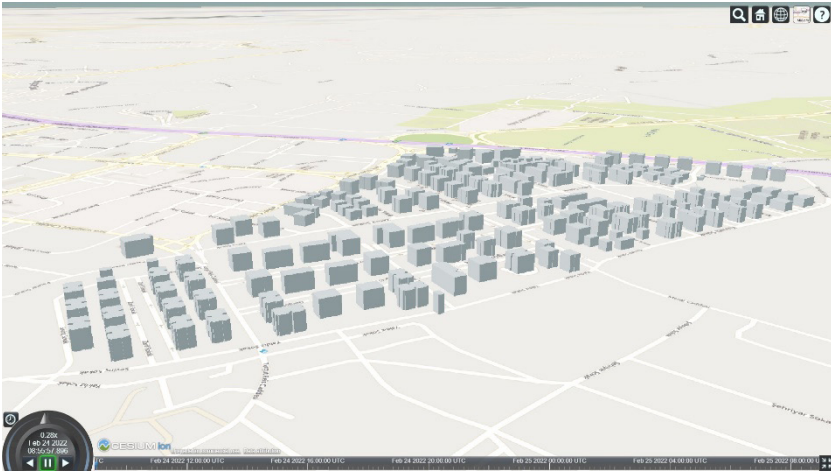


Şekil 5. Cesium kütüphanesi kullanılarak geliştirilen web arayüzü

Açık kaynaklı Cesium kütüphanesi kullanılarak oluşturulan kodun çalıştırılması ile 3B kent modeli web arayüzünde görselleştirilmiştir (Şekil 6,7).



Şekil 6. 3B kent modelinin web tabanlı sanal dünya üzerinde görselleştirilmesi (batı cephesinden görünüm)



Şekil 7. 3B kent modelinin web tabanlı sanal dünya üzerinde görselleştirilmesi (kuzeydoğu cephesinden görünüm)

Cesium yakınlaştırma, kaydırma, döndürme ve binalar üzerinde gezinme gibi çoklu etkileşim kurmayı mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte Cesium, 3B görselleştirmelerin herhangi bir web sayfasına eklemesine, 3B dijital modellerin sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik ortamlarında deneyimlemesine imkân sağlamaktadır.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada kentsel ortamların ayrıntılı analizi için sanal ve interaktif bir deneyim oluşturulması amacıyla OpenStreetMap verileri ve 3B CBS teknolojisi kullanılarak 3B kent modelinin görselleştirilmesine yönelik bir metodolojik yaklaşım ele alınmıştır. 3B kent modeli açık kaynak kodlu, genişletilebilir ve web ortamına kolayca entegre edilebilen bir sanal dünya sistemi olan Cesium üzerine inşa edilmiştir. Konya ili, Selçuklu ilçesi, Bosna Hersek Mahallesi'nde yer alan 190 adet binaya ait 3B modellerin etkileşimli olarak görselleştirilmesine ve erişimine imkân sağlanmıştır. Çalışmada açıklanan yaklaşım, eldeki verilerle düşük maliyetli 3B kent modeli üretimi için umut verici sonuçlar vermektedir. Oluşturulan 3B kentsel ortamlar web üzerinden paylaşılabilir ve çoklu analizler için çeşitli uygulamalar veya arayüzler tarafından okunabilir. 3B CBS sistemi, veri analizi için özel görselleştirme teknikleri veya algoritmalar eklenerek belirli uygulamalar için kolayca uyarlanabilir. 3B şehir modelleri, Akıllı Şehir uygulamaları için genel mekânsal veri altyapısı sağlayabilir. Çalışmanın sonucu olarak, kentsel verilerin kayıt altına alınması ve 3B olarak sunumu için kitle kaynaklı OpenStreetMap platformu ile açık kaynak kodlu Cesium platformunun başarılı bir araç olduğu görülmüştür. Gelecek çalışmalarda kentsel verilerin interaktif sunumu ve ayrıntılı keşfi için, dijital 3B modellerin artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, karma gerçeklik ve 3B baskı teknolojilerine entegrasyonun sağlandığı çok seçenekli erişilebilir uygulamalar gerçekleştirilecektir.

KAYNAKÇA

1. Aliaga, D. G. (2012). Integrating urban simulation and visualization. *In Digital urban modeling and simulation* (pp. 262-276). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842-2889.
3. Chaturvedi, K., Matheus, A., Nguyen, S. H., & Kolbe, T. H. (2019). Securing spatial data infrastructures for distributed smart city applications and services. *Future Generation Computer Systems*, 101, 723-736.
4. Chen, Y., Hong, T., Luo, X., & Hooper, B. (2019). Development of city buildings dataset for urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 183, 252-265.
5. Gesquière, G., & Manin, A. (2012). 3D visualization of urban data based on CityGML with WebGL. *International Journal of 3-D Information Modeling (IJ3DIM)*, 1(3), 1-15.
6. Kilsedar, C. E., Fissore, F., Pirotti, F., & Brovelli, M. A. (2019). Extraction and visualization of 3D building models in urban areas for flood simulation. In *GEORES 2019* (Vol. 42, pp. 669-673).
7. Mao, B., Ban, Y., & Laumert, B. (2020). Dynamic online 3D visualization framework for real-time energy simulation based on 3D tiles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 166.
8. Monsalvete, P., Robinson, D., & Eicker, U. (2015). Dynamic simulation methodologies for urban energy demand. *Energy Procedia*, 78, 3360-3365.
9. Nishanbaev, I. (2020). A web repository for geo-located 3D digital cultural heritage models. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16, e00139.
10. Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The digital twin of the City of Zurich for urban planning. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 99-112.
11. Wang, C., & Yu, C. B. (2021). Design, development and applicability evaluation of a digital cartographic model for 3d cadastre mapping in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 158.
12. URL-1: <https://www.openstreetmap.org/>, (10.02.2022).
13. URL-2: <https://www.sketchup.com/>, (12.02.2022).
14. URL-3: <https://cesium.com/>, (15.02.2022).

Bölüm 2

Sürdürülebilir Malzeme Olan Ahşabın Yapısı ve Özellikleri

Özlem ÇALIŞKAN¹
Erdem MERİÇ²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik, ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr ORCID: 0000-0002-5272-9552

2 İnşaat Yüksek Mühendisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Bilecik, erdem.meric@bilecik.edu.tr ORCID: 0000-0001-9055-5568

1. Giriş

Ahşap malzemenin barınma ihtiyacında kullanılması, günümüz yapı malzemelerine nazaran çok eski tarihlere dayanmaktadır. Ahşap malzemenin insanlığın varoluşundan başlayıp günümüze kadar yaygın olarak kullanılması; ahşabın sürdürülebilir ve yenilenebilir bir malzeme olmasının yanı sıra doğadan elde edilmesinin kolay oluşu ve kolaylıkla yapıya uygulanabilmesidir [1].

Son Yıllarda dünyada teknolojik ilerlemelere bağlı olarak yapı sektöründe yeni ürünlerin kullanılması yaygınlaşmıştır. Yığma yapıların çoğalması ve bunu takip eden yıllarda özellikle çelik, betonarme gibi yapım sistemlerinin ortaya çıkması sonucunda ahşap malzemenin önemi giderek azalmıştır [2].

20. Yüzyılın başlarında ahşap yapılarda artış görülmüştür. Sanayileşmenin gittikçe hız kazanması dünya üzerinde çeliğe ihtiyacı doğurmuştur. Bu yıllarda ahşap malzemeler ile ilgili çalışmalar yapılarak fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Kama, çivi gibi birleşim elemanları hakkında çalışmalar yapılarak malzemeyi korumaya yönelik yöntemler geliştirilmiştir. 20. Yüzyıl ortalarında ahşap malzemenin korunması ve daha dayanıklı bir yapı elemanı olarak kullanılması için bazı tutkal ve reçinelerin bulunması ahşabın mukavemetini oldukça artırmış buda ahşap yapı elemanının diğer yapı elemanları ile benzer mukavemet vermiştir. Bu yeniliklerin bulunması ahşap malzemeyi tekrar rekabet edebilir bir malzeme haline getirmiştir. Günümüz şartlarında statik hesaplamaların ihtiyaç duyacağı tüm kesit ve çapta ahşap yapı elemanlarının üretilmesine ve projelendirilmesine olanak sağlamıştır [3].

Ahşap malzeme doğayla barışık, nefes alabilen ve geri dönüşümü kolay olan, diğer yapı elemanlarıyla karşılaştırılıp yoğunluğu göz önüne alındığında mukavemeti oldukça yüksek bir malzemedir. Çelik, betonarme gibi diğer yapı elemanlarıyla uyumludur. Doğru yerde doğru özelliklerde kullanıldığında uzun ömürlü olabilen sürdürülebilir bir yapı elemanıdır [4]. Ülkemizde yapı malzemesi olarak kısmen yerini almıştır. Yıllarca koruyucu malzeme kullanılmadan ve statik projelendirmesi yapılmadan kullanılan kesitlerdeki ahşap yapı elemanlarının çoğu günümüze kadar ayakta kalabilmiştir. Ahşap malzemelerin dayanıklı olabilmesi için, yeterli kesit özelliklerinde taşıyıcı ve dikmeler kullanmak, nem koşullarına karşı mutlaka kimyasal koruma sağlamak ahşabın uzun ömürlü olabilmesi için önemlidir [5].

2. Ahşap malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Ahşap yapılarda kullanılacak yapı elemanlarının yapısı ve özelliklerini anlayabilmek için en temel gereksinim malzemenin fiziksel özelliklerinin bilinmesinin yanı sıra ahşabın cinsi, yapısı ve kimyası gibi özelliklerinin de bilinme-

si gerekmektedir. Ahşabın fiziksel ve mekanik özellikleri mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Örneğin liflerin yoğunluğunun fazla olması ve doğru neme sahip ahşap çok daha yüksek dayanıma sahip olabilmektedir. Zamanla çevresel etmenler veya oluşan çürümeler gibi istenmeyen durumları anlamak ve önleyebilmek için fiziksel özelliklere ek olarak kimyasal özelliklere de bağlı olarak bir koruma yöntemi uygulanmalıdır [6].

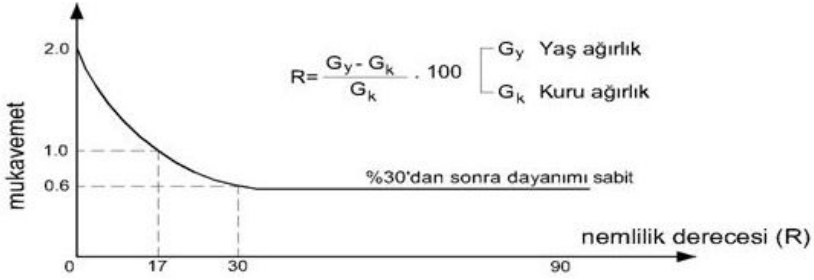
2.1. Fiziksel Özellikleri

Ahşap genel olarak yatay ve düşey yüklere karşı oldukça dayanıklı bir malzemedir. Hafif olması büyük bir avantaj sağlamaktadır. İyi bir şekilde korunmuş ahşap, elverişsiz hava koşulları ve kimyasal faktörlere kadar birçok etki ile karşılaşsa bile dayanımında azalma diğer yapı elemanlarına nazaran yavaş olmaktadır. Bu durum ahşabı yapı elemanı olarak kullanmada önemli bir yere getirmektedir. Ahşabın yapısını ve ömrünü etkileyen en önemli faktör fiziksel özellikleridir. Bu yüzden ahşaptaki lif yönleri ve sıklığı, nem oranı ile özgül ağırlığı oldukça önemlidir [6].

2.1.1. Ahşap Malzemedeki Nem Oranı

Ahşabın yapısı ve özellikleri zamanla değişkenlik gösterebilmektedir. Ahşap malzemedeki renk farklılıkları malzemenin yaşlı olduğunun kanıtıdır. Renk farklılıklarının oluşması ve nem oranındaki azalma buna bağlı olarak çevresel etmenlere maruz kalmış bir ahşabın mukavemetini önemli ölçüde azaltmaktadır [7]. Bu nedenle ahşaptaki nem oranının bilinmesi gerekmektedir. Nemlilik derecesi yüksek bir malzemede mukavemet azalacaktır [8]. Fakat nem oranı sınır değer olan %30'u geçmesi durumunda mukavemette değişiklik olmayacaktır. Bu değer dayanım açısından sınır değer olarak kabul edilmektedir (Şekil 1).

Ahşabın çok fazla rutubete ve suya maruz kaldığı zamanlarda malzemenin mekanik özellikleri değişecek ve hacimsel farklılıklar meydana gelecektir. Bu durum yapı için istenmeyen durumdur ve yapı ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Kuru hal olarak bilinen %0 rutubet oranı ve tam doyumluk olarak kabul edilen %30 rutubet oranları arasında hacimsel ve dayanımsal olarak ciddi farklar vardır. Ahşabın genişlemesi ve büzülmesi olarak tanımlanan bu farklılıkların genel adı "odunun çalması" olarak adlandırılmaktadır [9]. Ahşap malzemeyi yapıda kullanırken mutlaka nemlilik derecesini bilmemiz gerekmektedir.



Şekil 1. Mukavemet ile nemlilik ilişkisi [3]

Nem oranının hesabı için verilen formülde R; nemlilik derecesini, G_k ; malzemenin kuru ağırlığını, G_y ; malzemenin yaş ağırlığını belirtmektedir.

2.1.2. Ahşap Malzemenin Özgül Ağırlığı

Ahşaptaki özgül ağırlık farklı sebeplerle farklılık gösterebilmektedir. Liflerin yoğun olduğu bölgeden alınan bir malzeme ile daha budaklı ya da çatlakların çok olduğu bölgeden alınan malzeme doğal olarak farklı özgül ağırlıklara sahip olacaktır. Ağacın cinsi ve yaşı da özgül ağırlıklarını doğrudan etkilemektedir. Örneğin yeni kesilmiş bir malzemede su miktarı, yüzde olarak eski kurutulmuş bir ahşap malzemeden farklı olacaktır [10]. Tablo 1'de çeşitli ahşap malzemelere ilişkin özgül ağırlıklar gösterilmiştir.

2.1.3. Ahşabın Isı Davranışı

Ana yapısı selüloz malzemesini oluşturan ahşap ısıyı geçirmez. Fakat Ahşap malzeme ısı iletkenliği yapısına göre farklılık göstermektedir. Homojen bir yapısının olmaması farklı ısı davranışlarına neden olabilmektedir [12]. Farklı ısı ortamlarında genişmeye maruz kalan ahşap büzülüp genişebilir buda homojen bir yapıya sahip olmamasından kaynaklı yapısında değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişkenliklere rağmen çoğu zaman ahşap yapı elemanı olarak kullanıldığında ısıl genişmesini dikkate alınmamaktadır [13].

2.1.4 Ahşabın Sertliği

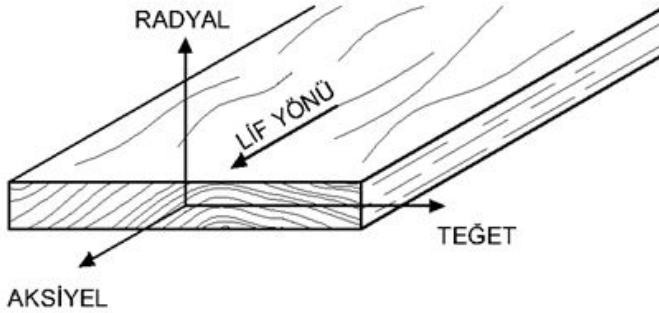
Ahşap malzemenin kesilmeye ve işlenmeye karşı gösterdiği dirence sertlik denir. Bu direnci göstermesinde belli başlı parametreler vardır. Nemlilik oranı, malzemenin cinsi ve lif yoğunluğu gibi nedenlerle sertlik ilişkilidir. Kuru bir ahşapta sertlik artarken nemli bir ağaçta sertlik azalacaktır [11].

Tablo 1. Ağaçların ağırlıklarına göre sınıflandırılması [11]

Sınıfı	Özgül Ağırlığı (gr/ cm ³)	Ağaç Türleri
Çok Hafif Ahşap	≤ 0.43	İhlamur, köknar, ladin
Hafif Ahşap	0.44 - 0.72	At Kestanesi, Kırmızı Çam
Ağır Ahşap	0.73 - 0.99	Huş, Kestane, Kızılağaç
Çok Ağır Ahşap	≥ 1	Akgürgen, Zeytin, Meşe

2.2. Ahşabın Mekanik Özellikleri

Yapısı itibariyle ahşap anizotropik bir malzemedir yani davranışları ve özellikleri yöne bağlı değişkenlik gösterir. Şekil 2’de görüleceği gibi uzunlamasına (longitudinal), radyal (radial) ve teğetsel (tangential) yönlerde davranışları bakımından farklılıklar vardır [14]. Değişik yönlerde farklı ve bağımsız özellikleri bulunan malzemelere ortotropik malzeme adı verilir. Her ne kadar farklı yönlerde farklı özelliklere sahip olsalar da radyal ve teğetsel yönlerdeki davranışları birbirine yakın değerlerdir. Bundan dolayı bu iki eksen uygulamalarda dikkate alınmaktadır. Ahşabın mekanik özelliklerini incelerken basınç ve çekmeye karşı direnci, elastisitesi, yarıлма-makaslama dirençleri de dikkate alınmalıdır [15]. Liflere paralel yönde aksiyel basınç kuvveti etkisinde kalan ahşapta kısmen plastisite görülebilir. Aynı şekilde liflere dik yönde de plastisite benzer şekilde görülecek ve benzer sonuçlar ortaya çıkacaktır [16].



Şekil 2. Ahşabın farklı yönlerde gösterdiği davranışlar [14]

2.2.1 Basınç Direnci

Ahşap malzeme sınıflarına göre basınç değerleri farklıdır. Birinci sınıf ahşap malzeme ile ikinci sınıf ahşap malzeme basınca karşı aynı değeri vermeyecektir. Bu durumun sebebi ahşaptaki liflere paralel ve dik yöndeki direncin kalitesine göre değişmesidir [17]. “TS 647 -Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları” yö-

netmeliğine göre değerler hem liflere dik hem de liflere paralel yönde olacak şekilde verilmiştir (Tablo 2). Buradaki değerlerden de anlaşılacağı gibi ahşap malzemenin liflere paralel yöndeki direnci liflere dik yöndeki direncinden oldukça fazladır [18].

Tablo 2. TS 647’de Ağaç türlerine göre liflere dik ve paralel basınç değerleri [18].

	Ahşap malzemenin cinsi ve sınıfına göre basınç gerilmesi değerleri (MPa)			
Çalışma Şekli	İğne Yapraklı Ağaç Sınıflar			Meşe-Kayın
	I	II	III	IV
$\sigma_{bem//}$	11.0	8.5	6.0	10.0
$\sigma_{bem\perp}$	2.0	2.0	2.0	3.0
$\sigma_{bem\perp} (*)$	2.5	2.5	2.5	4.0

(*) Ezilmelere izin verileceği takdirde kullanılmalıdır.

2.2.2. Ahşap Malzemenin Makaslama Direnci

İki ahşap kesit yüzeylerini birbirinden ayırmak için uygulanan kuvvete ahşap malzemenin verdiği dirence makaslama direnci adı verilmektedir. Makaslama direnci uygulanan kuvvetin açısı ve malzeme kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin dik gelen bir kuvvete nazaran yatay kuvvete karşı makaslama direnci en yüksek seviyede olacaktır [18].

2.2.3. Ahşabın Elastisitesi

Elastisite şekil değiştirebilen bir cisme uygulanan kuvvet bittikten sonra eski haline dönmesi olarak tanımlanır. Ahşap yapı itibariyle lifli bir malzemedir. Dolayısıyla belli düzeyde elastik davranış gösterebilmektedir. Belli bir sınır değerine kadar yükleri karşılayabiliyorken, yüklenme devam ettiğinde deformasyon oluşarak malzemeyi kırabilmektedir. Bu durum kırılma sınırı olarak adlandırılmaktadır. Ahşabın nem durumu, cinsi gibi etmenler elastisitesini etkilemektedir. Özellikle sıcaklık ve aşırı nem ahşabın elastisitesinde negatif etki edebilmektedir. TS 647’de malzeme cinslerine göre sınıflandırma yapılmıştır. Tablo 3’te kayma ve elastisite değerleri verilmiştir [18].

Tablo 3. TS 647'e göre Elastisite ve Kayma Modülleri [18]

TS 647'e göre Elastisite ve Kayma Modülleri			
Ahşap Malzeme Türü	Elastisite Modülü (kg/m ²)		Kayma Modülü (kg/cm ²)
	Liflere paralel E//	Liflere dik E⊥	
İğne Yapraklı	100000	3000	5000
Meşe, Kayın	125000	6000	10000

3. Ahşap Malzemenin Korunması

Ahşabın yapılarda uygulanmasından sonra korunması oldukça dikkat gerektiren bir işittir. Yapının uzun ömürlü olabilmesi için korunması çok önemlidir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte çeşitli koruma yöntemleri ortaya çıkmış ve buda yapıların ömrünü ve kalitesini ciddi derecede artırmıştır. Reçinelerin ahşaba uygulanması, doğru yerde uygun malzeme kullanımı, fümigasyon gibi yöntemler malzemeye uygulanabilmektedir [19].

3.1. Bünyesel Koruma

Kullanım yerine uygun ahşap cinsinin seçilmesi, ahşabın çalışma yönleri dikkate alınarak yapı detaylarının geliştirilmesi ve doğru kurutulmuş ahşabın kullanılması alınabilecek başlıca basit önlemlerdir [19].

3.2. Kimyasal Koruma

En önemli koruma yöntemlerinden biride kimyasal koruma yöntemleridir. Özellikle reçineler ve farklı kimyasal maddelerin ahşaba emdirilerek uygulanmasıdır. Ahşaba kimyasal maddelerin emdirilmesi işlemine emprenye adı verilmektedir. Farklı çeşitli emprenye uygulamaları vardır. Bu yöntemler basınç uygulanmayan yöntemler, basınç uygulanan yöntemler, besi suyu çıkartma yöntemleri ve difüzyon yöntemleridir. Şekil 3'te ahşap malzemeye emprenye uygulaması görülmektedir [23].



Şekil 3. Ahşaba emprenye uygulaması [23]

3.3. Fümigasyon

Ahşap yapı elemanlarının zararlılara karşı (böcek vb.) korunması yöntemidir. Gaz halindeki öldürücü etkiye sahip kimyasal maddelere fümigant adı verilmektedir. Bu sebeple çok küçük veya kılcal çatlak ve girintilere ulaşabilen bir uygulamadır. En önemli özellikleri difüzyon yöntemi sayesinde uygulandıkları alanda çok rahat yayılabilirler. Fümigantların kabiliyetine etki eden en önemli özellik ortamın sıcaklığıdır. Sıcak ortamda çok daha kolay dağılırlar [19].

4. Ahşap Yapıların Yararları ve Sakıncaları

Bir yapı hangi amaçla kullanılacağı planlanmalı ve bu duruma göre projelendirilmelidir. Seçilen yapı malzemesinin cinsi, ülkede piyasasındaki yeri, inşaat süresi ve maliyeti gibi durumları dikkate alınarak seçilmelidir. Ahşap malzemede yapı elemanı olarak kullanıldığında belli başlı avantajları ve dezavantajları ortaya çıkacaktır.

4.1. Ahşabın yararları

Ahşabın en önemli özelliği hafif olmasıdır. Temele dikmeler aracılığı ile iletilen yük oldukça azdır. Dolayısıyla betonarme ve çelik yapılar için sorun teşkil eden zemin taşıma kuvveti ahşap yapılar için uygun ortam oluşturabilir. Örneğin ahşap 600 kg/m^3 birim ağırlığı betonarmeden yaklaşık 4 kat daha hafif olmasına karşın mukavemeti betonarmeye oldukça yakındır. Hafif bir malzeme olmasının yanı sıra yapı inşasında montajı da oldukça kolaydır. Ayrıca nakliyesi diğer yapı elemanlarına nazaran zahmeti az olan bir malzemedir İşçiliği için çok çeşitli makinelere ihtiyaç duyulmaz. Çelik ve özellikle beton yapıların geri dönüşümü çok az iken ahşap malzemelerin hem montajı hem de demontajı kolay olduğundan

geri kazanımı olabilmekte ve az kayıpla yenilenebilmektedir. Nemlenmiş, çürümüş, yıpranmış taşıyıcı sistemler bile çok zorlanılmadan onarılabilmektedir. Ahşap malzemeler kimyasal maddelere karşı da oldukça dayanıklı bir yapı elemanıdır [20].

4.2. Ahşap malzemesinin sakıncaları

Ahşabın su ile teması sonucunda lokal yerlerde şişmeler oluşabilir ve kuruunca da büzülür. Ayrıca çatlak oluşması, çok fazla güneş ile teması, nemli olması gibi durumlar ahşap malzemeyi olumsuz şekilde etkilemektedir. Ahşap homojen bir yapıda değildir dolayısıyla hem dayanımı hem de davranışı farklı olabilmektedir. Anizotrop malzeme olan ahşap, yapı elemanı olarak tasarlanırken bu duruma dikkat edilmelidir. Ahşap yangın esnasında kolayca tutuşan bir malzemedir. Çeşitli kimyasal yöntemlerle önlem alınması gerekmektedir. Kesit ölçüleri yangın esnasında ahşap malzemenin yıkılmasında önemli derecede bir yere sahiptir. Kesit ölçüleri küçük olan bir taşıyıcı sistem yangın esnasında kolayca yıkılabilir [20].

5. Sonuçlar

Ahşap mukavemeti yüksek, doğa ile uyumlu, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir malzemedir. Eğilmeye karşı direnci diğer yapı elemanlarından yüksektir. Yüke maruz kalan ahşap bir kirişin kırılma süresi liflere sahip olmasından dolayı uzundur [21]. Ahşap malzeme yapı elemanı olarak kullanımında ahşabın fiziksel ve mekanik özellikleri mukavemeti açısından önemlidir. Ayrıca ahşabın cinsi, bir ağaç kesitinde bulunan liflerin doğrultusu ve açısı, ahşapta bulunan nem oranı gibi faktörler dayanımını etkileyebilmektedir [22]. Ahşap; taşıma gücü ağırlığına nazaran yüksek, birleşim detayları karmaşık olmayan, ağırlığı az ve mimari etkisi doğa ve çevre ile uyumlu bir malzemedir. Doğru şekilde tasarlanıp korunan ahşap bir yapı uzun yıllar ayakta kalabilecektir.

KAYNAKÇA

1. Batur, A. (2004). Gelişmiş ahşap yapım sistemleri ve Türkiye koşulları yönünden değerlendirilmesi. *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.*
2. Bilici, S. (2006). *Ahşap konut üretim sistemleri; Almanya örneği*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
3. Duman, N., & Ökten, S. (1988). *Ahşap yapı dersleri*. Yapı-Endüstri Merkezi.
4. Bozkurt, Ö. (2011). Geleneksel Tekirdağ evlerinde kullanılmış meşe ahşabının mekanik özellikleri ve kimyasalla koruma uygulamalarının mekanik özellikler üzerine etkisi. *Politeknik Dergisi, 14(2)*, 115-119.
5. Çalışkan, Ö., Meriç, E., & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(1)*, 109-118.
6. Nilsson, T., & Rowell, R. (2012). Historical wood–structure and properties. *Journal of Cultural Heritage, 13(3)*, S5-S9.
7. Sonderegger, W., Kránitz, K., Bues, C. T., & Niemz, P. (2015). Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. *Journal of Cultural Heritage, 16(6)*, 883-889.
8. Hiraoğlu, E. (2007). Ahşap ve Çelik Makas Sistemlerin Malzeme ve Sistem Özelliklerinin İncelenmesi, Bir Örnek Yapı Üzerinde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Pelit, H., Korkmaz, M., & Budakçı, M., (2017). Farklı Ahşap Malzemelelerin Bazı Fiziksel Özelliklerine Su İtici Maddelerin Etkileri. İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi,6(3), 1027-1036.
10. Dışkaya, H. (2011). 19.Yüzyıl İstanbul Geleneksel Ahşap Karkas Yapılarında Deprem Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Erkoç, E. (2004). Günümüz Teknolojileriyle Üretilen Ahşap Konutların Tasarım-Uygulama-Kullanım Üçgeninde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
12. Şenkal, F. (1996). Konutlarda Dünden Bugüne Ahşap Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
13. Gürel, F. (2018). Çok Katlı Ahşap Yapıların Deprem Yüğü Altında Performanslarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi,

Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

14. Holmberg, S., Persson, K., & Petersson, H. (1999). Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials. *Computers & structures*, 72(4-5), 459-480.
15. Kaplan, B. (2013). Geleneksel Osmanlı Mimarisine Sahip Ahşap Yapıların Deprem Kuvveti Altında İncelenmesi ve Güçlendirme Teknikleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
16. Çetin, F., & Gündüz, G. (2017). Türkiye'deki bazı ağaç türü odunlarının mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmaların değerlendirilmesi. *Barın Orman Fakültesi Dergisi*, 19(1), 161-181.
17. Uzun, S. (2018). *Tarihi Ahşap Yapı Taşıyıcı Sistemlerin İncelenmesi ve Boğaziçi Örneği: Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
18. *Türk Standartları Enstitüsü. (1979). TS 647 Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları.*
19. Lattke, F., & Lehmann, S. (2007). Multi-Storey Residential Timber Construction: Current Developments in Europe. *Journal of Green Building*, 2(1), 119-129.
20. Meriç, E. (2019). *Ahşap bir yapının TS 647 ve Eurocode 5'e göre analizi ve karşılaştırılması*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
21. Smith, I., & Snow, M.A. (2008). Timber: An Ancient Construction Material With A Bright Future. *The Forestry Chronicle*, 84 (4), 504-510.
22. Kretschmann, D., (2010). *Wood Handbook: Wood As An Engineering Material*. Madison, WI, USA, 44
23. Geleneksel ahşap yapı uygulamaları kudeb ahşap eğitim atölyesi (2008), İstanbul

Bölüm 3

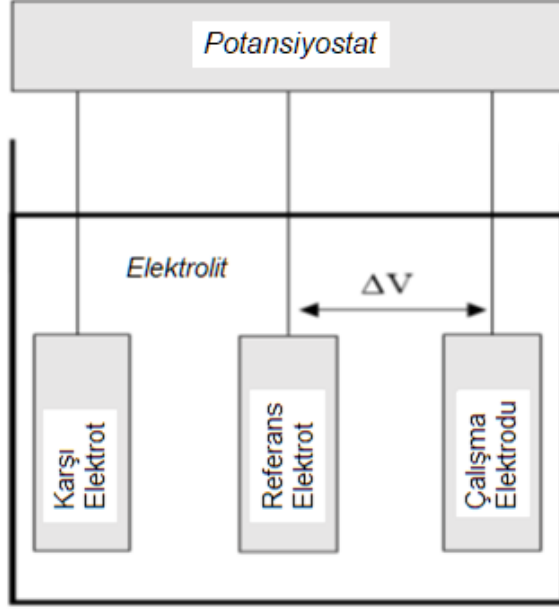
Kompozit Malzeme Ve Alaşımların Sonelektrokimyasal Birikimi

Hikmet OKKAY ¹¹

¹ Doç. Dr., Yalova Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, e-mail: hokkay@yalova.edu.tr ORCID ID:
0000-0002-4711-8351

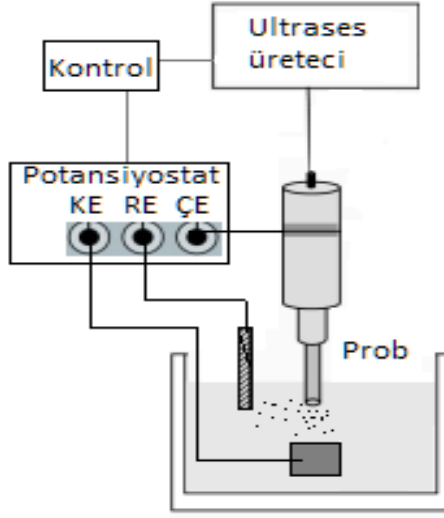
1. Giriş

Elektrobirikim (Elektrodepozisyon), çözeltildeki metal katyonların indirgen-diği ve elektrik akımı kullanılarak bir katot üzerinde biriktirildiği bir işlemdir. Elektrobirikim için, bir potansiyostat ile birleştirilmiş üç elektrot sistemi kullanılır. Elektrot, katot ile anot arasında elektron transferini sağlayan bir elektrik iletkenidir. Bu üç elektrot, iyon transferi sağlayan bir elektrolit içine daldırılır [1].



Şekil 1. Üç elektrot sisteminin şematik gösterimi

Sonoelektrokimyasal birikim (Sonoelektrobirikim), elektrokimya ve ultrases enerjisinin birlikte kullanılmasıyla gerçekleşen bir sonoelektrokimya yöntemidir. Ultrasonik probun elektrolize doğrudan katılımı, sonoelektrokimyasal süreç olarak bilinir. Ultrases probu, üç elektrotlu hücre konfigürasyonunda titreşen bir çalışma elektrotu olarak kullanılır [2]. Hücre, Şekil 2 de görüldüğü gibi, titreşen çalışma elektrotuna yakın yerleştirilmiş bir referans elektrot ve bir karşı elektrottan oluşur. Metalik nano parçacıkların üretiminde, probun sadece düz dairesel alanı elektrolitik banyoya maruz bırakılır. Bu alan katot ve ultrasonik kaynak görevi görür. Metal iyonlarının indirgenmesi, ultrases dalgalarıyla oluşturulan kavitasyonel çökmeyle beraber katotta meydana gelir; metal nanopartiküller uzaklaştırılır, yüzey temizlenir ve ardından çift tabaka metal iyonları ile doldurulur [3]. Böylece işlem süresi, akustik güç ve elektroliz akımı gibi işlem parametreleri kontrol edilerek, parçacık boyut dağılımı ve morfoloji gibi fiziksel özellikler değiştirilebilir.



Şekil 2. Sonoelektrokimyasal birikim yönteminin şematik gösterimi (ÇE: Çalışma Elektrotu, RE: Referans Elektrotu, KE: Karşı Elektrot)

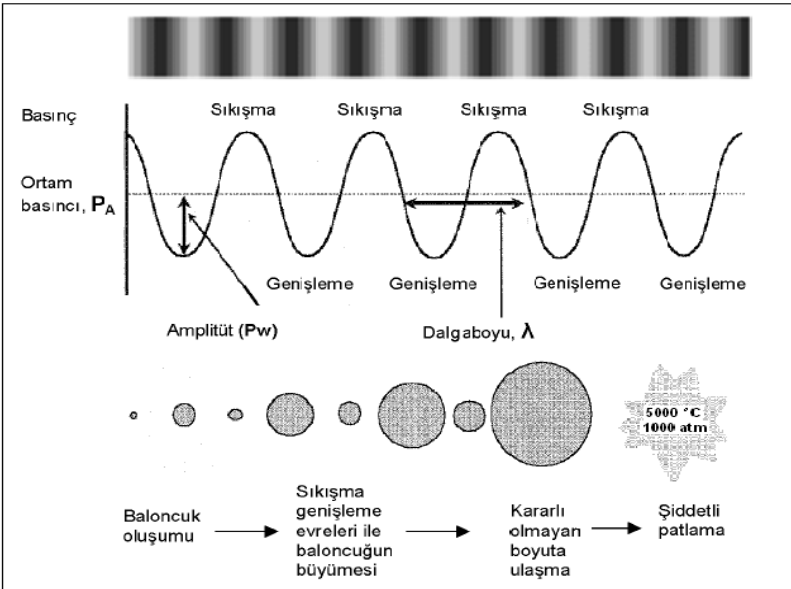
2. Ultrases Enerjisi, Elektrobirikim ve Sonokimya

Elektrobirikim, yüzey yapısı modifikasyonu için uygulanan elektrokimyasal bir işlemdir. Elektro-birikimli kaplamalar, metalik veya polimerik matriste çok katmanlı ve seramik parçacıklara sahip nano yapıları malzemeleri içerir. Matris genellikle metal, alaşım, seramik veya polimerden oluşurken partiküller, milimetre altı ila nanometre arasında bir boyutta, küresel, katmanlı veya plaka benzeri bir şekle sahip olabilirler [4]. Bu kompozit kaplamaların anti-korozif, aşınmaya dayanıklı, hidrofobik ve iyi tribolojik performansları, onları birçok endüstriyel sektörün üretim sürecinde uygulanabilir kılmaktadır. Farklı morfolojik yapıları, bileşime ve boyut dağılımına sahip nanometre ölçekli kompozitlerin geliştirilmesinde, ultrases enerjisinden kaynaklı akustik kaviteasyon yöntemi de kullanılabilir [5].

Kaplamaların sertlik, aşınma ve korozyona karşı direnç gibi fiziksel özellikleri, partiküller çözelti içinde dağıtıldığında önemli ölçüde iyileştirebilir [6]. Son yıllarda bu konu ile alakalı umut verici birçok yeni kaplama çalışması gerçekleştirilmiş olup, çalışmalardan bazıları kaplamadaki partikül konsantrasyonunu arttırmak için elektrobirikim işlemi sırasında farklı işlem parametrelerine odaklanmıştır. Bununla birlikte, partikül konsantrasyonundaki artış, yüksek konsantrasyonlarda dağılım kararsızlığı ve çözeltinin iletkenliğinin azalması, kütle taşınımı ile ilgili problemleri de beraberinde getirmektedir [7]. Parçacıkların aglomeras-

yonu, sedimentasyon hızında bir artışa yol açarak viskozite ve termal iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri de olumsuz etkilemektedir. Ultrases teknolojisinin kullanımı, partikül aglomerasyonunu önleyebildiği ve daha yüksek partikül içeriğine sahip tek tip yüzeyleri desteklediği için bu amaç için yüksek potansiyel olarak görülmüştür. Ayrıca, elektrobirikim sırasında ultrases kullanımı, tortudaki hidrojen absorpsiyonu yoluyla gözenekli yapıların boyutunun küçülmesine ve düzgün dağılıma sahip kristalik taneciklerden oluşan homojen bir mikro yapının oluşmasına yol açar. Ultrasonik dalgalar, kristallerin yönlenmesinde ve film ile altlık arasındaki yapışmayla ilgili stabilitede önemli bir rol oynayabilir. Bu gelişen teknoloji, ilaç taşınımı için malzemelerin imalatından, atık su arıtımının çevresel sürecine, gıda sektöründe bileşiklerin ekstraksiyonundan, kimyasal teknolojilerde katalizör üretimine kadar pek çok farklı uygulama alanında kullanılmıştır [8].

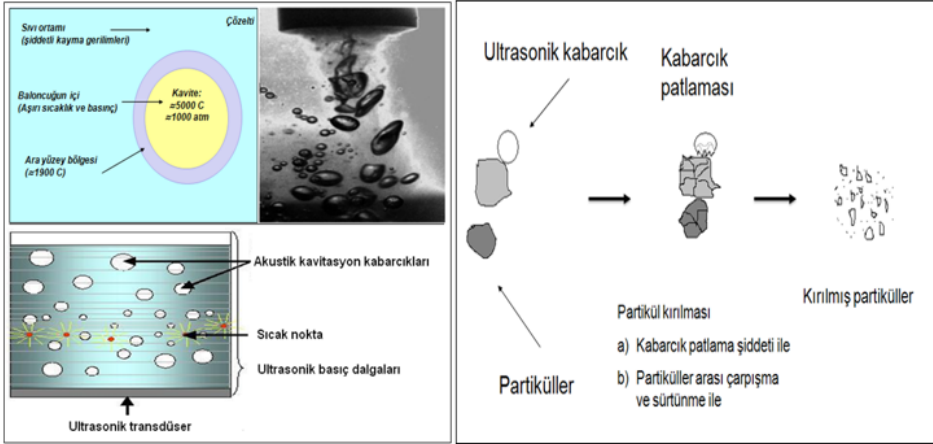
İşlem sırasında, akustik dalgalar sıvı ortamda yayılır ve moleküler yapının sıkıştırılması ve genişlemesinin titreşimli hareketine neden olur. Bu nedenle moleküller arasındaki mesafe salınımlara göre değişir. Bu titreşim yoğunluğu moleküler yapının kararsız hale geldiği duruma ulaşırsa, akustik kaviteasyon olgusunu oluşturan kabarcıkların oluşumu meydana gelir. Bu nedenle, sıvı ortamda ultrases uygulaması, kabarcıkların oluşumu ve ardından çökmesi nedeniyle türbülanslı akım ve sıcaklık artışının oluşması yoluyla fiziksel ve kimyasal yönleri değiştirebilir [9].



Şekil 3. Sonokimyanın kaynağı olan akustik boşluk oluşum mekanizması

Bu değişiklikler difüzyon tabakasının kalınlığını azaltır, kütle aktarımını iyileştirir, elektrot yüzeyinin gazını gidererek reaksiyon hızında ve hidroksil radikallerinin oluşumunda bir artışa neden olur. Ultrasonik dalgaların etkisi, mekanik enerjiyi dönüştürücüden proba doğru akustik enerjiye dönüştürerek ortamda oluşan titreşimlerle doğrudan olabileceği gibi, akustik dalgaların yayılmasıyla sıvı ortamda oluşan kavitasyon yoluyla dolaylı olarak da gerçekleşebilir [10]. Bununla birlikte, ultrases parametrelerinin kompozitlerin ve metal alaşımların elektrobirikimi üzerindeki etkisi yeterince çalışılmamıştır ve daha fazla çalışma gerekmektedir. Bu bağlamda, metalik kaplamaların elektrobirikiminde ultrases teknolojisinin uygulanmasındaki eğilimleri, prosese etki eden parametrelerin nasıl bir etki oluşturabileceği ve sistemin teknolojik özelliklerinin nasıl iyileştirebileceği konusunun irdelenmesi, bu konuda araştırmacılara ışık tutabilecektir.

Akustik kavitasyon olgusu, Şekil 3'te gösterildiği gibi, sıvı ortamdaki ultrasonik dalgaların yayılımı ile gerçekleşir. Kavitasyon, sıvıya büyük bir negatif basınç uygulanması sonucu mikro ölçekli baloncuk oluşması olayıdır. Dalga boyu 10^{-4} ile 10 cm arasında değişen ses dalgaları, bir sıvıdaki moleküler bir ortamda yaklaşık olarak 1500 m/s hızla, bir seri sıkışma ve genişleme basınç dalgaları ile hareket ederler.



Şekil 4. Ultrases kavitasyonu, sıcak nokta oluşumu ve partiküller üzerindeki etkisi

Ultrases dalgaları, sıkışma periyodunda sıvıda pozitif basınç oluşturarak molekülleri bir araya iter, genişleme periyodunda ise sıvıda negatif basınç oluşturarak molekülleri birbirinden uzaklaştırır. Bu etki sonucu oluşan ve “kavite” olarak adlandırılan boşluklara buhar basıncı sebebiyle sıvı gazı dolar ve çok kısa bir sürede boşluk yok olur. Bu durum gazın ani sıkışmasına neden olur ve anlık olarak

boşluk içinde çok yüksek sıcaklık ve basınç değişimleri meydana gelir. Yüksek lokal basınç ve sıcaklık oluşumuyla sonuçlanan bu etki “sıcak nokta” olarak adlandırılır ve kimyasal üretim için alışılmadık farklı bir mekanizma sağlar. Bu mekanizma, mikro türbülans ve mikro jet akımlarına yol açabileceği gibi ortamda reaktif radikallerin oluşmasına da neden olabilmektedir [11].

Ultrasesin frekans aralığı iki sınıfa ayrılabilir. Yüksek frekans (100 kHz–1 MHz), yaklaşık 1 W.cm^{-2} ’lik bir enerji yoğunluk seviyesi oluştururken, düşük frekans (16–100 kHz) ise 10 ila 1000 W.cm^{-2} arasında bir enerji yoğunluk seviyesi meydana getirir. Bu frekanslar, basınç değişimleri, büyüme ve kabarcıkların çökmesinden kaynaklanan fiziksel ve kimyasal değişiklikleri vererek madde ile etkileşimi belirler. Elektrobirikim işlemi sırasında kullanılan ultrasonik cihaz, bir güç jeneratörü, bir dönüştürücü, bir amplifikatör ve bir ultrasonik probdan oluşur. Jeneratör, dönüştürücü tarafından mekanik titreşimlere dönüştürülen yüksek frekanslı elektrik enerjisi sağlar. Bu titreşimler amplifikatörde yükseltilir ve prob tarafından sıvı ortama akustik dalgalar şeklinde yayılır.

Bir başka akustik dalga yayma cihazı, verimlilik ve işlem kapasitesi açısından prob tipi ultrases cihazından farklı olan ultrasonik banyolardır. Ultrasonik banyoların alt tarafına ultrasonik dalga yollayan transdüserler konulur ve tank genellikle suyla doldurulur. Ultrasonik banyolarda, kavitasyon sıvı ortamda kontrolsüz bir şekilde yayılır, düşük yoğunluk ve düzensiz yayılma gerçekleşir. Prob tipi ultrases cihazı banyo tipine göre daha homojen ve tekrarlanabilir etki gösterir.

3. Elektrobirikimde Ultrases Kullanımı ve Sonoelektrokimyasal Yöntem

Sıvı bir ortamdaki ultrasonik dalgalar, mekanik dalganın pozitif ve negatif basınç oluşturan döngülerde yayıldığı akustik kavitasyona neden olur. Yüksek enerji, negatif basınç döngüleri sırasında kabarcık oluşumunu destekler. Mikro-kabarcık kritik bir boyuta ulaştığında çökerek kaybolur. Bu nokta, yüksek basınç ve sıcaklıklara ulaşabilen sıcak nokta olarak bilinir. Bu kabarcık oluşumundan kaynaklanan olaylar, organik kimya, anorganik sentez, katalizörler, çevre kimyası, gıda kimyası ve elektrokimya gibi çok çeşitli endüstriyel sektörlerde ultrases teknolojisinin uygulanmasının temelini oluşturur.

Walker vd. [12], farklı çalışma koşullarını test ederken, akustik kavitasyonun biriken kaplama üzerindeki etkisinin metale, elektrokimyasal parametrelere ve akustik alanlara bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Farklı araştırma grupları tarafından yapılan çalışmalarda, metalik kaplamaların, nanokompozitlerin, filmlerin ve nano tabakaların çözünmesi için sonikasyonun ve partiküllerin elektrolitik banyolardaki dağılımının etkisini incelenmiştir. Ultrasesin, malzemeye bağlı olarak belirli özellikleri destekleyebilir olduğu, farklı ultrases enerjisi yoğunluğu

altında gerçekleştirilen işlemlerin, kaplama kinetiğini ve kaplama sertliğini etkilediği ifade edilmiştir. Örneğin, farklı ultrases enerji yoğunluklarının (20, 30, 40 W.cm⁻²), gerçekleştirilen Nikel kaplamalarda belirgin bir etkisi gözlenmezken, Nikel-Molibden kaplamalarda enerji yoğunluğu artışının, Mo içeriğinin ağırlıkça %14,5 ten 19,5'e yükselmesine ve bununla beraber mikro sertlik değerinin de 720'den 820 HV ye yükselmesine sebep olduğu gözlenmiştir [13].

Sonoelektrokimya uygulaması, sabit akım uygulayan ve çözeltideki tuz konsantrasyonuna bağlı olan geleneksel işlemlere kıyasla yüksek verim sağlayabilmektedir. Zin ve ekibi [14], 20 kHz frekansında, Titanyum ultrasonik probun katot elektrot olarak kullanıldığı bir ortamda, yüksek verim ve saflıkta, 11 ila 15 nm boyutlarında homojen dağılımlı Pt nanoparçacıkları elde etmişlerdir.

Sonoelektrobirikim sürecinde, elektrokimyasal akımdaki artış ve voltametrik eğrilerdeki değişiklikler, akustik kaviteasyonun sistemdeki kütle transferini iyileştirip iyileştirmediğini belirler. Elektrot yüzeyine yakın kaviteasyon, artan akım darbeleri etkisiyle birlikte korozyona ve yeni bir yüzeyin oluşumuna neden olan bir kabarcık kopması oluşturur. Bu sayede türbülans, mikro jetler ve şok dalgaları, elektrot yüzeyinde difüzyon katmanını azaltır. Elektrot ara yüzeyindeki kütle aktarım modeli, laminer bir alt katmandan ve elektrota bitişik bir konsantrasyon gradiyentinden oluşur. Akustik kaviteasyonun meydana gelmesi, enerjinin moleküllere transferini artırır [15].

CuO nano yapılarının geleneksel yöntemle (ultrases kullanılmadan - sessiz) ve sonoelektrokimyasal teknikle biriktirildiği bir çalışmada, sonoelektrobirikim yönteminin, elektrokimyasal reaksiyon ürünlerinin olumsuz etkilerini engelleyerek elektroliz sürecini hızlandırdığını ve 4,2 kat daha fazla CuO nano yapısı ürettiğini ortaya koymuştur. Hajnorouzi ve Modaresi tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, Fe₃O₄ nano parçacıklarının sonoelektrokimyasal teknikle sentezlendiği durumda elde edilen ürünün, geleneksel yöntemle elde edilen ürüne kıyasla %24 daha yüksek manyetik özellik gösterdiği ve birikim hızında da yaklaşık 15 kat kadar bir artış olduğu belirtilmiştir [16].

3.1. Ultrasesin Partikül Dağılımı Üzerindeki Etkileri

Ultrasonik ses dalgalarının meydana getirdiği olumlu etki, ortamda ani kabarcık (boşluk) oluşması ve çökmesi ile ortaya çıkar. Bir kabarcık çöktüğü zaman çözelti içinde belli bölgeler yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalır. Buna ek olarak katı partiküllerin etrafında mikroskobik türbülans oluşturma potansiyeli olan şok dalgaları meydana gelir. Bu olay "mikroakımlama" olarak tanımlanır ve kütle transfer hızını artırır. Bu durum süspansiyonlarda parçacıkların homojen dağılmasını oldukça kolaylaştırır. Elektrobirikim işlemi sırasında belirli özellik-

leri geliştirmek için ultrases kullanımına ek olarak, partiküllerin dağınık şekilde çökmesi durumunda da ultrases kullanılması, elektrolitik çözeltide bileşiklerin toplam çözünmesini artırabilir. Parçacıkların bu dağılımı, akustik akış, mikro jet ve şok dalgaları tarafından indüklenen parçacıkların çarpışmasıyla Van der Waals kuvvetlerinin bozulmasına ek olarak, salınımlı akustik basınç ve kavitasyon oluşturan mikro türbülanslardan kaynaklanır. Geleneksel manyetik karıştırmalı biriktirme ile karşılaştırıldığında, ultrases, kütle aktarımını artırarak, kaplamaları daha çok etkiler ve parçacıkların dağılımını optimize ederek hızlandırır. Bu durum kaplamaların daha iyi tribolojik performans göstermesini sağlar. Bununla birlikte, akustik kavitasyon çözeltideki partiküllerin dağılımını iyileştirse de belirli durumlarda dağılmayı sağlamak için yeterli olmayabilir [17].

Kompozit Ni-B/Ti-C kaplamaların, mikro yapılarını ve elektrokimyasal özelliklerini iyileştirmek için ultrases destekli biriktirme ile sentezlendiği bir çalışmada [18], atomik kuvvet mikroskobu ile yapılan analizler neticesinde, kaplamada yer yer dağılmış bazı çıkıntı ve çukurlara rastlanmıştır. Bu çıkıntılar ve çukurlar, partikül aglomerasyonu ve metal iyonlarının “uç” bölgelerinde tercihli adsorpsiyonu nedeniyle meydana geldiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte ultrases ile akustik kavitasyon oluşumu, aglomerasyonun ve çıkıntıların boyutunun azalmasını sağlayabilmiştir. Ortalama pürüzlülük boyutu incelendiğinde %90’dan fazlası 200 nm’den daha küçük bir boyuta sahip olan Ni-B ve Ti-C nanoparçacıkları gözlenmiştir.

3.2. Ultrasesin Morfoloji ve Mikro Yapı Üzerindeki Etkileri

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, birikmiş kaplamanın mikro yapısının ve morfolojisinin, elektrobiriktirme işleminde kullanılan ultrases enerjisinden olumlu olarak etkilendiğini ortaya koymuştur. Birçok çalışma, homojen partikül dağılımı ve tane boyutundaki azalma nedeniyle pürüzsüz yüzeyle sağlamak için ultrases enerjisinin uygulanabilirliğini ifade etmiştir. Ultrases tarafından üretilen akustik kavitasyon ve mikro jet akımları, mikro kürelerin (taneciklerin) birleşmesini önler ve elektron transfer bölgelerini etkileyerek nano parçacıkların oluşumuna yol açar.

4. Ultrases Parametrelerinin Elektrobirikim Kaplamalar Üzerindeki Etkileri

Önceki bölümde, ultrases enerjisi uygulanmasının elektrobirikim işlemi sürecinde partikül dağılımına, morfolojiye, mikro yapı üzerindeki etkilerine ve korozyon direncindeki iyileşmelere değinilmişti. Bu bölümde, kullanılan ultrases gücünün, frekansının ve uygulama modu gibi parametrelerin, elektrobirikim pro-

sesi üzerindeki etkileri irdelenecektir. Proses koşullarının etkili kullanılabilmesi için bu ultrases parametrelerinin meydana getirdiği değişiklikleri anlamak önem arz etmektedir.

4.1. Ultrases Frekansı

Ultrases destekli elektrobiriktirme yöntemi yapılan ile kaplama çalışmalarında ultrasonik frekansın etkisinin araştırıldığı çalışma sayısı oldukça azdır. Sulişanu ve ekibinin [19], ultrases frekansının, biriktirilmiş Ni-Zn ince filmlerin mikro yapısı üzerindeki etkisini inceleyen çalışmasında 20 kHz ve 1,0 MHz frekanslarında ultrasesiz ve ultrasesli koşullar incelenmiştir. Ultrases banyosundaki 20 kHz frekansı, ultrasesiz bir biriktirme ile karşılaştırıldığında, küçük tanecik boyutunda ve daha yoğun morfolojiye sahip Ni-Zn filmlerinin elde edilmesini sağlamıştır. Daha yüksek frekansta (1 MHz), farklı tanecik boyutlarında filmlerin oluştuğu ve birbirleriyle bir girişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu, farklı frekanslar kullanılarak, filmlerin mikro yapısının ve fizikokimyasal özelliklerinin kontrolünü sağlayabileceğini göstermektedir.

Beltowska vd., Al_2O_3 parçacıkları ile nano kristal Ni-W alaşımlarını biriktirdiği çalışmada, 35 kHz ve 130 kHz'lik olmak üzere iki farklı ultrasonik frekans uygulanmış, 35 kHz'de çalışmanın, kaplamanın mekanik performansını iyileştirdiği ve seramik fazın matris üzerinde dağılmasını desteklediğini, bunun da kompozitin düzgün bir dağılım ile elde edilmesini sağladığı ifade edilmiştir [20].

Artan ultrasonik frekans, daha kısa bir sıkıştırma döngüsü nedeniyle akustik kaviteasyonun yoğunluğunu azaltmasına sebebiyet vererek sistemde aynı miktarda kaviteasyonel enerji oluşturmak için daha çok güç verilmesini gerektirecektir. Öte yandan, daha yüksek frekanslarda genişleme ve sıkışma döngüleri de çok kısa olduğundan bu zaman aralığında moleküller birbirinden yeterince uzaklaşamayacağı için boşluk oluşması da zor hale gelecektir. Bununla birlikte daha büyük mikro-kabarcıkların daha hızlı çökmesi, mekanik etkinin daha düşük ultrasonik frekanslarda daha sık görülen bir olgu olduğunu gösterir [21].

4.2. Ultrases Gücü

Ultrases destekli elektrobiriktirme ile ilgili çalışmalarda güç, genellikle nominal güç olarak bilinen ultrases gücü ile, diğer bir deyişle ekipmanın tükettiği güç ile ifade edilir. Sisteme sağlanan enerji miktarı, nominal güçten daha azdır ve akustik güç veya gerçek güç olarak bilinir ve sıvı ortama iletilen güç miktarıdır. Bu güç, işlem süresi, sıvı ortamın özgül ısısı, kütlesi ve sıcaklık değişimi ile ilgili olduğu için hemen hemen tüm çalışmalarda hesaplanabilmektedir. Ultrasonik güç, akustik gücün prob alanı ile hesaplandığı ultrasonik yoğunluğun yanısıra enerji

yoğunluğu olarak bilinen ve birim hacim başına verilen enerji olarak da hesaplanabilir.

Enerji yoğunluğu, ultrases enerji performansının değerlendirilmesi için faydalı bir parametredir ve elektrobirikim çalışmalarında da kullanılabilir. Çalışmalarda nominal güç sağlansa da karşılaştırma amacıyla numune hacmi tarafından alınan enerjinin dikkate alınması uygun olacaktır. Yapılan birçok çalışmada işlem süresi boyunca sıcaklık değişimleri ihmal edilmektedir fakat sıcaklık profili, ultrases etkisiyle beraber değişmektedir. Böyle durumlarda ultrasesin net etkilerinin daha sağlıklı yorumlanabilmesi için bu sıcaklık değişimlerinin etkisini de hesaba katmak gerekmektedir. Genel olarak akustik güç yoğunluğundaki artış reaksiyon hızına ve yapısal özelliklere olumlu katkılar sağlar. Fakat bazı durumlarda akustik şiddetin daha fazla artırılması kabarcıkların çok hızlı ve fazla sayıda oluşmasını sağlayarak birçoğunun birleşerek büyümesine ve daha uzun ömürlü olmasına sebebiyet verir. Bu durum akustik enerjinin iletilmesini engelleyen bir bariyer oluşturarak elde edilen olumlu etkileri tersine çevirebilir.

Kalayın 40 kHz ultrasonik frekans altında ve 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 W'lık farklı nominal güçlerde, 316 L paslanmaz çelik bir alt tabaka üzerinde biriktirildiği bir çalışmada [22], Ultrases destekli elektrobirikim ile mevcut verimin %85,8'ten %95,1'e yükseldiği ifade edilmiştir. Ultrases destekli elektrobirikim, 35 °C, 100 W ve 3,5 M H⁺ konsantrasyonunda optimum performans sergileyerek pürüzsüz ve kompakt yüzeyler sağlarken, ultrasessiz yöntemle düzensiz şekilli yüzeye sahip mikro yapılar elde edildiği belirtilmiştir.

Ultrasonik güç yoğunluğunun bir başka etkisi de korozyon direncindeki artıştır. 0,6, 0,9 ve 1,2 W/cm² lik ultrases yoğunlukları altında sonoelektrobirikim ile yumuşak çelikte ile biriktirilen Sn-Ni alaşımları ile ultrases olmadan üretilen kaplamalar kıyaslandığında sonoelektrobirikim ile korozyona daha dayanıklı kaplamalar elde edildiği ortaya konulmuştur [23]. 0,9 W cm⁻²'de biriktirilen Sn-Ni alaşımı, en düşük korozyon oranını $7,81 \times 10^{-2}$ mm/yıl olarak gösterirken, ultrases olmadan elde edilen değer $16,63 \times 10^{-2}$ mm/yıl olduğu ifade edilmiştir. Korozyon hızındaki bu farkın, ultrasonik alan tarafından oluşturulan katmanlar arasındaki difüzyon mekanizması nedeniyle biriken ve 300 katmandan oluşan yüksek derecede tabakalaşma nedeniyle meydana geldiği belirtilmiştir.

4.3. Ultrasesin Reaksiyon Ortamına Veriliş Şekli

Ultrases enerjisinin reaksiyon ortamına iletilmesinde kullanılan iki farklı sistem mevcuttur. Bunlar *prob tipi* daldırmalı ultrasonik sistemleri ve *banyo tipi* ultrasonik sistemleridir. Bu konfigürasyonlarla ilgili olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde, ultrasonik banyo yaygın olarak kullanılmasına rağmen, prob tipi

ultrases ile gerçekleştirilen elektrobirikim yönteminin daha verimli olduğu görülmektedir. Bu durum genellikle sisteme sağlanan daha yüksek enerji yoğunluğunun etkisiyle olmaktadır ve daha kısa işlem süreleriyle beraber daha yüksek elektrobirikim verimliliği elde edilmektedir. Daldırılmalı prob tipi sistemlerde, kullanılan prob çapı sistemi etkileyen bir parametre olarak düşünülebilir çünkü daha küçük çaplar daha az enerji yayar ve sıvı ortamda daha az ısınmaya neden olur. Daha geniş yüzey alana sahip bir prob ise daha fazla enerji yayarak çözeltinin sıcaklığını artırır. Çalışılacak çözelti hacmi, hangi büyüklükte bir prob ile çalışılacağına karar verirken göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerden biridir.

Ultrases banyolarının çalışması için gereken büyük miktarda sıvı ve elektrobirikim ortamına dolaylı olarak etkimesi, uygulanan enerji yoğunluklarını ve çalışma elektrotu üzerindeki etkilerini azaltır. Bununla birlikte, uygulanan daha yüksek bir enerji yoğunluğu şiddetli akustik kavitasyon sağlar, bu da olumsuz bir etkiye sahip olabilir, çünkü akustik dalganın hızlı yayılması, partiküllerin elektrot yüzeyi ile hızlı-direkt çarpışmasına ve kaplama içinde eşit olarak dağılsalar da partiküllerin daha az birikmesine yol açabilir [24]. Banyo tipi ultrases, elektrolitin sonikasyonunu desteklediğinden ve prob tipi ultrases ise elektrotun katı yüzeyinde titreşimler sağladığından, elektrokimyada her iki konfigürasyon da yaygın olarak uygulanır.

Diğer bir alternatif de banyo ve prob konfigürasyonlarının birlikte kullanıldığı kombine ultrases sistemleridir. Bu sistem, tek bir cihaza göre daha yüksek akustik kavitasyon etkisi oluşturur. Ao vd. [25], banyo ve prob tipi konfigürasyonları birlikte kullanarak, Ni-Nd₂O₃ nano kompozitlerinin paslanmaz çelik bir plaka üzerinde biriktirildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde edilen kaplamaların yüzey morfolojisinin düzgün bir görünüme sahip olduğunu ve ince-kompakt yapıları tanecikler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sırasıyla 240 W ve 30 W nominal güce sahip banyo tipi ve prob tipi ultrasesin birleştirilmesinin, yüksek bir (%3.48 Nd₂O₃) partikül içeriği elde edilmesini sağladığı belirtilmiştir.

Ultrases enerjisinin sıvı bir ortama ulaştırılmasında farklılık sunan bir diğer parametre ise ses dalgalarının sürekli veya kesikli (pulsu) mod olarak verilmesi durumudur. Sürekli mod enerji aktarımının kesintiye uğramadan ortama verilmesi durumu iken, kesikli mod enerjinin ortama aç-kapa (on:off) şeklinde ulaştırılmasını sağlar. Kesikli mod kullanılması, uygulama sırasında sıcaklığın aşırı yükselmesini önler ve bazı durumlarda sistemin daha iyi kontrol edilmesini sağlar.

Bi₂MoO₆ nano filmlerinin, ultrasesli ve ultrasesiz her iki modda paslanmaz çelikte biriktirildiği bir çalışmada [26], kesikli elektrobirikim ile sodyum diklofenak bozunması için hazırlanan filmin, ince ve kısa iplik benzeri yapı oluşu-

mundan kaynaklanan yüksek pürüzlülük morfolojisi nedeniyle daha yüksek foto-katalitik etkinlik gösterdiği belirtilmiştir. Geleneksel elektrobirikimle hazırlanan filmlerde bu morfolojide bir yapı elde edilemediği gözlenmiştir. Kesikli sonoelektrobirikim (t_{on} : 4 s ve t_{off} : 6 s), geleneksel biriktirme ile karşılaştırıldığında XRD desenlerinde daha yüksek kristal oluşumları elde edilmiştir.

Ultras ses enerjisi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda proses verimliliğini ve performansını etkileyen parametrelere sıcaklık, dış basınç, viskozite ve prob dalma derinliği gibi diğer parametrelerde eklenebilir. Örneğin, çalışılan çözelti ortamında optimum ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için probun çözelti içindeki konumu (daldırma derinliği) aynı seviyede sabit tutulmalı ve bu da genellikle çözeltinin tam ortasına gelecek şekilde ayarlanmalıdır.

5. Sonuç

Sonoelektrobirikim işleminde nano yapılı malzemelerin oluşumunu ve kaplamanın kalitesini etkileyen ana işlem değişkenleri, ultras ses gücü, frekansı, işlem süresi ve sonikasyon modu olmakla beraber yapılan çalışmaların birçoğu, prob çapı, dalma derinliği, enerji yoğunluğu gibi parametrelerin etkisini ve/veya hibrit sistem kullanımı etkisini değerlendirmemiştir. Bunun yanısıra sonoelektrokimyasal süreçlerde, daha ileri çalışmalar, ultrasonik probun çalışma elektrotu olarak seçilmesinin nedenini daha iyi açıklayabilir. Yapılan son çalışmalarda ultras ses genellikle, sıvı ortamın dağıtılması için daha fazla kullanılmış ve geleneksel yöntemle kıyasla malzemelerin sentezinde daha iyi sonuçlar vermiştir.

Büyük potansiyele rağmen, performans hakkında bilgi eksikliği ve kavitasyonel aktivitenin düzgün dağılımındaki zorluk nedeniyle, özellikle elektrokimyasal proseslerde, sonoreaktörlerin endüstriyel kullanımı azdır. Uygulamalar, sonokimyasal reaktörün tipine göre özeldir ve ultrasonik dönüştürücülerin boyutlarını, hidrodinamik özellikleri ve karışımın davranışını dikkate almalıdır. Ultras ses gelişmekte olan, toksik olmayan, güvenli ve çevre dostu bir teknoloji olmasına rağmen, endüstriyel ölçekte özellikle elektrobirikim yöntemiyle nano yapıların sentezinde hala birtakım zorluklar içermektedir. Laboratuvar ölçekli çalışmalar ise bu zorlukların azaltılması için bir öncül olarak hizmet edebilmektedir. Endüstriyel ölçekte makro yapılı malzemeler için kısıtlı sayıda uygulama bulunmakla beraber, laboratuvar ölçeğinde nano yapılı malzemelerin üretimi, morfoloji, bileşim ve kristalinite gibi özellikler için daha fazla operasyonel kontrole sahiptir.

Sonoelektrobirikim, elektrolitteki ultrasonik kavitasyon yoluyla, düzensiz yüzeyleri düzgün ve pürüzsüz yüzeylere dönüştürmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Son yıllardaki ultras ses destekli sonoelektrobirikim uygulamaları gözden geçirildiğinde, akustik kavitasyonun kompozit kaplamaların homojen partikül

dağılımı, sertlik ve korozyon direnci gibi önemli özelliklerini iyileştirdiği söylenebilir. Sonuç olarak, kompozitlerin ve metal alaşımlarının, ultrases destekli elektrobirikim yöntemi kullanılarak elde edilmesiyle sağlanan avantajlar, bu konuda daha fazla sayıda araştırma yapma gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kaynakça

- [1] T. Fuchigami, M. Atobe, and S. Inagi, (2015), *Fundamentals and applications of organic electrochemistry: synthesis, materials, devices*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- [2] J. Zhu, S.T. Aruna, Y. Koltypin, A. Gedanken, (2000), *A novel method for the Preparation of lead selenide: pulse sonoelectrochemical synthesis of lead selenide nanoparticles*, Chem. Mater. 12, 143–147.
- [3] J. G. García, V. Sáez, M.D. Esclapez, P. Bonete, Y. Vargas, L. Gaete, (2010), *Relevant developments and new insights on Sonoelectrochemistry*, Physics Procedia, Volume 3, Issue 1, Pages 117-124,
- [4] J.M. Costa, A. F. de Almeida Neto, (2020), *Ultrasound-assisted electrodeposition and synthesis of alloys and composite materials: A review*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 68, 105193.
- [5] J. Zhu, S. Liu, O. Palchik, Y. Koltypin, A. Gedanken, (2000), *Shape-controlled synthesis of silver nanoparticles by pulse sonoelectrochemical methods*, Langmuir 16, 6396–6399.
- [6] M.K. Camargo, U. Schmidt, R. Grieseler, M. Wilke, A. Bund, (2014), *Electrodeposition of Zn-TiO₂ dispersion coatings: study of particle incorporation in chloride and sulfate baths*, J. Electrochem. Soc. 161, 168–175.
- [7] J. Theerthagiri, J. Madhavan, S. J. Lee, M. Y. Choi, M. Ashokkumar, B. G. Pollet, (2020), *Sonoelectrochemistry for energy and environmental applications*, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 63, 104960,
- [8] J. González-García, M. D. Esclapez, P. Bonete, Y. V. Hernandez, L. G. Garretón, V. Saez, (2010), *Current topics on sonoelectrochemistry*, Ultrasonics, 50, Issue 2, Pages 318-322,
- [9] T.J. Mason, and A. Tiehm, (2001), *Advances in Sonochemistry*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- [10] T.J. Mason and J.P. Lorimer, (2002), *Applied Sonochemistry, The Uses of Power Ultrasound in Chemistry and Processing*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- [11] T.J. Mason, (1999), *Sonochemistry*, 2nd Edition, Oxford University Press.
- [12] C.T. Walker, R. Walker, (1973), *Effect of ultrasonic agitation on some properties of electrodeposits*, Electrodeposition Surf. Treat. 1, 457–469.
- [13] I. Tudela, Y. Zhang, M. Pal, I. Kerr, T.J. Mason, A.J. Cobley, (2015), *Ultrasound-assisted electrodeposition of nickel: effect of ultrasonic power on the characteristics of thin coatings*, Surf. Coat. Technol. 264, 49–59.
- [14] V. Zin, B.G. Pollet, M. Dabalà, (2009), *Sonoelectrochemical (20kHz) pro-*

- duction of platinum nanoparticles from aqueous solutions*, *Electrochim. Acta* 54, 7201–7206.
- [15] J.C. Eklund, F. Marken, D.N. Waller, R.G. Compton, (1996), *Voltammetry in the presence of ultrasound: a novel sono-electrode geometry*, *Electrochim. Acta* 41, 1541–1547.
- [16] A. Hajnorouzi, (2020), *Two ultrasonic applications for the synthesis of nanostructured copper oxide (II)*, *Ultrason. Sonochem.* 64, 105020.
- [17] H. Okkay, (2013), *Ultrasen yöntemini kullanılarak katı oksit yakıt hücre elektrolitlerinin sentezi ve karakterizasyonu*, Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [18] B. Li, W. Zhang, (2020), *Facile synthesis and electrochemical properties of a novel Ni-B/TiC composite coating via ultrasonic-assisted electrodeposition*, *Ultrason. Sonochem.* 61, 104837.
- [19] N. Sulițanu, C. Pîrghie, F. Brînză, (2006), *Effect of ultrasounds sonication on surface microstructure of the electrodeposited Ni-Zn thin films*, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 8, 1889–1891.
- [20] E. B. Lehman, P. Indyka, A. Bigos, M. Kot, L. Tarkowski, (2012), *Electrodeposition of nanocrystalline Ni-W coatings strengthened by ultrafine alumina particles*, *Surf. Coat. Technol.* 211, 62–66.
- [21] L.H. Thompson, and L.K. Doraiswamy, (1999), *Sonochemistry: Science and Engineering*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 1215-1249.
- [22] T. Nan, J. Yang, B. Chen, (2018), *Electrochemical mechanism of tin membrane electrodeposition under ultrasonic waves*, *Ultrason. Sonochem.* 42, 731–737.
- [23] S. Shetty, M.M. Jaffer Sadiq, D.K. Bhat, A.C. Hegde, (2016), *Development of multilayer Sn-Ni alloy coating by pulsed sonoelectrolysis for enhanced corrosion protection*, *RSC Adv.* 6, 77465–77473.
- [24] E.G. Lecina, I. G. Urrutia, J.A. Díez, J. Fornell, E. Pellicer, J. Sort, (2013) *Codeposition of inorganic fullerene-like WS₂ nanoparticles in an electrodeposited nickel matrix under the influence of ultrasonic agitation*, *Electrochim. Acta* 114, 859–867.
- [25] Z.H. Ao, Y.J. Xue, X.H. Li, D.Y. Zhang, (2014), *Effect of ultrasound power on Ni-Nd₂O₃ nanocomposite coatings prepared by electrodeposition in combination ultrasonic field*, *Appl. Mech. Mater.* 678, 597–600.
- [26] M. Zargazi, M.H. Entezari, (2020), *Bi₂MoO₆ nanofilms on the stainless steel mesh by PSPED method: photocatalytic degradation of diclofenac sodium as a pharmaceutical pollutant*, *Ultrasonics-Sonochemistry.* 62, 104867.

Bölüm 4

Zeytinyağının Lezzet Bileşenleri

Mehmet Murat CEYLAN¹

¹ Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 76000, Iğdır, Türkiye. m.murat.ceylan@igdir.edu.tr

GİRİŞ

Bilinen en eski bitkisel yağlardan biri olan zeytinyağı, *Olea europaea* ağacı meyvesinin suyudur. Zeytin meyveleri en uygun olgunluk aşamasında hasat edildiği ve uygun şekilde işlendiği zaman, hafif ve eşsiz bir tada sahip zeytinyağı elde edilir. Bazı zeytin çeşitleri diğerlerinden daha iyi lezzet kalitesine sahip yağ üretmektedir (Kiritsakis, 1991). Binlerce yıldır Akdeniz bölgesinde nefis bir temel gıda olan zeytinyağı, Amerika Birleşik Devletleri (Firestone ve ark., 1988), Kanada ve diğer ülkelerde hiç olmadığı kadar popüler hale gelmiştir. Zeytinyağı tüketimindeki uluslararası artış, bilinen benzersiz lezzeti ve besin değeri ile alakalıdır. İkincisi, esas olarak yüksek monodoymamışlığından (oleik, zeytinyağının ana yağ asididir) ve fenollerin, tokoferollerin, skualen ve aroma bileşenlerinin varlığından kaynaklanmaktadır (Kiritsakis, 1991; Fedeli, 1977; Fedeli, 1993). Zeytinyağı, susam yağı dışındaki tüm bitkisel yağlar arasında, ham halde tüketilebilmesi ve böylece tüm doğal bileşenlerini muhafaza etmesi bakımından kendine özgüdür (Kiritsakis, 1991).

Zeytinyağının eşsiz tadı ve aroması, son derece düşük konsantrasyonlarda bulunan bir dizi bileşen tarafından üretilmektedir (Fedeli, 1977). Bu bileşenler, antioksidan etkiye sahip minör polar bileşenler olarak bilinen bir grup madde ile yakından ilişkilidir (Fedeli, 1993). Zeytinyağının aroma bileşenleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Evans ve ark., 1971; Montedoro ve ark., 1978; Solinas ve ark., 1987; Blekas ve Guth, 1993; Guth ve Grosch, 1993; Inglese, 1994; Morales ve ark., 1995; Aparicio ve ark., 1996; Morales ve ark., 1997).

Bu kitap bölümünde, zeytinyağının aroma bileşenleri gözden geçirilecek ve bunları etkileyen faktörler tartışılacaktır.

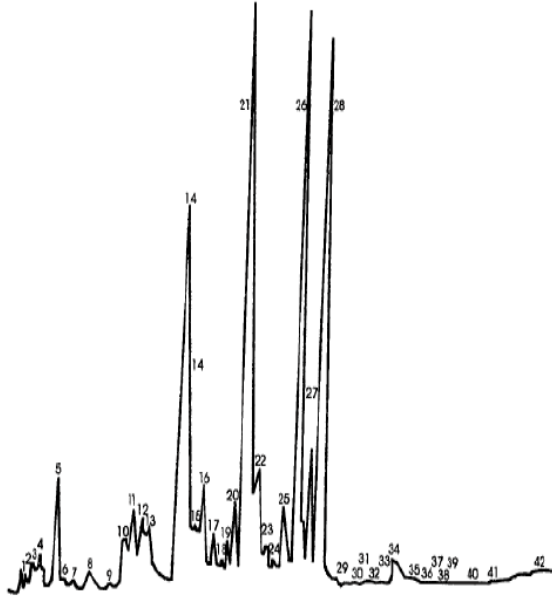
1. ZEYTİNYAĞININ UÇUCU AROMA BİLEŞENLERİ

Zeytinyağının aromasına katkıda bulunan birkaç bileşen tanımlanmıştır. Bunlar, C10'un baskın olduğu, C7 ile C12 arasında değişen bir dizi doymuş aldehitleri içermektedir. Aldehitler, diğer aroma bileşenlerine kıyasla zeytinyağında her zaman daha fazla miktarlarda bulunmaktadır. Yeşil ve siyah zeytinde aldehit içeriği sırasıyla %50 ve %75 olarak belirlenmiştir (Montedoro ve ark., 1978). Fedeli (1993) ve Montedoro ve ark. (1978) zeytinyağının aroma bileşiklerini;

- alifatik ve aromatik hidrokarbonlar,
- alifatik ve triterpenik alkoller,
- aldehitler,
- ketonlar,
- eterler,

- esterler,
- furan ve
- tiyofen türevleri olarak sınıflandırmaktadır.

Montedoro ve ark. (1978)'na göre, hekzanal, trans-2-heksenal, 1-heksanol ve 3-metilbutanol, zeytinyağının başlıca uçucu bileşikleridir. Zeytinyağının aroma bileşenlerinin gaz kromatografi profili ve koku tanımlayıcıları Şekil 1 ve Tablo 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Zeytinyağı uçucu bileşenlerinin gaz kromatografisi (Fedeli, 1977). Her numaranın açıklaması için Tablo 1'e bakınız.

Tablo 1. Şekil 1'de Gösterilen Gaz Kromatografi Piklerinin Koku Açıklamaları

Pik numarası	Koku tanımı
1	Kokusuz
2	Kokusuz
3	Keskin
4	Kokusuz
5	Kokusuz
6	Kokusuz
7	Eter benzeri
8	Alkol

9	Kokusuz
10	Keskin
11	Keskin
12	Kokusuz
13	Kokusuz
14	Meyvemsi, yapraksı
15	Yapraksı
16	Muzumsu
17	Yapraksı, çimensi
18	Yapraksı, çimensi
19	Yapraksı, zeytin
20	Keskin
21	Yapraksı, çimensi
22	Füzel yağı
23	Meyvemsi
24	Keskin
25	Meyvemsi
26	Meyvemsi
27	Meyvemsi
28	Yağimsı
29	Çiçeksi
30	Meyvemsi
31	Portakallı gül kokusu
32	Badem
33	Ekmek
34	Kokusuz
35	Meyvemsi
36	Terpen benzeri
37	Kokusuz
38	Kokusuz
39	Kokusuz
40	Pişmiş zeytin
41	Kokusuz
42	Kokusuz

2. ZEYTİNYAĞININ FENOLİK AROMA BİLEŞİKLERİ

Montedoro ve ark. (1978) fenolik bileşiklerin zeytinyağının aroması için bir derece önemi olduğunu bildirmiştir. Tüm polifenoller arasında;

- hidroksitirosol,
- tirozol,
- kafeik asit,
- kumarik asit ve
- p-hidroksibenzoik asit, zeytinyağının duyuusal özellikleri üzerinde en büyük etkiyi göstermektedir.

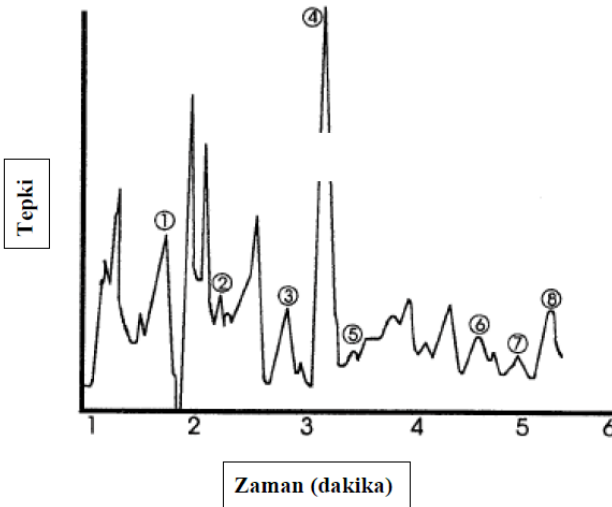
Hidroksitirozol kaliteli yağlarda bulunurken, tirozol ve bazı fenolik asitler kalitesiz yağlarda bulunur (Montedoro ve ark., 1978).

Birkaç fenolik asidin varlığı veya yokluğu, sızma zeytinyağının iyi veya kötü (kusurlu) kalitesiyle ilişkilidir. 4-Vinilfenol kötü zeytinyağı aromasında tespit edilmiştir. 4-Vinilfenol, muhtemelen zeytin meyvesinin depolanması sırasında dekarboksilasyon yoluyla p-kumarik asitten türetilmektedir (16).

Şekil 2, Koroneiki çeşidinin zeytin meyvesinde tanımlanan bazı fenolik bileşiklerini göstermektedir. Harzallah (1993), meyvenin olgunlaşması sırasında yeni fenolik asitlerin oluştuğunu tespit etmiştir. Geç hasat sırasında;

- gentisik,
- p-hidroksibenzoik ve
- protokateşik asitler oluşmaktadır.

Bu bileşiklerin bir kısmı, zeytinyağı elde etmek için zeytin meyvesinin işlenmesi sırasında yok edilmektedir. Emmons ve ark. (1996)'na göre, benzoik ve sinamik asitler, flavonoidlerin hidrolizi ile üretilmektedir. Hidroksifenil-etanol-ler, oleuropeinin hidrolizinden kaynaklanmaktadır. Zeytinyağlarının tadında ara sıra baskın olan acılık ve biberimsi histen esterleri sorumludur (Emmons ve ark., 1996).



Şekil 2. Koroneiki çeşidinin zeytin meyvesinde tanımlanan fenolik bileşikler (1: şikimik asit; 2: gallik asit; 3: pirogallol; 4: gentisik asit; 5: protokateşik asit; 6: p-hidroksibenzoik asit; 7: 4-hidroksi-3- metoksi-fenil asetik + hidroksikafeik asit; 8: siringik asit + kafeik asit + vanilik asit (Harzallah, 1993).

3. UÇUCU AROMA BİLEŞİKLERİNİN OLUŞUMU

Zeytin meyvesinde uçucu bileşiklerin oluşumu hücre yıkımı ile ilgili bir durumdur. Hidroliz ve oksidasyonu içeren enzimatik bir süreç meydana gelmektedir. Reaksiyonlar, pH ve sıcaklığa bağlı olarak yüksek bir hızda ilerleme göstermektedir. 13-Hidroperoksi-9,11-oktadekadienoik asit, linoleatın enzimatik oksidasyonu ile oluşmaktadır. Daha sonra, aldehit-liyaz enziminin etkisiyle heksenal oluşur. Son olarak, bir enzim indirgeme işlemi ile 1 heksanol oluşturulur. Farklı bir işlemde, aldehit-liyaz vasıtasıyla cis-3-heksenal ve trans-2-heksenal oluşturulur. Daha fazla indirgeme, cis-3-heksenol, trans-3-heksenol ve 1-heksenol oluşumuna yol açmaktadır (Montedoro ve ark., 1978).

Olias ve ark. (1993), zeytin meyvesinde heksenal, cis-3-heksenal, trans-2 heksenal aroma bileşiklerinin ve karşılık gelen esterlerin oluşumu için sıralı bir enzimatik yol önermiştir. Onlara göre, zeytin meyvesinde açilhidrolaz, lipoksijenaz ve yağ asidi hidroperoksit liyaz bulunur. Triaçilgliseroller ve fosfolipidler, asilhidrolaz tarafından esas olarak çoklu doymamış serbest yağ asitlerine hidrolize edilir. 9- ve 13-Hidroperoksitler, lipoksijenaz ile linoleik ve linolenik asitlerden oluşturulur. Liyaz, sırasıyla heksanal ve cis-3-heksenal uçucu aldehitleri oluşturmak için linoleik ve linolenik asitlerin 13 hidroperoksitini ayırır.

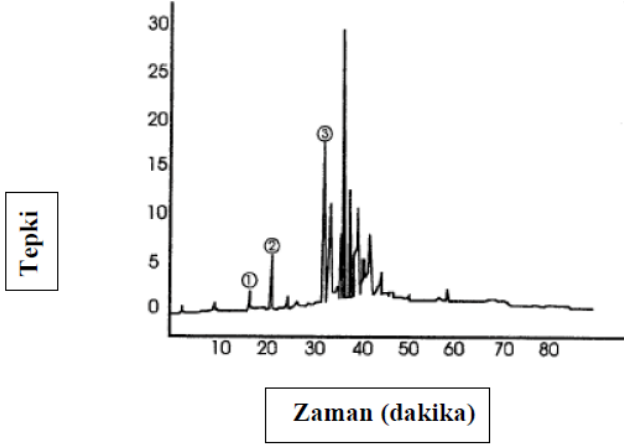
4. ZEYTİNYAĞINDAKİ LEZZET BİLEŞENLERİNİN OLUŞUMUNU VE VARLIĞINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Zeytinyağında aroma bileşenlerinin varlığı birçok faktörle ilişkilidir (Kiritakis, 1989; Kiritakis, 1993; Solinas ve ark., 1988; Ranalli, ve Ferante, 1996). Farklı çeşitler, aynı çevre ve yetiştirme koşulları altında farklı aroma bileşiklerine ve dolayısıyla farklı duyuşal özelliklere sahip yağlar üretebilmektedir. Montedoro ve ark. (1978) üç İtalyan çeşidinde (Canino, Frantoio ve Moraiolo) uçucu ve fenolik bileşenlerin oluşumunu incelemiş ve sadece uçucu bileşenlerde nicel farklılıklar gözlemlemiştir. Üç çeşitte fenolik bileşenlerin varyasyon modelleri ve konsantrasyonları oldukça benzer bulunmuştur. Üç çeşitte esterlerin, alkollerin ve aldehitlerin dağılımı, olgunlaşma süresi boyunca benzer şekilde değişmiştir. Trans-2-heksenal en yüksek konsantrasyonda tespit edilmiştir.

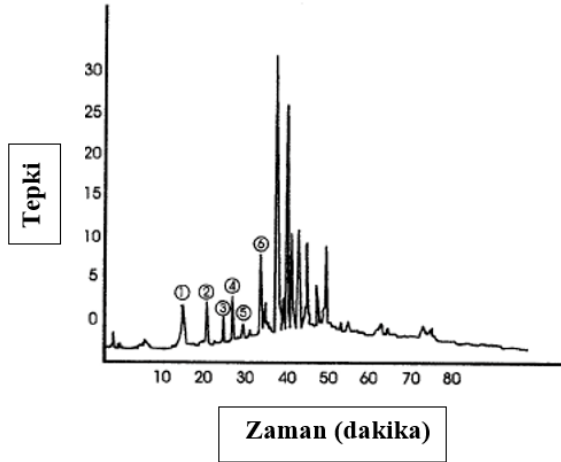
Ayrıca, Solinas ve ark. (1987), Drittar zeytin çeşidi için meyvenin olgunluğu ile yağın aroma bileşenleri arasındaki ilişkiyi incelemiş ve meyve pigmentasyonu ile başlıca uçucu olan 2-heksenal, heksanal ve heptanal içeriği arasında bir ilişki gözlemlemiştir.

Mousa (1993), zeytin ağaçlarının yetiştirildiği yüksekliğin meyvenin toplam fenol içeriğini etkilediğini gözlemlemiştir (Şekil 3). Osman ve ark. (1994) daha düşük irtifanın, daha yüksek fenol içeriğine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu-

nun nedeni muhtemelen daha düşük irtifaların daha uygun sıcaklık ve güneş ışığı yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tür koşullar, polifenol biyosentezi için karbonhidrat biyosentezinin ve açıl yapı taşlarının artmasına neden olmaktadır (Van Buren, 1970). Şekil 3 ve 4, iki hasat dönemi için Tsounati çeşidinin meyvesinde tanımlanan fenolik bileşikler göstermektedir. Zeytin meyvesinin olgunlaşması sırasında bazı fenolik asitler yok olmuştur.



Şekil 3. Tsounati çeşidinin zeytin meyvesinde ilk hasatta (Aralık) tanımlanan fenolik bileşikler (1: tirozol; 2: vanilik asit; 3: ortokumarik asit) (Mousa, 1993)



Şekil 4. Son hasatta (Nisan) Tsounati çeşidinin zeytin meyvesinde tanımlanan fenolik bileşikler (1: tirozol; 2: vanilik asit; 3: siringik asit; 4: p-kumarik asit; 5: ferulik asit; 6: orto-kumarik asit) (Mousa, 1993)

Montedoro ve ark. (1978) zeytin meyvesinin depolanması sırasında yağın uçucu bileşenlerindeki değişiklikleri incelemiş ve 10 günlük depolama sırasında aldehit ve esterlerin azaldığını bildirmiştir. Toplam fenolik bileşikler de depolama süresince bir azalma göstermiştir.

Aroma bileşikleri ya lipofilik ya da hidrofiliktir. Zeytin meyvesinin işlenmesi sırasında malaksasyon işlemi, çözünme nedeniyle lipofilik bileşenlerin (aldehitler, esterler) artmasına ve hidrofilik bileşenlerin (alkoller vb.) azalmasına neden olmaktadır (Montedoro ve ark., 1978).

Montedoro ve ark. (1978) ayrıca işleme ile ilgili olarak zeytinyağında uçucu bileşiklerin oluşumunu da incelemiştir. Zeytin işleme sırasında öğütme ve presleme uygulandığında, meyvelerin sadece preslendiği zamana göre daha fazla aldehit oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Görüldüğü üzere,

- iklim koşulları,
- yetiştirme uygulamaları,
- meyvenin olgunluğu,
- depolama koşulları ve
- işleme teknikleri,

zeytinyağının aroma (uçucu ve fenolik) bileşiklerinin oluşumunu ve varlığını etkilemektedir. Bu durum zeytinyağının lezzet kalitesinde büyük bir değişiklik ile sonuçlanmaktadır.

5. ZEYTİNYAĞINDA OKSİDASYON VE KIZARTMA İŞLEMİ SIRASINDA OLUŞAN TATSIZ BİLEŞİKLER

Gutierrez ve Romero (1960) zeytinyağının oksidasyonu sırasında çeşitli bileşiklerin oluştuğunu ve hangilerinin istenmeyen lezzetten sorumlu olduğunu ayırt etmenin zor olduğunu bildirmişlerdir. Oluşan aldehitlerin, istenmeyen lezzetin başlıca sorumlusu olması muhtemeldir. Morales et al. (1997) kötü tattan sorumlu uçucu bileşiklerin evrimini incelemek için sızma zeytinyağında bir termoksidasyon işlemi uygulamıştır. Zeytinyağının duyuşal özelliklerinden sorumlu olan başlangıç uçucularının (toplam 60 adet) termoksidasyonun ilk saatlerinde ortadan kaybolduğu ve tatsız bileşiklerin oluştuğu tespit edilmiştir (Morales, 1997). Nonanal ölçümü (sızma zeytinyağında saptanmaz) oksidasyonun başlamasını saptamak için yararlı olabilir (Morales, 1997).

Rahmani (1987) zeytinyağı oksidasyonu sırasında hem doymuş hem de doymamış karbonillerin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca doymuş karbonil bileşiklerin doymamış olanlardan daha hızlı arttığı da gözlemlenmiştir. Snyder ve ark. (1985) pentanal, heksanal, oktanal ve nonanal gibi doymuş karbonil bileşiklerinin oksit-

lenmiş zeytinyağında oluşan başlıca bileşikler olduğunu bulmuşlardır.

Barrio Perez-Cerezal ve ark. (1981) zeytinyağının oktan konsantrasyonu ile lezzet kalitesi arasındaki ilişkiyi incelemek için duyuşal değęerlendirme ve gaz-sıvı kromatografi analizini kullanmıştır. Zeytinyağının 100 gün süreyle depolanması sırasında tepe boşluğundaki oktan tepe alanı arttıkça, duyuşal kalitenin azaldığı tespit edilmiştir. Oktan tepe alanı ve duyuşal skor arasındaki korelasyon $r = 0.99$ şeklinde bildirilmiştir. Solinas ve ark. (1987) algılanan ransidite ile 2-pentenal, hekzanal, 2-heptenal, 2-oktenal, oktanal ve anal olmayan içerik arasında doğrudan bir ilişki gözlemlemiştir. 2-Pentenal ve 2-heptenal, sırasıyla 0,5 ve 1,5 ppm eşik değęerleriyle, ransiditenin ana göstergeleri olarak bildirilmiştir. Morales ve ark. (1997), oksitlenmiş zeytinyağının kaliteli zeytinyağından ayırt etmek için hekzanal/anal olmayan oranın kullanılabilceğini ileri sürmüştür.

Kızartma sırasında oluşan uçucu karbonil bileşikleri yağın doymamışlık derecesine bağılıdır (Solinas ve ark., 1988). Doymamış asitler, oksitlenmiş yağlarda bulunan uçucu bileşiklerin ana öncüleridir (Morales ve ark., 1997). Linolenik asit içeriğı, kızartma sırasında yağın lezzetini arttırmada önemli bir faktördür (Solinas ve ark., 1988; Kellil-Talantikite ve ark., 1993). Zeytinyağı diğęer yağlarla karşılaştırıldığında en yüksek lezzet stabilitesini göstermiştir (Solinas ve ark., 1988).

Ledahudec ve Pokorny (1993) zeytinyağı da dahil olmak üzere ısıtılmış veya kızartılmış yağlardaki yağlı tadın, uçucu olmayan ürünlerin oluşumuna atfedilebileceğini belirtmişlerdir. Acı tat, tamamen veya esas olarak uçucu bileşiklerin varlığından kaynaklanmaktadır (Ledahudec ve Pokorny, 1993). Yoo ve ark. (1988), hava varlığında 185 °C'de zeytinyağında yaklaşık 150 uçucu bileşik tanımlamıştır.

6. ZEYTİNYAĞININ LEZZET BİLEŞENLERİNİN DUYUSAL VE ENSTRÜMENTAL ANALİZLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Zeytinyağının duyuşal değęerlendirmesi, kalitesini değęerlendirmek için ana kriterdir. Ancak duyuşal analiz biraz karmaşıktır (Gutierrez, 1990).

Aparicio ve ark. (1994; 1996) ve Morales ve ark. (1995; 1997), zeytinyağının uçucu bileşikleri ile duyuşal özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemek için bir dizi uçucu madde kullanmıştır. Toplamda 49 uçucu madde tespit edilmiş, diğęerleri ise kütle spektrometrisi veya kimyasal standartlar kullanılarak tespit edilmiştir. Duyusal nitelikler ve uçucu bileşenlerden oluşan veri setlerinden içsel farklılıkları ortaya çıkarmak için çok boyutlu ölçekleme kullanılmıştır (Morales ve ark., 1995). Blekas ve Guth (1993) ve Guth ve Grosch (1993) aroma özü seyreltme analizi ile lezzet bakımından farklılık gösteren sızma zeytinyağının güçlü kokularını değęerlendirmiş ve bunları stabil izotop seyreltme deneyi ile nicelleştirmiştir.

Blekas ve Guth (1993) ve Guth ve Grosch (1993), farklı aroma profillerine sahip zeytinyağı numunelerinin güçlü koku vericileri olarak çeşitli bileşikler belirlemiştir. Blekas ve Guth'a (1993) göre, (Z)-3-heksenal (yeşil), oktanal, (Z)-2-nonenal, (E,E)-2,4-dekadienal ve 1-okten-3-on (ransit), etil 2-metilbütanoat, etil 2-metil-propanoat ve etil sikloheksanoat (meyveli), çeşitli lezzet notlarına temel olarak katkıda bulunan bileşiklerdir.

Tateo ve ark. (1993) farklı aroma özelliklerine sahip 12 sızma zeytinyağı örneğinin aroma bileşenlerini gaz kromatografisi/kütle spektrometrisi ile analiz etmiştir. Tespit edilen ana aroma bileşikleri ve bunların konsantrasyonları Tablo 2'de gösterilmektedir. Trans-2-hekzenal, duyuşal değerlendirme ile iyi kalitede zeytinyağı olarak karakterize edilen yağ numunesi A'da baskın görünmektedir. Duyusal kusurlu zeytinyağlarında trans-2-hekzenale baskın olan en az bir bileşen daha vardır; 2,4-dimetilfuran, hoş olmayan duyuşal niteliklere sahip zeytinyağında bulunmuştur. Bu, çoğunlukla kusurlu yağlarla ilişkilendirilen bir bileşendir (Tateo ve ark., 1993). Üç gaz kromatogramı (Şekil 5) numune A'da trans-2-hekzelin baskınlığı ile sırasıyla C ve B numunelerinde trans-2-heksen-1-ol ve 2,4-dimetilfuranın baskınlığını açıkça göstermektedir. A numunesinin iyi duyuşal kalitesi, zirve 2'nin (trans-2-heksenal) baskın olması nedeniyle, zirve 6'nın (2,4-dimetilfuran) mevcudiyeti ile tehlikeye atılmamıştır (Tateo ve ark., 1993). B numunesinde, 2,4-dimetilfuran belirgin bir şekilde baskın bulunmuş ve bir duyuşal kusur ile ilişkilendirilmiştir. Tateo ve ark. (1993), trans-2 heksenalin mutlak miktarının duyuşal açıdan en önemli faktör olmadığını bildirmişlerdir. Asil önemli olanın, trans-2-hekzenal ve diğer bileşenler arasındaki nicel oran olduğu vurgulanmıştır (Tateo ve ark., 1993). Trans-2-heksenal/2,4-dimetilfuran oranının 1.5'ten düşük olması 2,4-dimetilfuranın olumsuz etkisinin baskın olduğuna işaret etmektedir. Hekzenalin toplam uçucu alkollere oranı özellikle ilgi çekici bulunmuştur (Angerosa ve rak., 1992).

Tablo 2. Sızma Zeytinyağı Numunelerinde Saptanan Aroma Bileşikleri (Kon-santrasyonlar µg/L olarak ifade edilmiştir)

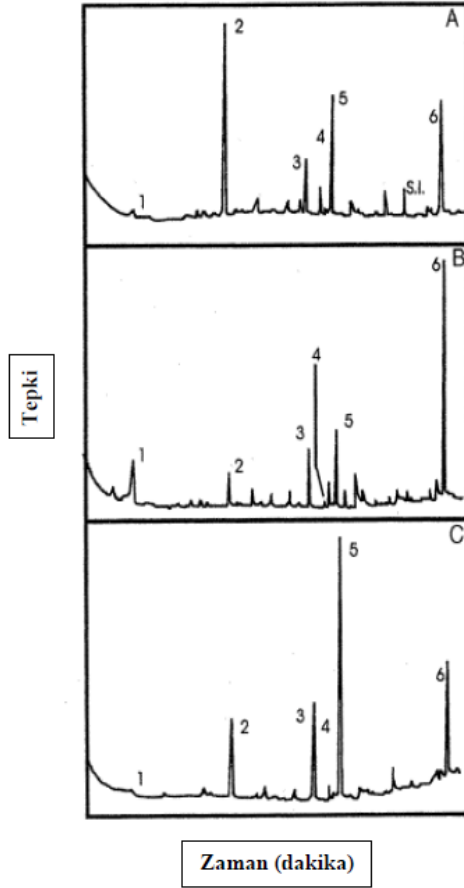
Yağlar												
Bileşen	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N
Heksenal	60	40	-	-	740	90	1030	-	290	20	-	30
Trans-2-Heksenal	1600	560	1350	-	340	120	370	60	430	750	700	170
Heksanol	440	100	230	-	140	440	460	60	740	1650	780	820
Cis-3-Heksanol	200	130	190	-	160	30	60	40	70	100	110	100
Trans-2-heksanol	880	310	510	-	140	420	560	320	930	540	1720	2100
2,4-Dimetilfuran	1000	350	320	-	870	1720	3000	2750	720	250	1600	1400

Tateo ve ark. (1993)

*Numune A, B ve C hatasız;

Numune D, nötr rektifiye edilmiş bir yağdır;

Diğer numuneler ise önemli kusurları ortaya koymaktadır

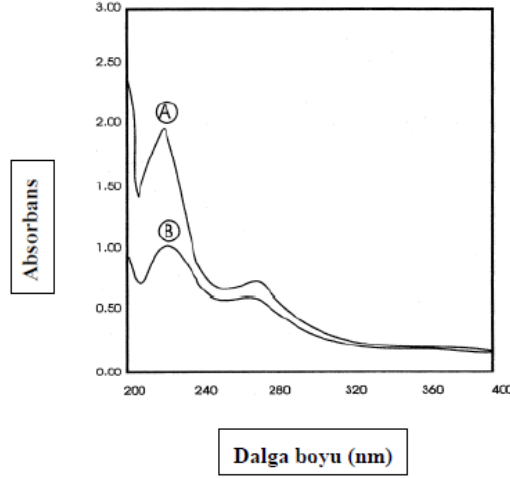


Şekil 5. Üç zeytinyağı örneğinin aroma bileşenlerinin gaz kromatogramları (A: meyve aroması, kusurlu B ve C) (1: Hekzanal; 2: trans-2- hekzenal; 3: hekzanol; 4: cis-3-heksenol; 5: trans-2-heksenol; 6: 2,4 dimetilfuran) (Tateo ve ark., 1993)

Sacchi ve ark. (1996) duyu kaliteyi değerlendirmek için doğrudan sızma zeytinyağı örneklerine yüksek alan (600 Mhz) nükleer manyetik rezonans spektrometrisi uygulamıştır. Doymamış ve doymuş aldehit rezonanslarının yanı sıra diğer petrol uçucularıyla ilgili olanlar tanımlanmıştır. Sızma zeytinyağının aldehit ve diğer profillerinin bu teknikle analizi, sızma zeytinyağının duyu yoğunluğunun hızlı ve yapıya özel değerlendirilmesi için yararlıdır. Zeytinyağının kötü tatlarını değerlendirmek için de yararlıdır. Bir sirke aroması, bir asetik rezonansla ilişkilidir (Sacchi ve ark., 1996).

Garcia-Mesa ve ark. (1992) sızma zeytinyağında acılık tayini için otomatik bir

yöntem geliştirmiştir. Otomatik yöntem, akış enjeksiyon analizi ilkelerine dayanmaktadır. Acı yağların sulu alkollü ekstraktlarının ultraviyole absorpsiyon spektrumları, 225 nm’de keskin bir maksimum değer ve 278 nm’de ise daha küçük bir maksimum değer gösterir (şekil 6). Sulu alkollü ekstraktın absorbansı, paneller tarafından belirlenmiş ve yağın acılığı ile yüksek oranda ilişkili bulunmuştur ($r = 0.904$).



şekil 6. Acı (A) ve acı olmayan (B) zeytinyağlarının UV absorpsiyon spektrumları (Garcia-Mesa ve ark., 1992)

SONUÇ

Sonuç olarak, zeytinyağındaki birçok aroma bileşeni, aroma kalitesine katkıda bulunmaktadır. Günümüzde üreticiler ve tüketiciler, sızma zeytinyağının lezzet yönleriyle ciddi anlamda ilgilenmektedir. Ancak, bu yönler henüz derinlemesine çalışılmamıştır. Zeytinyağının aroması ve aromasındaki farklılıkların çeşidine, çevreye veya diğer faktörlere ne ölçüde bağlı olduğu tam net bir şekilde bilinmemektedir. Zeytinyağının uçucu bileşenlerini ayırmak ve tanımlamak için pek çok çalışma yapılmış olsa da, kaliteli zeytinyağının eşsiz ve hassas tadından hangilerinin özellikle sorumlu olduğunu ve ne ölçüde sorumlu olduğunu bulmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Zeytinyağını hem panel hem de enstrümantal analizlerle değerlendirmenin en iyi yolunu belirlemek için çok daha detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

1. Angerosa, F., L. Di Giacinto, and M. Solinas, Influence of *Dacus oleae* Infestation on Flavor of Oils Extracted from Attacked Olive Fruits by HPLC and HGGC Analyses of Volatile Compounds, *Grasas Aceites* 43:134–142 (1992).
2. Aparicio, R., M.V. Alonso, M.T. Morales, and J.J. Calvente, Relationship Between the COI Test and Other Sensory Profiles by Statistical Procedures, *Grasas Aceites* 45:26–41 (1994).
3. Aparicio, R., M.T. Morales, and M.V. Alonso, Relationship Between Volatile Compounds and Sensory Attributes of Olive Oils by the Sensory Wheel, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 73:1253–1264 (1996).
4. Barrio Perez-Cerezal, A., F. Gutierrez Rosales, and R. Gutierrez Gonzalez-Quijano, Gas–Liquid Chromatography Application, A Head-Space Technic to the Olive Oils Atrojado Problem, *Grasas Aceites* 32:155–161 (1981).
5. Blekas, G., and H. Guth, Evaluation and Quantification of Potent Odorants of Greek Virgin Olive Oils, in *Food Flavors, Generation Analysis and Process Influence*, edited by G. Charalampous, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, 1993, pp. 419–427.
6. Emmons, E.W., E. Fedeli, and D. Firestone, Olive Oil Introduction and History, in *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 5th edn., Vol. 2, *Edible Oil and Fat Products: Oils and Oilseeds*, edited by Y.H. Hui, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996, pp. 241–269.
7. Evans, C.D., A. Helen, A. Moser, and G.R. List, Odor and Flavor Responses to Additives in Edible Oils, *Ibid.* 48:495–498 (1971).
8. Fedeli, E., Lipids of Olives, *Prog. Chem. Fats Other Lipids* 15:57–74 (1977).
9. Fedeli, E., Olive Oil Technology, *Olivae* 45:20–23 (1993).
10. Firestone, D., K.L. Carson, and R.J. Reina, Update on Control of Olive Oil Adulteration and Misbranding in the United States, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 65:788–792 (1988).
11. Flath, R.A., R.R. Forrey, and D.G. Guadagni, Aroma Components of Olive Oil, *Ibid.* 21:948–952 (1973).
12. Garcia-Mesa, J.A., M.D. Luque de Castro, and M. Valcarcel, Direct Automatic Determination of Bitterness in Virgin Olive Oil by Use of a Flow-Injection-Sorbent Extraction System, *Anal. Chim. Acta* 261:367–374 (1992).

13. Guth, H., and W. Grosch, Quantitation of Potent Odorants of Virgin Olive Oil by Stable-Isotope Dilution Assays, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 70:513–518 (1993).
14. Gutierrez, R.G.Q., Methodology for the Evaluation of the Organoleptic Qualities of Virgin Olive Oil, *Olivae* 33:24–27 (1990).
15. Gutierrez, R.G.Q., and A.V. Romero, Estudios Sobre el Enranciamiento del Aceite de Oliva. XI. Comparacion entre las Diferentes Pruebas para la Determinacion del Grado de Rancidez, *Grasas Aceites* 11:67–70 (1960).
16. Harzallah, H., Extraction of Phenolic Compounds from Olive Leaves, Olive Fruit and Olive Oil and Determination of Their Antioxidant Activity, M.Sc. Thesis, Mediterranean Agronomic Institute of Chania (MAI-Ch) Crete, Greece, 1993.
17. Inglese, P., Influence of Variety on the Quality Characteristics of Olive Oil, *Olivae* 54:42–47 (1994).
18. Kellil-Talantikite, S., B. Azzout, and M. Talantikite, The Effect of Heating on Olive Oil. A Comparison with Two Polyunsaturated Oils—“Primor” Rapeseed Oil and Soybean Oil, *Olivae* 46: 26–29 (1993).
19. Kiritsakis, A., and D. Min, Flavor Chemistry of Olive Oil, in *Flavor Chemistry of Lipid Foods*, edited by D. Min and T. Smouse, American Oil Chemists’ Society, Champaign, 1989, pp. 190–221.
20. Kiritsakis, A., Flavor Chemistry of Olive Oil, *Olivae* 45:28–33 (1993).
21. Kiritsakis, A., Olive Oil, American Oil Chemists’ Society, Champaign, 1991.
22. Ledahudec, J., and J. Pokorny, Effect of Nonvolatile Oxidation Products on Sensory Characteristics of Frying Oils, *Die Nahrung* 37:97–98 (1993).
23. Montedoro, G., M. Bertuccioli, and F. Anichini, Aroma Analysis of Virgin Olive Oil by Head Space Volatiles Extraction Techniques, in *Flavor of Foods and Beverages*, edited by G. Charalampous and G. Inglet, Academic Press, New York, 1978, pp. 247–281.
24. Morales, M.T., M.V. Alonso, J.J. Rios, and R. Aparicio, Virgin Olive Oil Aroma: Relationship Between Volatile Compounds and Sensory Attributes by Chemometrics, *J. Agric. Food Chem.* 43:2925–2931 (1995).
25. Morales, M.T., J.J. Rios, and R. Aparicio, Changes in the Volatile Composition of Virgin Olive Oil During Oxidation: Flavors and Off-Flavors, *J. Agric. Food Chem.* 45:2666–2673 (1997).
26. Mousa, Y.O.M., The Effects of Elevation and Field Storage of Olives on the Quality Characteristics of Olive Oil, M.Sc. Thesis, Mediterranean Agronomic Institute of Chania (MAICh) Crete, Greece, 1993.

27. Olias, J.M., A.G. Perez, J.J. Rios, and L. Sanz, Aroma of Virgin Olive Oil: Biogenesis of the Green Odor Notes, *J. Agric. Food Chem.* 41:2368–2373 (1993).
28. Osman, M., I. Metzidakis, D. Gerasopoulos, and A. Kiritsakis, Qualitative Changes of Olive Oil from Fruits Collected from Trees Grown at Two Altitudes, *Riv. Ital. Sost. Grasse* 71:187–190 (1994).
29. Rahmani, M., Studies of Factors Affecting Olive Oil Quality with Special Reference to Moroccan, Ph.D. Thesis, Institut Agronomique et Veterinaire Hassan II Rabat, Morocco, 1987.
30. Ranalli, A., and M.L. Ferante, Physico-Chemical and Analytical Characteristics of Extra Virgin Olive Oils Extracted by Using a Pectolytic Enzymatic Processing Aid, *Olivae* 60:27–32 (1996).
31. Sacchi, R., M. Patumi, G. Fontanazza, P. Barone, P. Fiordiponti, L. Mannina, E. Rossi, and A.L. Segre, A High-Field ¹H Nuclear Magnetic Resonance Study of the Minor Components in Virgin Olive Oils, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 73:747–758 (1996). [Received October 1, 1996; accepted December 15, 1997]
32. Sanchez Saez, J.T., M.D. Herce Garraleta, and T. Balea Otero, Identification of Cinnamic Acid Ethyl Ester and 4-Vinylphenol in Off-Flavor Olive Oils, *Anal. Chim. Acta* 247:295–297 (1991).
33. Snyder, J.M., E.N. Frankel, and E. Selke, Capillary Gas Chromatographic Analyses of Headspace Volatiles from Vegetable Oils, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 62:1675–1679 (1985).
34. Solinas, M., V. Marsilio, and F. Angerosa, Behaviour of Some Components of Virgin Olive Oil Flavour in Connection with the Ripening of Olives, *Riv. Ital. Sost. Grasse* 64:475–480 (1987).
35. Solinas, M., F. Angerosa, and V. Marsilio, Research of Some Flavour Components of Virgin Olive Oil in Relation to Olive Varieties, *Riv. Ital. Sost. Grasse* 65:361–368 (1988).
36. Solinas, M., F. Angerosa, and L. Camera, Oxidation Progress in Vegetable Oils During Frying: Determination of Volatile Components by HRGC and HPLC, *Riv. Ital. Sost. Grasse* 65: 567–574 (1988).
37. Tateo, F., N. Brunelli, S. Cucurachi, and A. Ferrilio, New Trends in the Study of the Merits and Shortcomings of Olive Oil in Organoleptic Terms in Correlation with the GC/MS Analysis of the Aromas, in *Food Flavors Ingredients and Composition*, edited by G. Charalampous, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, 1993, pp. 301–311.
38. Van Buren, J., Fruit Phenolics, in *The Biochemistry of Fruits and The-*

ir Products, edited by A.C. Hulme, Academic Press, London, 1970, pp. 269–304.

39. Yoo, Y.J., E. Fedeli, and W.W. Nawar, The Volatile Components Produced from Olive Oil by Heating, *Riv. Ital. Sost. Grasse* 65:277–281 (1988).

Bölüm 5

Süt Ve Süt Ürünlerinde Ultrasonikasyon

Menekşe BULUT¹

Dr., Iğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 76000, Iğdır, Türkiye

1. GİRİŞ

Ultrasonikasyonu, insanların işitilebilir eşik düzeyinin üzerindeki ses dalgalarının bilimi seklinde tanımlamak mümkündür. Sesin frekansı, tonunu ve perdesini belirler. Düşük frekanslı ses dalgaları bas tonuna sahipken yüksek frekans tiz tonlar üretmektedir. 18 kHz'den büyük frekanslar genellikle ultrasonik olarak kabul edilir ve insan kulağı tarafından duyulamaz (Lee ve ark., 2016; Yıldız, 2021). Genellikle, ultrasonikasyon (US) muamelesi 10 ile 1000 W/cm² aralığında ve 20 ile 100 kHz frekanslarında uygulanmaktadır. Ultrasonikasyon, sıvıların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi vardır (Cuheval ve Chow, 2008). 1944 yılında ultrasonikasyonu kullanmak için İsviçre'de ilk patent verilmiştir.

Tüketicilerin işlenmiş ürüne yönelik kalite kayıplarını en aza indirmeye yönelik artan ilgisi sebebiyle gıda işlemede ultrasonikasyonun rolü gün geçtikçe daha da önemli bir hale gelmektedir (Yıldız, 2018; Yıldız ve ark., 2021). Ultrason cihazı, süt gibi sıvılarda yoğun ses basıncı dalgaları aracılığıyla çalışır. Basınç dalgaları sıvının içinden geçerek sonunda büyük bir patlamayla sonuçlanan küçük kabarcıkların oluşumuna neden olur. Bu süreç "kavitasyon" olarak adlandırılmaktadır (Yıldız, 2019; Yıldız ve İzli, 2019). Kaviteasyon işlemi, kovalent bağları, kimyasal bileşikleri ve hücreler içindeki süreçleri inhibe eden yeterli enerjiye sahip sok dalgası üretmektedir (Dhankhar, 2014; Yıldız ve ark., 2017; İzli ve Yıldız, 2021). Bu nedenle, günümüzde ultrasonikasyon gıda işlemede ilerici bir teknoloji olarak kabul edilmiş ve ses dalgalarının güvenli, toksik olmayan ve çevre dostu özelliklerinden dolayı geniş bir uygulama alanı bulmaktadır (Yıldız ve ark., 2016; Yıldız ve ark., 2018; Jiang ve ark., 2019; Yıldız ve ark., 2020). Normalde yüksek frekanslı ultrasonikasyon işlemi süt homojenizasyon işleminde kullanılmaktadır. Bu araştırmada, süt ve süt ürünlerinin işlenmesi için yenilikçi ve çevre dostu ultrasonik teknolojinin prensipleri ve uygulamalarına detaylı bir şekilde değinilecektir.

Akustik; katılar, gazlar ve sıvılardaki ses, ultrases ve titreşim gibi alanlarda tüm mekanik dalgaların incelenmesiyle ilgilenen ses bilimidir. Süt ve süt ürünlerinde ultrases uygulamaları yenilikçi ve çevre dostu bir teknoloji olarak dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, araştırma alanları içerisinde hızla büyüyen bir alan olarak karşımıza çıkmakta ve diğer geleneksel tekniklere kıyasla yeni ve ilginç metodolojiler oluşturmak için bilim adamları arasında ilgi uyandırmaktadır. Süt ürünlerinin analizi ve modifikasyonu başta olmak üzere çeşitli nedenlerle süt endüstrisinde de ultrasonik arıtmanın çeşitli amaçlarla kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Süt endüstrisinde ultrasonikasyonun önemli hedeflerinden bazılarını şu şekilde sıralamak mümkündür:

- Sütün homojenizasyonu sırasında yağ ve su fazlarının ayrılmasından elde edilen emülsiyonun stabilitesini ve kıvamını arttırmak,
- Gelişmiş kalite, işleme süresi, düşük fiziksel ve kimyasal tehlikeler ile üretkenlik, seçicilik ve verim açısından net bir avantaj sunmak,
- Süt homojenizasyonu sırasında sütteki yağ globüllerinin boyutunu küçültmek,
- Fizikokimyasal özellikler olarak kabul edilen süt ve süt ürünlerinin yapısı, bileşimi ve fiziksel durumuna özellikle atıfta bulunarak, proses kontrolü ve kalite güvencesi için tahribatsız bir analitik teknik olarak kullanmak (Al-Hilphy ve ark., 2016).

2. ULTRASONİKASYON UYGULAMASININ TEMEL MEKANİZMASI

Ultrasonikasyon, dönüştürücü olarak adlandırılan bir piezoelektrik malzeme-ye sağlanan elektrik enerjisi tarafından üretilen mekanik bir enerjidir ve daha sonra bunu sıvıdan iletilen belirli bir frekansta mekanik titreşime dönüştürür (Leighton, 1994; Yıldız ve İzli, 2019; Yıldız ve ark., 2019)). Artan frekanslardaki mekanik titreşime ses enerjisi denir. Normal insan sesi aralığı 16–20.000 Hz arasındadır. Bunun ötesinde üst limit, “ultrasonik” olarak adlandırılır (Elmehdi, 2003; Yıldız ve Feng, 2019; Yıldız ve Aadir, 2020). Ultrasonik dalgalar malzemenin yüzeyine çarpar ve kuvvet yüzeye dik olduğunda bir kuvvet oluşturur. Gıda boyunca hareket eden bir sıkıştırma dalgasıyla sonuçlanır; ayrıca kuvvet yüzeye paralel ise bir kesme dalgası üretir. Ancak, dalgalar gıda içinde hareket ettikçe zayıflar. Ultrasonikasyon, basınç ve sıcaklıkta çok hızlı lokalize bir değişiklik meydana getirir, bu da kesme bozulmasına, kavitasyona, hücre zarlarının incelmesine, lokalize ısınmaya ve mikroorganizmalar üzerinde öldürücü bir etki ile yağ globüllerinin boyutunun küçülmesine neden olan serbest radikal üretimine neden olur (Al-Hilphy ve ark., 2012). Ortam (sıvı süt), ultrasonik dalgaların difüzyonuna tepki verir ve elastik olarak titreşerek bunları sürdürür.

3. ULTRASONİKASYONUN UYGULAMA TÜRLERİ

Ultrasonik uygulama, süt ve süt ürünlerinde araştırma yapmak için gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu teknoloji genellikle ses dalgalarının frekansıyla ilgilendir. Frekansa göre, ultrasonikasyon aşağıdaki üç frekans aralığında sınıflandırılabilir. Bu aralıkların tümü, ses gücü (W), ses yoğunluğu (Wm^{-2}) veya ses enerjisi yoğunluğu (Wsm^{-3}) gibi önemli kriterler ile karakterize edilmektedir (Knorr ve ark., 2004).

- Güç ultrasonu 16–100 kHz arasında değişmektedir
- 100 kHz–1 MHz arasında değişen yüksek frekanslı ultrason
- Tanısal ultrason 1–10 MHz (1 MHz = 1 milyon saniyedeki devir sayısı).

4. SÜT HOMOJENİZASYONUNDA ULTRASONİKASYON KULLANIMI

Çiğ süt; yağ kürecikleri, çeşitli katı maddeler ve sudan oluşan bir emülsiyondur. 25°C'de ve atmosferik basınçta inek sütü ve hindistan cevizi sütü altı saat sonra pıhtılaşır ve krema, yağsız süt ve suya aktarılır. Zamanla, yağ kürecikleri ayrılmaya başlar ve krema tabakası olarak ve yağsız süt bir alt tabaka olarak yükselir. Homojenizasyon bu bileşenlerin ayrılmasını engeller. Ayrıca homojenizasyon işlemi, sütün yoğunluğunu yeniden düzenler ve yağ globüllerinin çapını, tek tip boyut elde etmek ve yağ zarının yüzey gerilimini artırmak için azaltır (Chemat, 2011). Günümüzde sütün homojenizasyonu için ultrasonik arıtmanın kullanımını çeşitli faydalarından dolayı popüler hale gelmiştir. Yüksek ultrasonikasyon genliği ve daha uzun maruz kalma süresi, homojenizasyon derecesi üzerinde daha büyük bir etki sağlar. Kılcal dalga mekanizması, yağ globüllerinin bozulmasına katkıda bulunur. Yağ globül boyutunun azaltılması, yalnızca yağ globüllerinin çapı salınım dalga boyundan daha büyükse etkinleştirilir. Kaviteasyon, ultrasonik emülsifikasyon için en çok kabul edilen mekanizmadır. Bu mekanizma, ultrasonik probu ve yüksek hızlı jetleri çevreleyen sütte güçlü şok dalgaları üreten içe doğru patlayan kabarcıklara bağlıdır. Bu mikro jet, etkili bir şekilde yağ globüllerinin bozulmasına neden olur. Geleneksel homojenizasyona göre sütün homojenizasyonunda yüksek güçte ultrasonikasyon işleminin önemli bir etkisi vardır. Homojenizasyon kremleşmeyi önlemek için kullanılır. Sütün fiziksel yapısı homojenizasyon işleminden etkilenir ve aşağıda sayılan çeşitli avantajlara sahiptir:

- yağ kürecik boyutunun küçültülmesi,
- krem çizgisi oluşumuna neden olmaması,
- daha beyaz ve çekici renk,
- yağın oksidasyonunun azalması,
- zengin aroma,
- daha iyi tat ve
- kültür süt ürünlerinde daha iyi stabilite (Ashok, 2010).

Süt ve süt ürünleri, yağın bir enerji kaynağı olduğu memelilerin evcilleştirilmesinden bu yana tüketilmektedir. Yağ, proteinler ve fosforlarla kolayca reaksiyona girme yeteneğine sahip olan sütün en önemli ve reaktif bileşeni olarak bili-

nir (Sfakianakis ve Tzia, 2014). Taze sütteki yağlar, proteinler ve fosforlar tarafından sarılı bir halde yer alır. Süt bileşenlerinin yoğunlukları değişkenlik gösterir ve bu yoğunluk homojenizasyon olarak bilinen belirli bir standart süreçle yeniden düzenlenmesi gerekir. Ultrasonikasyon destekli homojenizasyon işlemi, süt endüstrisinde yaygın olarak uygulanan bileşenlerin partikül yoğunluğunun değiştirilmesiyle sütün homojenliğini sağlamaktadır. Bu teknoloji, yoğurt, dondurma vb. gibi çoğu süt ürününün işlenmesindeki birçok avantajından dolayı önemli bir ön arıtma prosesi olarak kabul edilmektedir (Sfakianakis ve ark., 2015).

5. SÜTÜN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

5.1. Boyut

Ultrasonikasyon (US) esas olarak homojenizasyon yoluyla yağ globüllerinin boyutunu küçültmek için kullanılır. Boyut küçültme, yalnızca yağ globüllerinin boyutu salınım dalga boyundan daha büyükse ve süt gibi su içinde yağ emülsiyonları için mümkün olsa da, 10 μm 'dir (Al-Hilphy ve ark., 2012). Yağ globüllerinin bozulmasına neden olduğu söylenen mekanizmaya kılcal dalga mekanizması adı verilmektedir. Ultrasonikasyonun güç seviyelerindeki artışla partiküllerin boyutu küçülmekte ve ayrıca zamanın artmasıyla boyutun azalmasında önemli bir etkiye sahiptir. Shanmugam ve ark. (2012) 41 W güç seviyesinin, ilk 15 dakika boyunca boyutta maksimum azalma ile 20 W güç seviyesinden daha yüksek etki gözlemlenmiştir ve uzun süreli uygulama, boyut küçültmede kademeli bir azalma göstermiştir. Parçacıkların boyutundaki azalma, akustik kaviteasyon sırasında üretilen kesme kuvvetlerine bağlanır. Yüksek yoğunluklu US, peynir altı suyu proteini partiküllerinin boyutunu ve şeklini kontrol etmek için etkili bir tekniktir. Değişkenlerin doğru ve uygun seçimi, protein parçacıklarının şeklinin yanı sıra ortalama boyutu, polidispersiteyi de belirleyebilmektedir.

5.2. pH

Sütün pH'ı ultrasonikasyon sürecinden çok fazla etkilenmez. Yanjun ve ark. (2014), prob ile güç US (PUS) ön işleminden sonra US'nin sütün pH'ı üzerindeki etkisini araştırmış, ancak kontrol (işlenmemiş) ve US ile işlenmiş numuneler arasında çeşitli zaman süreleri için önemli bir fark ($p > 0.05$) bulamamıştır. Sonuçları Jambrak ve ark. (2008), 20 kHz'de kontrol ve sonikasyona tabi tutulan numunelerin pH'ı arasında herhangi bir anlamlı farklılık ($p > 0.05$) gözlemlenemediler. Walstra ve ark. (2006), Bermudez-Aguirre ve ark. (2008), Yanjun ve ark. (2014) ve Jambrak ve ark. (2008) gibi diğer bazı araştırmacıların sonuçları uygulamadan sonra sütün pH'ının daha düşük değerleri gösterdiğini tespit etmişlerdir. Walstra ve ark. (2006) sütün pH'ındaki düşüşü fosforik esterlerin enzimatik hidrolizi ile

alakalı olabileceğine dikkat çekmiştir.

5.3. Sıcaklık

Ultrasonikasyon işlemi sırasında, yüksek yoğunluklu ses dalgaları, 29 kHz'den daha yüksek frekanstaki çözeltilerden geçirilerek akustik kavitasyona yol açmaktadır. Akustik kavitasyon sırasında, solüsyonda bulunan mikro kabarcıklar, 5000 K'yi aşan yerel sıcaklık noktaları ve birkaç bin barlık basınçlar oluşturarak şiddetli bir şekilde patladıklarında maksimum kritik boyuta ulaşılan kadar boyut olarak büyürler. Kavitasyon sırasında, polimer zincirlerini parçalamak için yeterli kesme kuvvetleri oluşturulur (Zisu ve ark., 2010). Sıcaklıkta çok yüksek bir artış olmasına rağmen, sıcaklıktaki bu artış geçicidir ve kavitasyon ve patlama bölgesinde lokalizedir.

5.4. Viskozite

Viskozite, bir ürün ya da prosesin verimliliğini, verimini ve uygulanabilirliğini yöneten süt endüstrisinde çok önemli bir işlemdir. Viskozite, sütün ultrafiltrasyon ve spreyle kurutulması sırasında sıklıkla problemlere yol açmaktadır. Ultrasonikasyon, süt ürünlerinin viskozitesini azaltmak için güçlü kesme kuvvetleri oluşturmak amacıyla kullanılabilir, potansiyel olarak hem konsantrasyon hem de spreyle kurutma işlemlerinin verimliliğini artırmaktadır. Zisu ve ark. (2013) konsantre yağsız sütü yüksek yoğunluklu ve düşük frekanslı ultrasonikasyon işlemine tabi tutmuştur. Yaklaşık %10'luk bir viskozite azalması elde edilmiş, bu da yüksek viskoziteli kalınlaştırılmış malzemede >%17'ye kadar yükselmiştir. Sonikasyondan sonra 150 s⁻¹'in altındaki kesme hızlarında kesme incelenmesi de görülmüştür. Ultrasonikasyon işlemi, konsantre yağsız sütün viskozitesini %50 katı maddeye kadar düşürebilmesine rağmen, koyulaşma oranını yalnızca geciktirebilmiştir. Ancak, konsantrasyon işlemi sırasında US kullanıldığında, yağsız süt konsantrasyonlarının viskozitesindeki azalma hızla sağlanabilmiştir.

5.5. Emülsiyon Stabilite İndeksi

Emülsiyonlar, dağılmış faz (sürekli faz olarak adlandırılan başka bir sıvıda) olarak adlandırılan çok ince bir sıvının (genellikle daha az miktarlarda) dağıtılmasıyla stabilitenin elde edilebildiği, karışmayan sıvıların kararlı süspansiyonlarıdır. Bir emülsiyon, dağılmış fazın damlacıkları bir süre birleşmez, yükselmez veya yerleşmezse, kararlı emülsiyon olarak kabul edilebilir. Bir emülsiyonun stabilitesini etkileyen faktörler şunlardır: arayüzey kuvvetleri, dağılmış fazın boyutu (süt durumunda yağ kürecikleri), sürekli fazın viskoz özellikleri ve iki faz arasındaki yoğunluk farklılıkları. Sütün ultrasonikasyonu sırasında bu faktörlerin

neredeyse tamamı etkilendiğinden, işlemin emülsiyon stabilite indeksi üzerinde de önemli bir etkisi vardır. Sfakianakis ve Tzia (2014) yüksek yoğunluklu US uygulamasının sütün stabil bir emülsiyon oluşturması ile sonuçlandığını bildirmiştir. Kaviteasyon, ultrasonikasyon tabanlı emülsifikasyon için en çok kabul edilen mekanizmadır. Bu mekanizma, ultrasonik sondayı çevreleyen sütte güçlü şok dalgaları ve yüksek hızlı jetler üreten ultrasonikasyon sırasında üretilen kabarcıkların patlamasına dayanmaktadır.

5.6. Absorbans/Bulanıklık

Shanmugam ve ark. (2012) tarafından ultrasonikasyon işleminin süt numunelerinin bulanıklığını etkilediği, ancak sonikasyona tabi tutulan numunelerin bulanıklığındaki değişikliklerin, peynir altı suyu proteini ve onun agregatlarındaki değişikliklerle ilgili olabileceği bildirilmiştir. Çözünür parçacıklar, incelenen diğer parçacıklara kıyasla büyüklükte daha büyük bir azalma göstermiştir.

6. FARKLI SÜT ÜRÜNLERİNDE ULTRASONİKASYON UYGULAMALARI

Süt ve süt ürünlerinde ultrasonik dalga yöntemi kullanılarak kimyasal reaksiyonlarda ve yollarında değişiklikler meydana gelmektedir. Ultrasonikasyon, bir dizi etkileşimli sistemde reaksiyon oranlarının teşvik edilmesinde son derece yararlı bir araç olduğunu kanıtlamıştır. Biyolojik ve kimyasal elektrokimyasal sistemlerde dönüşüm süreçlerinin büyük bir başarı ile artmasına, etkileşimin gidişatının değişmesine ve/veya etkileşime başlamasına neden olmuştur (Thompson ve Doraiswamy, 1999). Ses dalgaları gıdalarda ilk kez 1960 yılında bazı gıdalardaki bazı besin maddelerinin temizlenmesi ve karakterizasyonu için kullanılmıştır.

6.1. Yoğurt

Son zamanlarda, termal (ısısal) işleme kıyasla nihai ürünün kimyasal özelliklerini ve reolojik özelliklerini iyileştirmek için fermente süt endüstrisinde ultrasonikasyon yerini almıştır. Süt ürünü olan yoğurt, ultrason ile muamele edilmiş ve fiziksel ve dokusal özellikler (20 kHz, 50–500 W, 1–10 dk) üzerinde etki gösterdiği görülmüştür. Örneğin: nihai ürünün artan viskozite, daha düşük sinerez ve iyileştirilmiş su tutma kapasitesi gibi (Wu ve ark., 2000). Bazı araştırmalar, ultrasonikasyonun laktobasillerin asitlenme özelliklerini iyileştirdiğini, böylece üretim süresini kısaltırken, laktozun hidrolizini hızlandırdığını ve bu durumun da kalori içeriğini artırmadan sütte tatlandırma etkisi uyardığını göstermiştir (Shimada ve ark., 2004). Ultrasonikasyon, soya yoğurdu üretiminde de kullanılmış ve düşük frekanslarının *Bifidobacteria*'nın hayatta kalma yüzdesini artırdığı ve

fermantasyon süresini kısalttığı gözlemlenmiştir.

6.2. Peynir

Peynir endüstrisinde kullanılan ultrasonikasyon (20 kHz frekans) verim artışı, proteolitik enzimlerin gelişmiş aktivitesi ve azaltılmış işlem süresi ile sonuçlanmıştır (Villamiel, ve ark., 1999). Ultrasonikasyon, kusurlu ve kusurlu olmayan peynir spektrumundaki farklılıkları temel alarak peynirdeki kusurların sınıflandırılması için kullanılmıştır. Ultrasonikasyon, aynı konu özelinde Orlandini ve Annibaldi (1983) tarafından Parmesan peynirinde de kullanılmıştır. Ultrasonik dalgalar (500 kHz ve 1 MHz) ile muamele edilen Tortadel Casar peynirinin olgunlaşması sırasındaki değişimler, asitlik, ısı pıhtısı ve peynir olgunlaşmasının takip aşamaları ölçülerek incelenmiştir (Jiménez ve ark., 2010). Bu çalışmada, US uygulamasının sert peynirdeki starter bakteriler üzerindeki etkileri, peynirin olgunlaşma döneminde laktoz dehidrojenaz enzim aktivitesinde bir artışa ve laktokok hücrelerinin laktobasil hücrelerine göre daha fazla otolizine neden olmuştur (Tabatabaei ve Mortazavi, 2010).

6.3. Dondurma

Dondurma ürünlerinde kullanılan US teknikleri, borat karlarının boyutunu küçülterek ısı transferini (Zheng ve Sun, 2005) artırarak dondurma işleminin süresini kısaltmıştır. Ayrıca dondurma üretiminde kullanıldığında daha kaliteli dondurma ürünleri verdiği gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Ultrasonikasyon, süt ve süt ürünleri gibi gıdalarda kullanılabilecek en umut verici yeni teknolojilerden biridir. Diğer tekniklere nazaran daha ucuzdur. Sıklık türüne, gıda türüne ve süreye bağlı olarak birçok şekilde kullanımı mümkündür. Yüksek frekanslı ultrasonikasyon, süt ürünlerindeki mikroorganizmaları ortadan kaldıracaktır ve nihai ürünün kimyasal özelliklerini ve reolojik özelliklerini koruyabilir. Düşük frekanslı ultrasonikasyon, başlangıç kültürlerinde ve probiyotik bakterilerde faydalı mikropların sayısını artırır.

KAYNAKÇA

1. Al-Hilphy, A. R. S., Niamah, A. K., & Al-Timimi, A. B. (2012). Effect of ultrasonic treatment on buffalo milk homogenization and numbers of bacteria. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 7(2), 185–189.
2. Al-Hilphy, A. R. S., Verma, D. K., & Kareem, A. (2016). Principles of Ultrasonic Technology for Treatment of Milk and Milk Products. Niamah, Sudhanshi Billoria, and Prem Prakash Srivastav. In *Food Process Engineering* (pp. 211-236). Apple Academic Press.
3. Ashok, K., M., Bhaskaracharya, R., Kentish, S., Lee, J., Palmer, M., & Zisu, B. (2010). The ultrasonic processing of dairy products, an overview. *Dairy Science & Technology*, 90(2–3), 147–168.
4. Bermudez-Aguirre, D., Mawson, R., & Barbosa-Canovas, G. V. (2008). Microstructure of fat globules in whole milk after thermosonication treatment. *Journal of Food Science*, 73(7), 325–332.
5. Chemat, F., Huma, Z., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835.
6. Cucheval, A., & Chow, R. C. Y. (2008). A study on the emulsification of oil by power ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(5), 916–920.
7. Dhankhar, P. (2014). Homogenization Fundamentals a review. *IOSR Journal of Engineering*. 4(5), 1–8.
8. Elmehdi, H. M., Page, J. H., & Scanlon, M. G. (2003). Using ultrasound to investigate the cellular structure of bread crumb. *Journal of Cereal Science*, 38, 33–42.
9. İzli, G., & Yildiz, G. (2021). Evaluation of the high intensity ultrasound pre-treatment effects on the physical properties and bioactive compounds of convective dried quince samples, *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 645-656.
10. Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Herceg, Z., & Herceg, I. L. (2008). Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions. *Journal of Food Engineering*, 86, 281–287.
11. Jiang, S., Yildiz, G., Ding, J., Andrade, J., Rababah, T.M., Almajwalc, A., Abulmeatyc, M.M., & Feng, H. (2019). Pea Protein Nanoemulsion and Nanocomplex as Carriers for Protection of Cholecalciferol (vitamin D3). *Food and Bioprocess Technology*, 12 (6), 1031-1040.
12. Jiménez, A., Crespo, A., Piedehierro, J., Montaña, R. M., Patricia, G. M., Paniagua, J. M., José, R. M., & Antolín, A. (2010). Preliminary study to assess ultrasonic characteristics of Tortadel Casar – Type cheese. *Procee-*

- dings of the 20th International Congress on Acoustics, ICA. pp. 1–8.
13. Knorr, D., Zenker, M., Heinz, V., & Lee, D. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 261–266.
 14. Lee, H., Yildiz, G., Dos Santos, L.C., Jiang, S., Andrade, J., Engeseth, N.C., & Feng, H. (2016). Soy protein nano-aggregates with improved functional properties prepared by sequential pH treatment and ultrasonication. *Food Hydrocolloids*, 55, 200–209.
 15. Leighton, T. G. (1994). *The Acoustic Bubble*, Academic Press, San Diego.
 16. Orlandini, I., & Annibaldi, S. (1983). New techniques in evaluation of the structure of Parmesan cheese. *Ultrasonication and X-Rays Science Latio-Casaria*, 34, 20–30.
 17. Shanmugam, A., Chandrapala, J., & Ashokkumar, M. (2012). The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 251–258.
 18. Sfakianakis, P., & Tzia, C. (2014). Conventional and innovative processing of milk for yogurt manufacture; development of texture and flavor: A Review. *Foods*, 3 (1), 176–193.
 19. Sfakianakis, P., Topakas, E., & Tzia, C. (2015). Comparative study on high-intensity ultrasound and pressure milk homogenization: effect on the kinetics of yogurt fermentation process. *Food and Bioprocess Technology*, 8(3), 548–557.
 20. Shimada, T., Ohdaira, E., & Masuzawa, N. (2004). Effect of ultrasonic frequency on lactic acid fermentation promotion by ultrasonic irradiation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43, 2831–2832.
 21. Tabatabaei, F., & Mortazavi, S. A. (2010). Effects of Ultrasound Treatment on Viability and Autolysis of Starter Bacteria in Hard Cheese. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 8(3), 301–304.
 22. Thompson, L. H., & Doraiswamy, L. K. (1999). Sonochemistry science and engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(4), 1215–1249.
 23. Villamiel, M.; Hamersveld, E. H., & de Jong, P. (1999). Effect of Ultrasound Processing on the Quality of Dairy Products. *Milchwissenschaft*, 54, 69–73.
 24. Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). *Dairy Science and Technology*. 2nd Ed. Boca Raton, FL, CRC, Taylor and Francis.
 25. Wu, H., Hulbert, G. J., & Mount, J. R. (2000). Effects of ultrasound on

- milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 1(3), 211–218.
26. Yanjun, S., Jianhang, C., Shuwen, Z., Hongjuan, L., Jing, L., Lu, L., Ulu-ko, H., Yanling, S., Wenming, C., Wupeng, G., & Jiaping, L. (2014). Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate. *Journal of Food Engineering*, 124, 11–18.
 27. Yildiz, G., Rababah, T., & Feng, H. (2016). Ultrasound-Assisted Cutting of Cheddar, Mozzarella and Swiss Cheeses – Effects on Quality Attributes during Storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 1-9.
 28. Yildiz, G., Andrade, J., Engeseth, N.C., & Feng, H. (2017). Functionalizing soy protein nano-aggregates with pH-shifting and mano-thermo-sonication. *Journal of Colloid and Interface Science*, 505, 836-846.
 29. Yildiz, G. (2018). Physicochemical properties of soy protein concentrate treated with ultrasound at various amplitudes. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(4), 133-139.
 30. Yildiz, G., Ding, J., Andrade, J., Engeseth, N.J., & Feng, H. (2018). Effect of plant protein-polysaccharide complexes produced by mano-thermo-sonication and pH-shifting on the structure and stability of oil-in-water emulsions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47, 317-325.
 31. Yildiz, G. (2019). Application of ultrasound and high pressure homogenization against high temperature-short time in peach juice. *Journal of Food Process Engineering*, 42 (3), e12997.
 32. Yildiz, G., & Izli, G. (2019). Influence of microwave and microwave-convective drying on the drying kinetics and quality characteristics of pomelo. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43 (6), e13812.
 33. Yildiz, G, Palma, S., & Feng, H. (2019). Ultrasonic cutting as a new method to produce fresh-cut red delicious and golden delicious apples, *Journal of Food Science*, 84 (12), 3391-3398.
 34. Yildiz, G., & Feng, H. (2019). Sonication of Cherry Juice: Comparison of Different Sonication Times on Color, Antioxidant Activity, Total Phenolic and Ascorbic Acid Content, *Latin American Applied Research Journal*, 49 (4), 255-260.
 35. Yildiz, G., & Izli, G. (2019). The effect of ultrasound pretreatment on quality attributes of freeze-dried quince slices: Physical properties and bio-active compounds. *Journal of Food Process Engineering*, 42 (5), e13223.

36. Yildiz, G., Izli, G., & Aadil, R.M. (2020). Comparison of chemical, physical, and ultrasound treatments on the shelf life of fresh-cut quince fruit (*Cydonia oblonga* Mill.), *Journal of Food Processing and Preservation*, 44 (3), e14366.
37. Yildiz, G., & Aadil, R.M. (2020). Comparison of high temperature-short time and sonication on selected parameters of strawberry juice during room temperature storage, *Journal of Food Science and Technology*, 57 (4), 1462-1468.
38. Yıldız, G., İzli, G., Çavuş, M., & Ceylan, M.M. (2021). Ultrason Ön İşleminin Kurutulmuş İğdır Kayısısının Kalite Özellikleri Üzerine Etkisi, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 303-313.
39. Yildiz, G. (2021). The Effect of High Intensity Ultrasound Pre-treatment on the Functional Properties of Microwave-dried Pears (*Pyrus communis*), *Latin American Applied Research Journal*, 51(2), 133-137.
40. Zheng, L., & Sun, D. W. (2005). Ultrasonic Acceleration of Food Freezing. In: *Emerging Technologies for Food Processing* by Sun, D. W. (Ed.). London, UK, Academic Press, Elsevier, pp. 603–626.
41. Zisu, B., Bhaskaracharya, R., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2010). Ultrasonic processing of dairy systems in large scale reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, 1075–1081.
42. Zisu, B., Schleyer, M., & Chandrapala, J. (2013). Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *International Dairy Journal*, 31, 41–43.

Bölüm 6

Kuvvet Sensörlerinde Kullanılan Elektriksel Ölçme Yöntemleri

Bülent AYDEMİR¹

¹ TÜBİTAK UME Ulusal Metroloji Enstitüsü Kuvvet Laboratuvarı

1. Giriş

Endüstride yaşanan rekabet nedeniyle daha kaliteli ve güvenilir ürünleri tüketiciye sunmak isteyen üreticiler, malzeme ve ürünlerine çeşitli testlerden geçirirler. Malzeme testleri, endüstriyel ürünlerde kullanılan malzemelerin uygunluklarının belirlenmesi amacı ile yapılır. Malzeme testleriyle özellikleri belirlenen malzemeleri kullanmak, dizayn aşamasından ürün aşamasına kadar olan tüm proste, ekonomik ve daha güvenilir ürünlerin geliştirilmesini ve imalatını sağlar. Bu testlerde kullanılan düzenekler ve makineler, kuvvetin uygulanması ve ölçülmesi prensibiyle çalışırlar.

Bilim ve teknolojiadaki gelişmelere bağlı olarak fiziksel büyüklükleri ölçme yöntemleri ve ölçme cihazları da gelişmektedir. Uçak, inşaat, makine, gemi, savunma, otomotiv, medikal gibi daha birçok sektör için önem arz eden fiziksel büyüklüklerden birisi de kuvvettir.

Kuvvet; cisimlerin hareket etme durumlarını, şekillerini ve basınçlarını değiştirebilen etki olarak tanımlanabilir. Tasarımların imalat aşaması, kalite kontrolü ve ürün testleri olmak üzere mühendislik çalışmalarının birçoğunda kuvvet uygulamaları yapılmaktadır. Bu durum da uygulanan kuvvetin büyüklüğünün doğru ölçülebilmesini önemli kılmaktadır. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan yöntemler şöyledir:

A. Bilinen Yük İle Dengeleme

Ölçülecek kuvvet belirli kütlelere sahip bir karşı ağırlık tarafından dengelenir ve

$$\text{Kuvvet} = \text{Karşı Ağırlığın Kütlesi} \times \text{Yerçekimi İvmesi}$$

olarak hesaplanır. Pratik zorluğuna karşın, bu metot yüksek doğruluk verir. Kuvvet (yük) ölçümü kütlelerin uygulanması ile sağlanır ve ölü ağırlıklı sistemler olarak adlandırılırlar.

B. Esnek Gövde Üzerinde Kuvvet ile Oluşturulan Deformasyondan Yararlanma

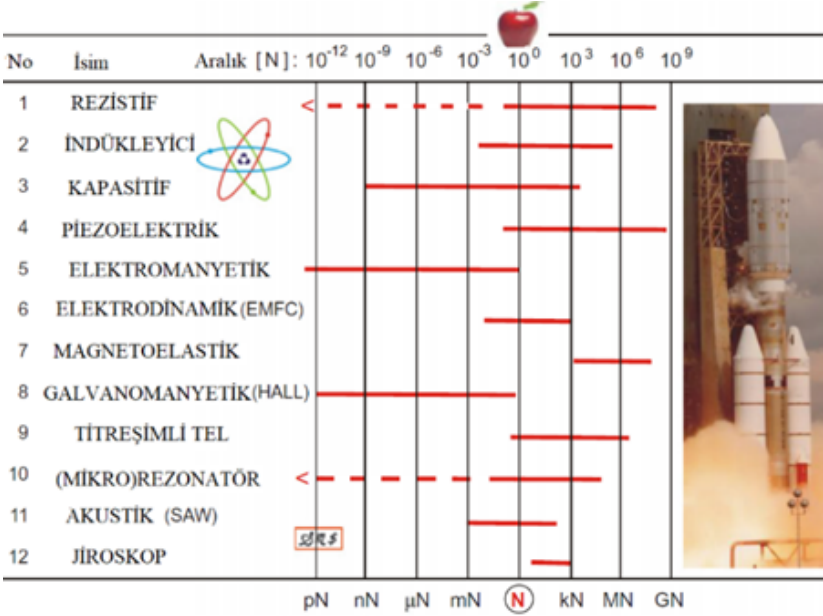
Bu metot bağıl olarak doğruluk verir ve hemen hemen bütün kuvvet dönüştürücülerinde kullanılır. Özellikle yüksek doğruluk elde edilmek istendiğinde, iyi kalitede esnek bir gövde seçilmek zorunludur. Çeşitli durumlar için uygun ölçme metotlarının seçilmesiyle, istenen deformasyon miktarları ölçülebilir.

C. Uygulanan Kuvvet Etkisiyle Fiziksel Özelliklerin Değişiminden Yararlanma

Bu metot uygulanan kuvvete karşılık malzemelerin manyetik veya elektriksel özelliklerinin değişiminden yararlanır. Fiziksel özelliklerdeki lineer olmayan değişimlerden dolayı, yaygın bir uygulama alanı yoktur. Fakat bilimsel yönden ilgi çekicidir ve bu özelliklerin uygulandığı bazı ölçme alanları mevcuttur.

Bu yöntemler ile çalışan birçok cihaz üretilmiştir. Kuvvet ölçümlerinde kullanılan cihazlar ise şöyle sıralanabilir:

- A. Mekanik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 1) Martens Aynalı Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 2) Ölçme Halkaları
 - 3) Hidrolik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 4) Titreşim Telli Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 5) Rezonatör Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 6) Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları
- B. Elektriksel Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 1) Direnç Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 2) Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 3) Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 4) Elektromanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 5) Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 6) Ultrasonik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 7) Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 8) İnduktif Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 9) Elektrodinamik Kuvvet Ölçme Cihazları
 - 10) Galvanomanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları



Şekil 1. Kuvvet dönüştürücülerinin ölçüm prensiplerine göre ölçüm aralıklarının gösterimi

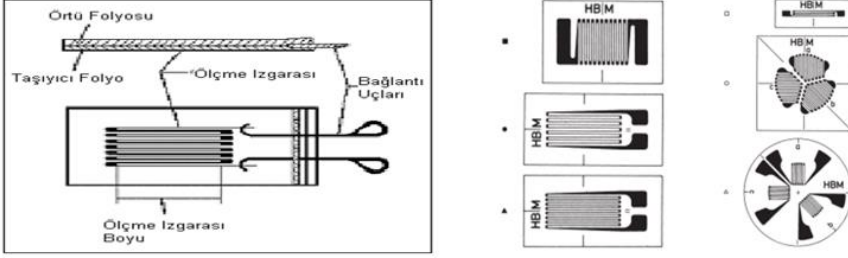
Birçok çeşidi bulunan kuvvet ölçme cihazları, kullanım alanlarına ve ölçüm kabiliyetlerinin uygunluklarına göre seçilip kullanılmaktadır [1-22]. Ölçüm kapasitelerine karşılık ölçüm prensipleri Şekil 1'de verilmiştir. Sıralanan elektriksel kuvvet ölçme cihazlarının detayları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

2. Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları

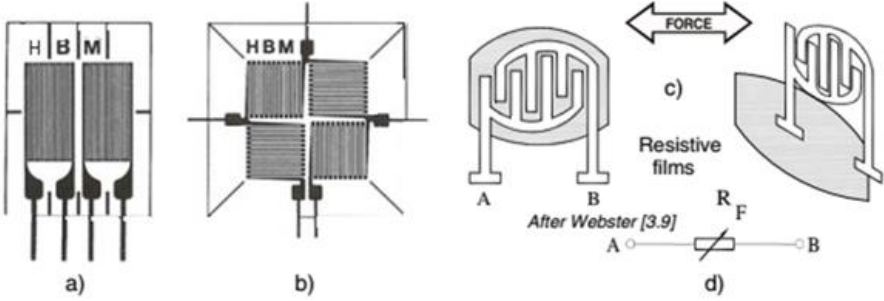
Elektrik dirençli uzama ölçerlerin çalışma prensibi, 1856 yılında Lord Kelvin tarafından ifade edilen elektriksel olarak iletken olan malzemelere gerilme uygulandığında oluşan birim şekil değişimi ile orantılı olarak elektrik direnç değerleri değişmesi prensibine dayanmaktadır. Uzama yönünde birim şekil değişimleri elektrik direnç değerinde artışa, kısalma yönünde birim şekil değişimleri ise elektrik direnç değerinde azalmaya yol açmaktadır.

Mekanik gerilmelerin elektriksel büyüklüğe dönüştürülmesinde kullanılan elektrik dirençli uzama ölçerler amaca göre çok değişik şekil ve özellikte üretilmektedir. Dirençli uzama ölçerlerin yapısı Şekil 2 ve 3'de görüldüğü gibi; uzama teli, taşıyıcı ve örtü folyoları ve lehim uçları olmak üzere üç kısımdır. Birinci kısımda, ölçmede yararlanılan malzeme ile birlikte şekil değiştirerek ΔR direnç farkını oluşturan uzama teli, iki izole folyo arasında yer almaktadır. Uzama telinin çapı genellikle $18 - 25 \times 10^{-3}$ mm arasındadır. Bir kısım uzama telleri ise

3 - 5 x 10⁻³ mm kalınlığında direnç malzemesinden kesilmiş madeni folyodan yapılmaktadır[8-16].



Şekil 2. Bir dirençli uzama (gerinim) ölçer elemanın yapısı ve farklı tipleri



Şekil 3. Dirençli uzama ölçerler: çiftli (a) ve dörtlü (b); uygulanan kuvvete bağlı olarak modern kuvvet algılama dirençleri (c) ve direnç değerinin bir sembolü (d)

En yaygın tel malzemeleri konstantan (Cu-Ni) veya isoelastik (Fe - Ni) alaşımlarıdır. Bu malzemelerin sıcaklıkla boyut değişimleri çok sınırlı olduğundan dirençleri de çok az değişmekte olup özgül dirençleri yüksek ve uzayabilme yetenekleri fazladır. İkinci kısım, değişik şekillere sahip olabilen, uzama telini içine alan, elektriksel yönden izole, örtü ve taşıyıcı folyodan oluşmaktadır. Üçüncü kısım, uzama telinin dış devrelere bağlanmasını sağlayan, daha kalın lehim uçlarından oluşmuştur; bunlar folyo içindeki uzama teline lehim edilmişlerdir.

2.1. Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki

Direnç değişimi ile birim şekil değişimi arasındaki ilişkiyi, üzerinden akım geçen bir telin uygulanan gerilme sonucunda uzatılması durumu ele alınarak incelendiğinde, aşağıdaki analize ulaşılır.

Bu analizde kullanılan fiziksel büyüklükler aşağıda sıralanmıştır.

$$R = \rho \cdot L/A \quad (1)$$

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (2)$$

Burada, R: Telin direnci, ρ : Tel malzemesinin özgül direnci, L: Telin uzunluğu, r: Telin yarıçapı, A: Telin kesit alanı olarak ifade edilir. .

(1) ve (2) denklemleri kullanılarak matematiksel olarak yapılan çeşitli çözümler ile temel eşitlik, (3) bağıntısı haline dönüşür.

$$\Delta R/R = k \cdot \Delta L/L \quad (3)$$

Bir dirençli uzama ölçerin duyarlılığı, dirençteki birim değişikliğin uzunluktaki birim değişikliğe oranı olan k harfi ile gösterilen “k-faktörü” veya “ölçer faktörü (GF)” olarak tanımlanır. Denklem (4)’de ölçer faktörün denklemi verilmiştir.

$$GF = k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L} \quad (4)$$

Burada, ν poisson oranı, ρ öz direnç, $\Delta L/L$ ise ϵ birim uzama veya gerinimdir.

Tüm elektriksel iletken malzemeler, dirençte uzunlukla birlikte bir değişim gösterir, ancak çoğu durumda ölçer faktörü, kullanışlı olamayacak kadar küçüktür. Normal olarak dirençli uzama ölçerler için kullanılan metal teller için 2,0 ila 5,0 arasındaki ölçer faktörleri yaygındır. Çok daha yüksek değerler gerçekleştirilebilir, ancak yüksek ölçer faktörleri genellikle doğruluk kaybına neden olur.

Ölçer faktörünün daha da yüksek değerleri, 50'den 200'e kadar (ancak yine daha yüksek sıcaklık katsayılarıyla), silikon yarı iletken gerinim ölçerlerle gerçekleştirilebilir. Yarı iletken dirençli uzama ölçerlerin bir başka özelliği ise kontrollü işleme yoluyla, artan uzunlukla birlikte pozitif (artan direnç) veya negatif (azalan direnç) direnç özellikleri verilebilmesidir.[3]

2.2. Wheatstone köprüsünün temel prensibi ve kuvvetin okunması

Wheatstone köprüsü direnç değişimi ölçümünün bilinen en iyi yöntemidir. Köprü elemanı olarak kullanılan dirençli uzama ölçerlerin ölçüm yapılacak yerlere uygun şekilde yapıştırılmalarıyla, fiziksel boyutlarda meydana gelen mikron seviyesindeki değişimleri elektriksel direnç değişimine dönüştürmek ve

bu değişimi bir göstergeden okumak yapılan işlemleri tarif etmektedir. Direnç değişimi ile boyutsal değişim arasındaki ifade (3) bağıntısında gösterilmekte olup bu ifadeyi yeniden (5)'deki gibi yazma olanağı vardır.

$$\Delta R/R = k. \Delta L/L = k. \varepsilon \quad (5)$$

$\Delta L/L$ oranı ε ile ifade edilir ve dirençli uzama ölçerinin birim şekil değişimi olarak adlandırılır. Malzemeye uygulanan gerilme, dirençli uzama ölçer tarafından direnç değişimine dönüştürülürken, önceden her dirençli uzama ölçer için deneysel olarak bulunmuş olan k faktörü dikkate alınır. Dirençli uzama ölçerinin saptanan direnç değişiminin k 'ya bölünmesi ile malzemedeki birim uzama bulunur. Ölçüm yapılan malzemenin E elastiklik modülünün bilinmesi halinde malzemedeki tek eksenli gerilme hali için geçerli olan Hooke bağıntısı yardımıyla, gerilme;

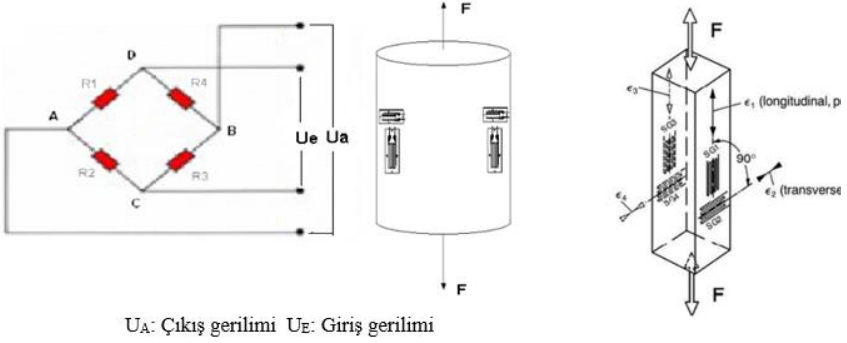
$$\sigma = E. \varepsilon \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanabileceği gibi aynı eşitlik yardımıyla

$$\sigma = E. (1/k). (\Delta R/R) \quad (7)$$

şeklinde de hesaplanabilir.

Şekil 4'de şematik olarak verilen ve dört kolu bulunan bir Wheatstone köprüsü R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dirençli uzama ölçer elemanlarından oluşmaktadır. Bu tip dönüştürücü imalatı yapan her firma, giriş ve çıkış uçlarını farklı renklerle kodlayarak kullanma kolaylığını hedeflemişlerdir. Böylece, hazır alınan bir köprü devresinin giriş ve çıkış uçları kolayca saptanabilmektedir. Şekil 4'de dirençli uzama ölçer elemanları ile oluşturulan bir köprü ve kolon tipi bir kuvvet dönüştürücü üzerindeki yerleri gösterilmektedir.



U_A: Çıkış gerilimi U_E: Giriş gerilimi
 Şekil 4. Çekme çubuğu üzerine yapıştırılmış dirençli uzama ölçerlerden oluşmuş Wheatstone köprü devresi

Uygulamalarda girişe uygulanan gerilim giriş gerilimi veya besleme gerilimi olarak bilinmekte olup genellikle 5 ile 15 V arasında belirlenir. Dönüştürücü sınıfı dirençli uzama ölçerler için bu değer genelde 5 V olarak seçilmektedir. Daha yüksek bir besleme gerilimi ızgaranın aşırı ısınmasına neden olur. Düşük besleme geriliminde de ısı oluşmaktadır ancak bu dirençli uzama ölçerlerin yapıştırıldığı malzeme yüzeyine kolayca iletilerek denge sağlanmaktadır. Dolayısıyla, bu ısının çok düşük değerlerde kalması gereklidir. Aksi durumda, kuvvet dönüştürücüde sıcaklık kompozisyonunda bazı kayıplar meydana gelir ve histerisiz ile sürünme değerleri artar.

Çıkış geriliminin değeri, giriş gerilimine ve R_1/R_2 , R_3/R_4 dirençlerinin oranlarına bağlıdır. Genel olarak,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \quad (8)$$

bağıntısı geçerli olup özel bir durum olarak $R_1=R_2=R_3=R_4$ veya $R_1/R_2 = R_3/R_4$ koşulu varsa $U_A/U_E = 0$ olmaktadır. Bu denklemde U_A : çıkış gerilimi, U_E : ise besleme gerilimidir. Uygulamada sağladığı yarar açısından U_A/U_E oranı başlangıçta sürekli olarak sıfır yapılmaya çalışılmaktadır.

R_1 , R_2 , R_3 , R_4 dirençlerinden bir veya birkaçının değerinin değişmesi, U_A çıkış geriliminin de değişmesi ile sonuçlanır. Ara işlemler ve bazı değerlerin çok küçük olması nedeniyle ihmaller yapıldığında (8) denklemi (9) şeklinde yazmak olasıdır.

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (9)$$

elde edilir. Bu son eşitlikte (5) bağıntısında gösterilen ifade yerine koyulursa,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (10)$$

ifadesine ulaşılır.

Kuvvet dönüştürücü tasarım ve üretiminde genellikle bu eşitlik kullanılarak tam yük uygulandığında elde edilen çıkış gerilimi olan ve hassasiyet (sensitivity) olarak adlandırılan 2 mV/V'luk (5 V'luk besleme gerilimi için 10 mV'luk bir çıkış gerilimi) değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır.

Ölçümlerde dirençli uzama ölçer eksenlerinin yük eksenini ile çakışması gerekir. Aksi durumda dirençli uzama ölçer, yükün yalnızca kendi eksenini üzerindeki izdüşümünü ölçebilmektedir. Dirençli uzama ölçerlerin ölçme eksenine tam paralel ve tam dik olacak şekilde yapılandırılmamaları durumunda ölçme yapacak dirençli uzama ölçer eksenleri ile ölçme eksenini arasında kalan açıdan dolayı uygulanan kuvvete ek bileşke kuvvetler ortaya çıkacak ve bu da hataya neden olacaktır. Buradan gelebilecek hatayı en aza indirmek için kolon türü kuvvet dönüştürücülerde dirençli uzama ölçerlerin 90° açığa sahip olanlarının kullanılması gerekmektedir. Bunu sağlayacak birbirine göre 90° açığa sahip dirençli uzama ölçerler seçilmiş olup bunların kolon türü bir yay elemanı üzerinde yerleşim düzenleri Şekil 4'de gösterilmektedir.

Köprü kollarında bulunan dirençlerden bir veya birkaçının direncinin değişmesi sonucu (10) numaralı eşitlik uyarınca, köprü çıkışında girişe göre bir farklılık oluşmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen U_A/U_E değeri, uzamanın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, her zaman kullanılan ölçme cihazlarının ölçüm aralıkları uzamayı esas alan bir yöntemle kalibre edilmektedir. Genel olarak cihazlarda uzama birimi olarak $1 \mu\text{m}/\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{m}$ kullanılmaktadır. Bazı özel ölçü aletlerinde göstergede okunan ε değeri, o andaki gerçek değer $\Delta L/L$ 'yi göstermektedir. Bu tip cihazlar dirençli uzama ölçerinin k faktörü dikkate alınarak kalibre edilmişlerdir. Çok yüksek doğruluklu ölçümler yapılması amacı ile geliştirilmiş cihazlarda ise doğrudan mV/V cinsinden gösterge değeri elde edilebilmektedir.

Çekme gerilmesi uygulanan ve Şekil 4'da gösterilen çubukta gerilme yönündeki birim uzama $\varepsilon_1 = \sigma / E$ gerilme yönüne dik yöndeki birim uzama ise $\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1$ şeklinde tanımlanmaktadır. O halde 1 no'lu dirençli uzama ölçerinin direnç değişimi $\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ ve 2 no'lu dirençli uzama ölçerinin direnç değişimi

$\Delta R_2 = \nu \cdot \varepsilon_2 \cdot k \cdot R_2$ kadar olacaktır. Aynı eşitlikler 3 ve 4 no'lu dirençli uzama ölçerler için de yazılabilir. Burada ν , Poisson oranıdır.

Şekil 4'de gösterilen dört dirençli uzama ölçer aynı şekildeki çekme çubuğu üzerindeki gibi indislenir ve bir tam köprü yapacak şekilde bağlanırsa, ölçme sonunda, 10 no'lu bağıntıya uygun olarak;

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \nu \varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \nu \varepsilon_3) \quad (11)$$

eşitliği yazılabilir. Çelik malzeme için yaklaşık $\nu = 0.30$ olması ve $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$, ve $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 0.3 \cdot \varepsilon_1$ kabul edilmesi durumunda,

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 2,6 \cdot \varepsilon_1 \quad (12)$$

elde edilir. Dört aktif dirençli uzama ölçer tarafından oluşturulan köprü devresinden alınacak sinyal ε_1 uzamasının 2,6 katıdır. Çubukta basma gerilmesi olursa ε_1 den ε_4 'e kadar olan birim uzamaların yalnızca işareti değişecektir.

2.3. Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları Tipleri ve Kullanım Alanları

Direnç uzama ölçer prensipli kuvvet dönüştürücüler kendi içinde kullanılan direnç sistemine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler:

1. Potansiyometre (Reosta)
2. Ön gerinimli dirençli teller
3. Dirençli uzama ölçerler
4. Yarı iletken uzama ölçerler (Piezodirençli)
5. Kuvvet algılamalı dirençler (FSR'ler Force Sensing Resistance)
6. Kuvvet Algılamalı Dirençli Ağlar

Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları farklı tipleriyle oldukça geniş bir kapasite aralığında kullanılabilirler (10^{-12} N - 10^8 N). Bu özellikleri sayesinde pek çok kuvvet ölçümünde özellikle otomasyon sistemlerinde ve yüksek doğruluk istenen uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

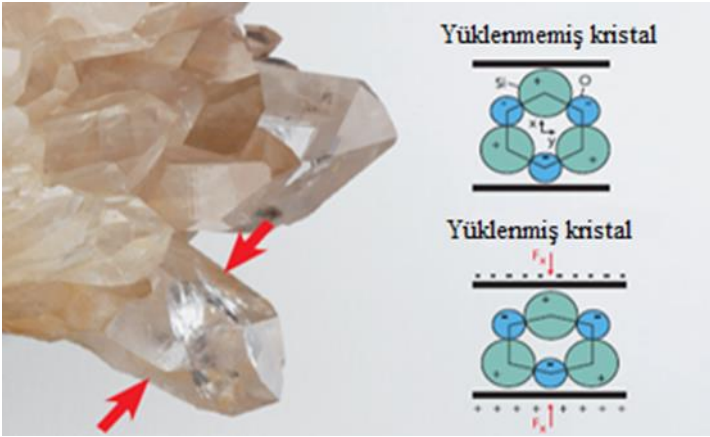
3. Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, piezoelektrik etki ile oluşan elektriksel yüklenmeden sinyal oluşturarak kuvvet ölçümünü sağlayan sistemlerdir. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, piezoelektrik kuvvet sensörü ve yükleme

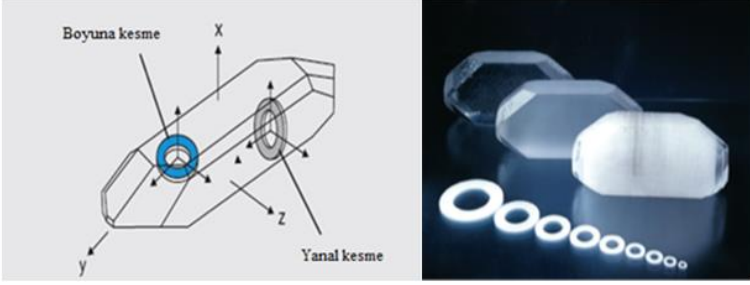
sinyalini bir voltaj sinyaline dönüştüren yüklem amplifikatörü olmak üzere iki ana bileşenden oluşur.

Piezoelektrik etki, piezoelektrik malzemelere (kuvars gibi) tesir eden kuvvet neticesinde pozitif veya negatif elektrik yüklerinin meydana gelmesidir (Şekil 3.12). Bazı seramikler piezoelektrik etki gösterse de kullanılan ana malzeme kuvarstır. Bu malzemeden kesilmiş bir diske kuvvet uygulanır ve deforme olursa uç düzlemler arasında bir gerilim oluşur. Kuvars kristali, doğal olarak piezoelektriksel yapıya sahiptir ve uygulanan kuvvete tepki olarak doğrudan elektriksel yük üretir.

Piezoelektrik kuvvet sistemlerinin çoğu, ince kristal disklerden oluşan bir ölçüm sensörü ile çalışır. Sensörlerde ölçülmesi istenen kuvvete bağlı olarak kristal disklerin kesme açıları değişir. Boyuna kesmeyle üretilen kristal diskler, basma kuvvetlerini ölçen sensörlerde kullanılır. Yanal kesmeyle üretilen kristal diskler ise kesme kuvvetlerini ölçen sensörlerde kullanılır (Şekil 5,6).

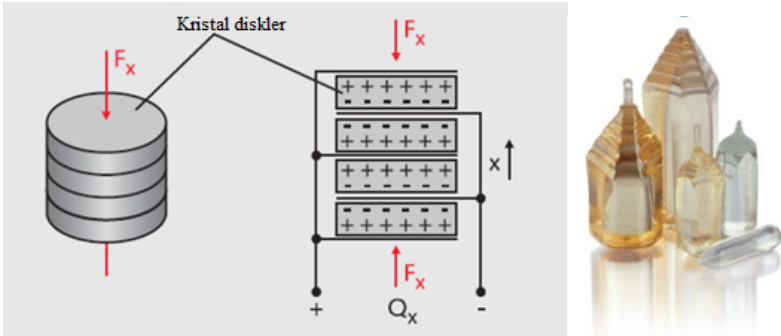


Şekil 5. Kristal üzerindeki mekanik yük nedeniyle elektrik üretimi



Şekil 6. Ölçüm elemanı olarak kristal diskler, kristalde olası kesme açıları

Tek kristal disk tarafından üretilen elektrik yükü yalnızca piezoelektrik malzemeye bağlı olup geometrik boyutlarına bağlı değildir. Daha yüksek hassasiyete sahip sensörler üretmek için belli sayıda kristal disk birbiri üzerine konumlandırılabilir. Paralel biçimde elektriksel olarak bağlanabilir veya alternatif olarak daha yüksek hassasiyetli piezoelektrik malzemeler de kullanılabilir (örneğin, piezostar kristalleri) (Şekil 7).



Şekil 7. Yükleme verimini artırma için üst üste konum ve piezostar kristalleri

Piezostar kristaller kuvarstan daha yüksek hassasiyet ve daha iyi sıcaklık kararlılığı sunan özel kristallerdir. Ancak piezostar kristalleri, genel olarak çok küçük kuvvetleri ölçmesi istenen sensörlerde kullanılır. Kuvars bazlı kuvvet sensörleri ise daha büyük kuvvetleri ölçmek için uygundur. Bununla birlikte kuvars bazlı kuvvet sensörlerinin tercihinde hassasiyet, sıcaklık kararlılığı ve ölçülebilecek kuvvet kapasitesi de önemli rol oynamaktadır.

Tek sensör üzerinden okunabilecek kuvvet bileşeni ve/veya moment sayısına göre farklı piezoelektrik kuvvet sensörleri bulunmaktadır.

a.) Bir Bileşenli Sensörler

Bir bileşenli sensörler, bir kuvvet bileşenini ölçer yapıya sahiptir. İki farklı tipi vardır (Şekil 8):

- Basma ve/veya çekme kuvvetleri için kuvvet sensörleri ($\pm F_z$)
- Kesme kuvvetleri için kuvvet sensörleri ($\pm F_y$)

b.) İki Bileşenli Sensörler

İki bileşenli sensörler, basma ile çekme kuvvetlerini ($\pm F_z$) ve aynı zamanda karşılık gelen pozitif ve negatif momentleri ($\pm M_z$) ölçebilmektedir (Şekil 9).

c.) Üç Bileşenli Sensörler

Üç bileşenli sensörler, birbirine dik üç kuvvetin tümünü (F_x , F_y ve F_z) aynı anda ölçebilmektedir. Bu sensörler, her iki kayma yönündeki ($\pm F_x$ ve $\pm F_y$) pozitif ve negatif kayma kuvvetlerinin yanı sıra basma ve çekme kuvvetlerini ($\pm F_z$) de algılayabilmektedir (Şekil 10).

d.) Dinamometreler (Üç Bileşenli)

Dinamometreler, temel olarak bir taban plakası ile kapak plakası arasına monte edilmiş dört tane üç bileşenli sensörden oluşur. Bu nedenle dinamometre birbirine dik üç kuvveti (F_x , F_y ve F_z) ölçebilmektedir. Üç bileşenli sensörler tarafından ölçülen üç kuvvet bileşenine ve dört sensörün bilinen geometrik pozisyonuna göre momentler (M_x , M_y ve M_z) de hesaplanabilmektedir (Şekil 11).



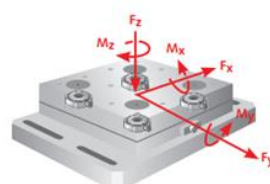
Şekil 8: Bir bileşenli sensör



Şekil 9: İki bileşenli sensör



Şekil 10: Üç bileşenli sensör



Şekil 11: Üç bileşenli dinamometre

3.1. Yükleme Amplifikatörleri (Gösterge Sistemleri)

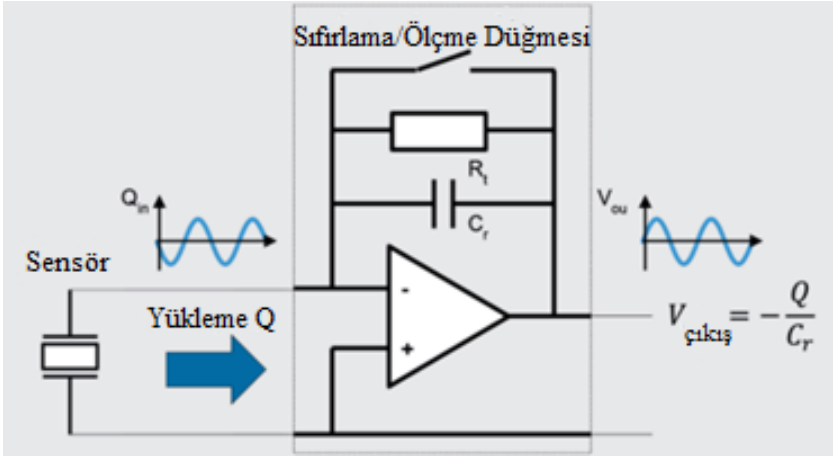
Kuvvet sensörleri, yük altında negatif bir yük oluşturur. Yükleme amplifikatörü, piezoelektrik sensörün kuvvet etkisi ile ürettiği negatif elektrik yüklerini uygulanan kuvvetle orantılı olan pozitif bir voltaja dönüştürür.

Yükleme amplifikatörü üç ana bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin prensip şeması verilmiştir (Şekil 12).

1) **Aralık kapasitörü (Cr)**, yükleme amplifikatörünün ölçüm aralığını ayarlamak için kullanılır. Bu işlem farklı aralık kapasitörleri arasında geçiş yapılarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla 100 N ve 100 kN aralığındaki kuvvetleri ölçmek için sadece ölçüm aralığını değiştirerek aynı kuvvet sensörünü kullanmak mümkündür.

2) **Zaman sabiti direnci Rt**, yükleme amplifikatörünün zaman sabitini tanımlar. Frekans aralığında zaman sabiti, yükleme amplifikatörünün sınır frekansını (cut-off frequency) belirler.

3) **Sıfırlama/Ölçme düğmesi**, ölçümün başlangıcını kontrol etmek veya sıfır noktasını ayarlamak için kullanılır. Çalışma prensibi nedeni ile piezoelektrik ölçüm teknolojisi, mutlak sıfır referanslı ölçümlere izin vermez.



Şekil 12: Bir yükleme amplifikatörünün devre şeması

Uygun bir yükleme amplifikatörü seçmek için en önemli 4 adet seçim kriteri şunlardır:

1.) Kanal sayısı

Kullanıcı kendi tercihi uygun kanal sayısını belirler.

2.) Ölçüm aralığı

Kullanıcı sensörüne ve kendi tercihi uygun ölçüm aralığını belirler.

3.) Ölçüm türü

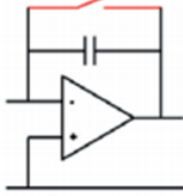
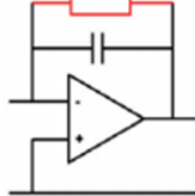
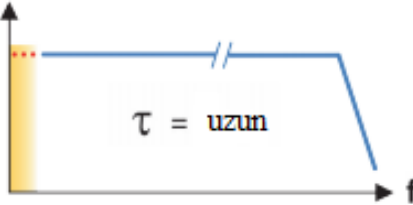
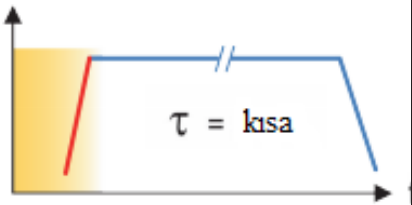
Ölçüm türü, yüklem amplifikatörünün düşük frekans aralığındaki davranışını belirler ve yüklem amplifikatörünün temel bir bileşeni olan zaman sabiti direnci veya zaman sabitinden etkilenir. Zaman sabiti, yüklem amplifikatörü için sınır frekansını ve böylece ölçüm türünü belirler.


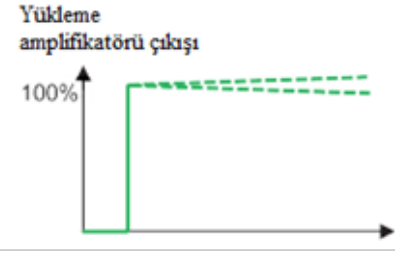

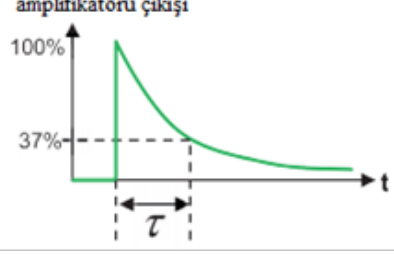
Piezoelektrik kuvvet ölçüm sensörleri iki farklı ölçüm türünde kullanılabilir. Bunlar:

- 1) Yarı-statik ölçüm
- 2) Dinamik ölçüm

Bu ölçümler arasındaki farklılıklara Tablo 1’de yer verilmiştir.

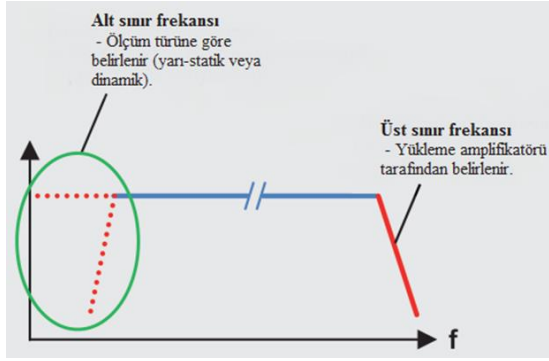
Tablo 1: Yarı-statik ve dinamik ölçüm yöntemleri arasındaki farklar

Yarı-statik Ölçüm	Dinamik Ölçüm
	
<ul style="list-style-type: none">• Zaman sabiti ‘Uzun’ (zaman sabiti direnci yok).• Davranış DC kapsamı ile karşılaştırılabilir.	<ul style="list-style-type: none">• Zaman sabiti ‘Kısa’ (zaman sabiti direnci var).• Davranış AC kapsamı ile karşılaştırılabilir.
<ul style="list-style-type: none">• Frekans aralığındaki davranış: 	<ul style="list-style-type: none">• Frekans aralığındaki davranış: 

<p>• Zaman aralığındaki davranışı:</p> <p>Sensör sinyali</p>  <p>Yükleme amplifikatörü çıkışı</p>  <p>→ Çalışma prensibinin neden olduğu sapma, daha uzun ölçüm sürelerinde görünür hale gelir.</p>	<p>• Zaman aralığındaki davranışı:</p> <p>Sensör sinyali</p>  <p>Yükleme amplifikatörü çıkışı</p>  <p>→ Zaman sabiti nedeniyle sapma olmaz.</p>
<p>• Ölçüme başlarken sıfır noktası belirlenir.</p> <p>• Ölçüme başlama</p> <p>Sıfırlama/Ölçme düğmesi ile kontrol edilir.</p>	<p>• Zaman sabiti nedeni ile sıfır noktası referans alınmadan ölçüm yapılır.</p> <p>• Sıfırlama/Ölçme sinyali gerekli olmayabilir veya yüklem amplifikatörü her zaman ölçüm modunda çalıştırılır.</p>

4.) Frekans aralığı

Bir yüklem amplifikatörünün frekans aralığı, alt ve üst sınır frekansları ile tanımlanır (Şekil 13). Alt sınır frekansı, ölçüm türü (yarı statik veya dinamik) ile tanımlanır. Üst sınır frekansı, sisteme bağlı nedenlerden dolayı tüm yüklem amplifikatörü tarafından belirlenir. Bu nedenle üst sınır frekansı yalnızca yüklem amplifikatörünün tasarımına bağlı olup ölçüm türüne bağlı değildir. Çoğu kuvvet uygulamasında doğal frekans 10 kHz aralığındadır. Bu nedenle yüklem amplifikatörü için 20 - 40 kHz aralığında bir üst sınır frekansı birçok uygulama için yeterlidir.



Şekil 13. Yükleme amplifikatörünün frekans aralığı

3.2. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının kullanım alanları

Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları, dinamik ölçüm çalışmalarında yüksek rijitlikleri ve sertlikleri sayesinde yük altında çok az deformasyona uğrar. Böylece dinamik uygulamalar için yaygın olarak tercih edilir. Farklı uygulama alanlarında hızlı üretim sistemlerine adapte edilen bu cihazların avantajları; hatalı üretimlerin tespiti, %100 üretim kontrolü, zaman, enerji ve işçilik tasarrufu sağlaması ve verimin artırılması şeklinde sıralanabilir.

Günümüzde direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları, statik uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan kuvvet ve yük ölçme sensörleri olup mekanik deformasyonun elektriksel çıktıya dönüştürülmesinden dolayı bu ismi almıştır. Yüksek doğruluğa sahip olmaları ve otomasyon sistemlerine uygunlukları açısından yaygın olarak statik uygulamalarda kullanılmaktadır. Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazlarının avantaj ve dezavantajlarının daha iyi bir biçimde ortaya koyulabilmesi için direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları ile karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir [1-5].

Tablo 2: Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının karşılaştırılması

Kriter	Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazları	Direnç Uzama Ölçerli Kuvvet Ölçme Cihazları
Statik ölçümler için daha doğru sonuçlar	-	+
Dinamik ölçümler için daha doğru sonuçlar	+	-
Geniş ölçüm aralığı	+	-
Statik ölçümlerde yüksek ön yükleme ile çok küçük kuvvet değişimlerinin ölçümü	+	-
Çok bileşenli kuvvet sensörleri için uygun sensör boyutları	+	-
Döngüsel yüklemelerde ömür	+	-
Aşırı yüklenebilme kabiliyeti	+	-
Yüksek sıcaklığa uygunluk	+	-
Sıcaklık değişimlerine uygunluk	-	+
Kablo kullanımı (temizlik, düşük ses)	-	+
Doğrusallık	-	+
Kalibrasyon aralığı	+	-

(+ işaretler avantajları – işaretler ise dezavantajları temsil etmektedir.)

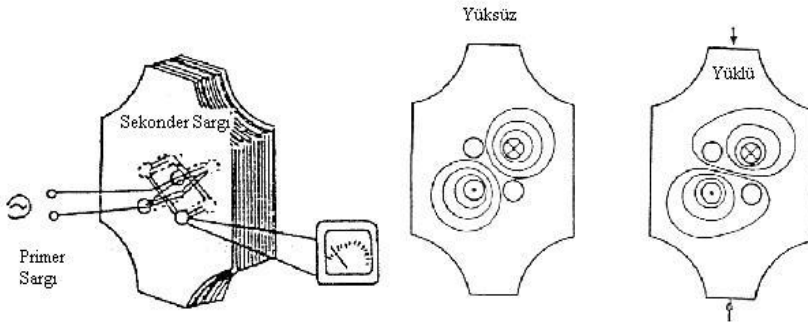
Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının sayısal veriler kullanılarak yapılmış bir karşılaştırılması da Tablo 3'te verilmiştir [9].

Tablo 3: Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları ve direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazlarının sayısal verileri ile karşılaştırılması

Teknoloji	Piezoelektrik kuvvet ölçme cihazları	Direnç uzama ölçerli kuvvet ölçme cihazları
Hassasiyet	80 pC/ μ e	0,003 mV/ μ e
Algılama hassasiyeti	0,00001 μ e	0,01 μ e
Ölçüm aralığı	1000000000	1000000
Hacim	< %5	% 100
Doğrusallık	% 1	% 0,05
Kablo sayısı	2 tel	min. 4 tel

4. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazları

Bu tip kuvvet ölçme cihazları, uygulanan kuvvetle manyetik özelliklerinin değişmesinden faydalanarak ölçüm yaparlar. Temel olarak iki özelliklerinden faydalanılır. Bunlardan ilki manyetik anizotropi, diğeri ise manyetik geçirgenlikteki değişimdir. Kuvvet ölçüm cihazlarında daha çok manyetik geçirgenlik özelliği kullanılıp, silisyumlu çelik yapraklar üstüste konularak elastik cismin şekli oluşturulur. Yeni primer ve sekonder sargılar birbirleri ile dik açı oluşturacak şekilde plakalara monte edilir. Şekil 14’de görüldüğü gibi, elastik cisme kuvvet uygulanması manyetik geçirgenliğin yönlü karakteristiğini değiştirir ve sekonder sargıda çıkış voltajı oluşturur. Yumuşak çelik ve ferroalüminyum gibi magnetoelastik malzemeler, manyetik geçirgenliğin değişimini belirleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Bu tip yük hücreleri, yüksek AC voltajı verdiklerinden yüksek bir kullanılabilirliğe sahiptirler.



Şekil 14. Magnetoelastik Kuvvet Ölçme Cihazı

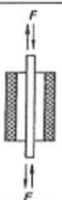


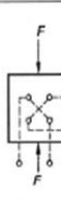


Manyetik ve mekanik davranışlar birbirine bağlantılıdır. Manyeto elastik dönüştürücüler, uygulanan gerilim nedeniyle manyetik bir malzemede uyarılan manyetik akının değişmesine dayanan Joule etkisi prensibine göre çalışır. Manyeto elastisitenin etkisi, genellikle gerilme nedeniyle malzemenin manyetik geçirgenliğindeki bir değişiklik olarak tanımlanır.

Ferromanyetik malzemelerin manyeto elastikliği, mıknatıslanma sırasında şekil ve hacim değişikliklerinde kendini gösterir ve manyetik bir gövdenin elastomekanik gerilmesinin, manyetizasyon eğrilerinin tersine çevrilebilir değişikliklere yol açar. Başka bir deyişle, bir kuvvet dönüştürücünün manyeto elastik elemanına uygulanan yükleme, manyetik devresinin özelliklerini değiştirmektedir.

4.1. Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücülerin Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları

Manyeto elastik dönüştürücülerde, dış kuvvetlerin neden olduğu uzunluk veya gerilim değişikliği, manyetik geçirgenliği değiştirme veya tersinebilirlik (histerisiz) döngüsünü bozma etkisine sahiptir. Tablo 4’te dış kuvvete göre kuvvet dönüştürücülerin manyetik devre düzenleri ve yükleme şekilleri verilmiştir. Manyetik akının konfigürasyonuna göre 1, 2, 3 boyutlu farklı tipleri ve manyetik devre düzenleri Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler: elastik elemanlar ve manyetik devreler

Akı konfigürasyonu	1-boyutlu		2-boyutlu		3-boyutlu	
Elastik eleman	A: Çubuk	B: Çerçeve ya da Boru	C: Halka	D: Blok	E: Mebran	F: Şaft
Manyetik devre düzeni						
Mekanik yükleme	Çekme	Basma	Eğilme	Basma	Eğilme	Burulma
Süreç değişkeni	Kuvvet Yer değiştirmesi	Kuvvet	Kuvvet	Kuvvet Titreşimi	Basma Kuvveti	Tork

Bilinen ve uygulamada kullanılan manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler 6 şekilde sınıflandırılır. Bunlar:

1. Eksenel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
 - Manyeto Elastik Şeritler ve Çubuklar
 - Manyeto Elastik Amorf Teller
2. Çerçeve Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
3. Boru Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
4. Dairesel Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
5. Blok Şeklinde Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücüler
6. Tork Dönüştürücüleri İçin Manyeto Elastik Şaftlar olarak sıralanabilir.

Piyasada bulunan manyeto elastik kuvvet dönüştürücüler 2 kN - 50 MN aralığında yük taşıma kapasitesine sahiptirler. Bu geniş aralıklarından dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar; ekstrapde köprüler, zemin ankrajları, kazıklı duvarlar, setler, kirişler ve plakalar gibi çelik yapılarda temassız mekanik gerilim ölçümü için kullanılırlar.

Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri birçok farklı ülkede ve birçok farklı yapıda kullanılmaktadır. En önemli uygulamaları Şekil 15’de gösterildiği gibi; Kanada’daki BC Place Stadyumu’nun açılır kapanır çatısının askılarındaki gerginliğin sürekli olarak izlenmesinde, Trinec-Baliny veya statik yük testi sırasında Chotëbuz’daki köprünün ilave öngerilmeli takviyesindeki gerilimin izlenmesinde ve Mëlnık limanındaki taşkın kontrol barajının yapımında gerilim ölçümünde kullanılmaktadır.

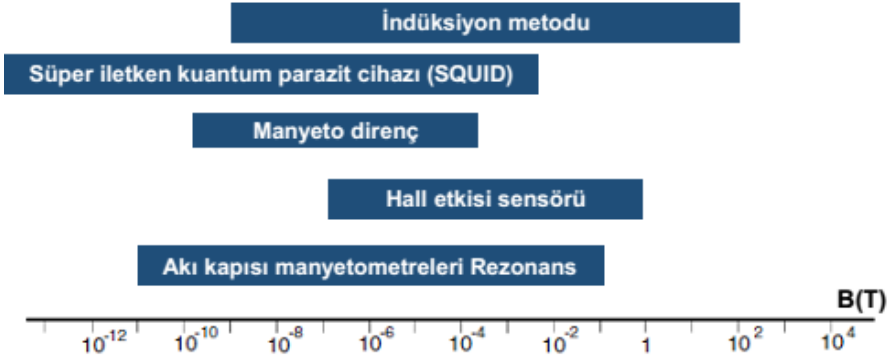


Şekil 15. Manyeto elastik kuvvet dönüştürücüleri çeşitli kullanım alanları

5. Elektromanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları

Manyetik alanların ölçümü, eskiden beri kullanılan pusula cihazlarından başlayan yön bulma sistemlerini geliştirmek ve hassaslığı arttırmak için modern elektronik sistemlerle uyumlu halde geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Manyetik alan büyüklük değerine göre farklı manyetik alan ölçüm teknikleri Şekil 16'da gösterilmiştir. 5 farklı ölçüm metodu ve bunların kullanıldığı manyetik akı ölçüm aralıkları görülmektedir.



Şekil 16. Manyetik akı büyüklük değerine göre farklı manyetik alan ölçüm teknikleri

Tablo 5. Çeşitli ölçüler için manyetik sensör prensiplerinin özeti tablosu

Proses değişkeni	Yer değişimi (X)		Kuvvet (F)	DC Manyetik Alan (H_0)	Hız (n)	Akım (I)
1.) AC/DC	AC	AC	AC	AC	DC	DC
2.) Temel ve Fonksiyonel prensipler	Endüktance Değişimi ↓ Diferansiyel Voltaj	Akım dağılımındaki değişim ↓ Diferansiyel Voltaj	Elastik gerilme ↓ Geçirgenlik değişimi	DC Manyetik Alan Önbesleme ↓ Harmoniklerin Oluşumu	Galvanomanyetik Etki ↓ Hall Voltajı	Galvanomanyetik Etki ↓ Hall Voltajı
3.) Şematik resim						
4.) Manyetik Karakteristik belirleyici özellik						
	Geçirgenlik Doygunluğu	Geçirgenlik Doygunluğu	Manyeto striksiyon Elastik Sınırı	Anlık ve maksimum geçirgenlik	Zorlayıcı alan kuvveti manyetiklik giderme eğrisi	Dönüş yolunun geçirgenlik direnci

Manyetik sensörler, elektro manyetik alanın prensiplerine ve etkilerine göre çalışırlar ve bir şekilde veya başka bir şekilde temel fonksiyonel elemanı olarak manyetik malzeme içerirler. Tablo 5'de çeşitli ölçüler için manyetik sensör

prensiplerinin özeti olarak; proses değişkeni, AC (alternatif akım) veya DC (doğru akım) seçeneği, temel ve fonksiyonel prensip ve manyetik karakteristik belirleyici özelliklerine göre manyetik sensörler verilmiştir.

5.1. Elektro Manyetik Kuvvet Dönüştürücü Tipleri ve Kullanım Alanları

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücü bilinen tiplerinden 3 tanedir. Aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

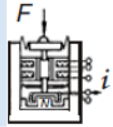

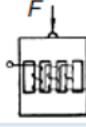


1. Manyeto Direnç Kuvvet Dönüştürücüler
2. Manyetik Alanda Dirençli Kuvvet Dönüştürücüler
3. Manyetik Alanda Kapasitif Kuvvet Dönüştürücüler

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücülerin küçük kuvvet ölçümleri alanında çok fazla kullanım alanı mevcuttur. Elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler 1 N ile 10^{-12} N aralığında ölçüm yapabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde düşük kuvvet ölçüm aralıklarında yaygın olarak kullanılırlar.

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücülerin kullanım alanları oldukça geniştir. Aşağıda Tablo 6'da verilen kriterlerle elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler ile farklı prensipli kuvvet dönüştürücüler karşılaştırılmıştır. Tablodan görüldüğü gibi elektro manyetik kuvvet dönüştürücüler en düşük doğrusallık hatasına sahiptirler. Ayrıca çökme miktarlarının 0 (sıfır) olması da bir avantajdır. Bu avantajları ile pek çok kullanım alanları vardır. Ancak < 1 kg ölçüm aralığında kullanılması ise hem avantaj hemde dezavantajı olarak görülmektedir.

Elektro manyetik kuvvet dönüştürücüleri, elektro manyetik tartım işlemlerinde ve mikro (10^{-6}), nano (10^{-9}), piko (10^{-12}) gibi küçük kuvvetlerin ölçülmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanım alanlarına göre örnek cihaz yapıları aşağıda verilmiştir.

Tablo.6. Farklı kuvvet dönüştürücülerin özelliklerinin karşılaştırılması tablosu

Kriter	Elektromanyetik Kuvvet Dönüştürücü	Dirençli Uzama Ölçerli Kuvvet Dönüştürücü	Manyeto Elastik Kuvvet Dönüştürücü	Jiroskopik Kuvvet Ölçme Cihazları	Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları
Sembolik düzen					
Fiziksel formül	$i \sim F$	$Q \sim \xi \sim F$	$\mu \sim F$	$\alpha \sim \xi$	$f \sim f_0(1 - \epsilon)$
Kuvvet aralığı	< 1 kg	0.1 ⇔ 1000t	0.1 ⇔ 1000t	< 10 kg	< 10 kg
Çökme miktarı [mm]	0	< 0.5	< 0.5	< 0.1	< 0.2
Doğrusallık Hatası	< 0.01 %	< 0.02 – 1 %	> 1 %	< 0.02 %	> 0.1 %
Termostabilite	10	15	30	1	-

6. Akustik Kuvvet Ölçme Cihazları

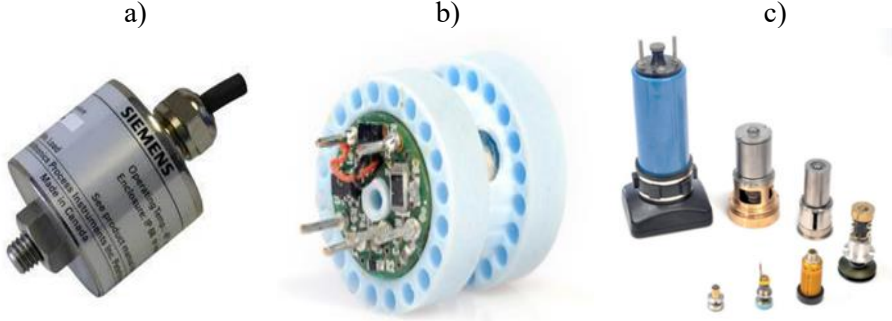
Akustik sensörler (Şekil 17a ve Şekil 17b) ses dalgasını farklı bir fiziksel büyüklüğe dönüştürülebilir yapıdaki cihazlardır. İki tip akustik sensör vardır: Birincisi sabit akustik sensörler, tek parçadan oluşur ve sinyal havada veya sıvı yoluyla iletilir. Her uygulama gereksinimini karşılamak için farklı boyutlar mevcuttur. İkincisi temassız akustik sensörler ise sabit bir parça (stator) ve bir döner parçadan (rotor) oluşur, ancak her uygulama gereksinimini karşılamak için farklı şekil ve boyutlara sahiptir. Akustik sensörler akustik dalga prensibi ile çalışırlar. 5 tür akustik dalga türü bulunmaktadır. Bunlar: Rayleigh, APM (Akustik Plaka Modu), Lamb, STW (Yüzey Enine Dalga) ve Love Dalgalarıdır. Farklı özelliklerle akustik dalga türlerinin karşılaştırılması Tablo 7 ile verilmiştir. Akustik dalgalar, farklı akustik kuvvet dönüştürücülerin çalışma prensipleri olarak karşımıza çıkarlar.

Tablo 7. Farklı Akustik Dalga Türlerinin Karşılaştırılması

Dalga türü	Hassaslık/Gürültü	Gaz (g) veya sıvı (s) uygulama alanı	Sağlamlık	Uygulamalar
Rayleigh	Yüksek/düşük	g	Yüksek	Gaz, kuvvet
APM	Orta/Düşük	g+s	Orta	Biyokimyasal, gaz ve viskozite
Lamb	Yüksek/Orta	g+s	Orta	Yoğunluk, ses hızı
STW	Yüksek/Düşük	g+s	Yüksek	Biyokimyasal ve gaz
Love	Yüksek/Düşük	g+s	Yüksek	Biyokimyasal, gaz ve viskozite

6.1. Akustik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Tipleri

Akustik kuvvet dönüştürücü (Şekil 17c), akustik sinyalin (sonik, ultrasonik, vb.) girişi (kuvvete bağlı olarak) ve çıkışı arasında gerçekleşen işlemlerde rol alan bir cihazdır. Akustik kuvvet dönüştürücüleri (Şekil 17b), akustik sinyalleri elektriksel enerjiye dönüştürerek sayısal bir çıktı alınmasını sağlar.



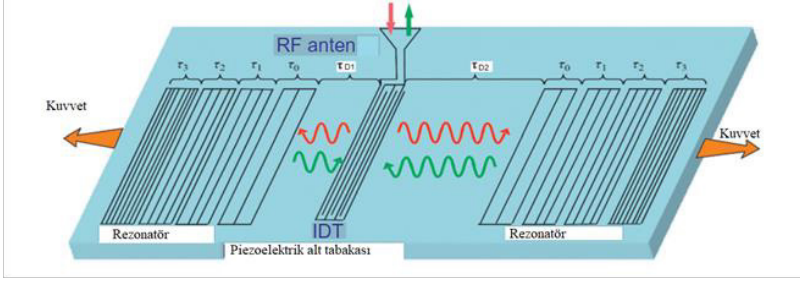
Şekil 17. (a) Akustik sensör, (b) akustik sensör içyapısı, (c) farklı yapıdaki akustik kuvvet dönüştürücüleri

Kuvvet ölçümü için çok çeşitli akustik yöntemler vardır, birincisi yüzey akustik dalga (SAW) metodudur. Bu metotta, iki özdeş kümede dört ortogonal frekans kodlamalı (OFC) rezonatör kullanan bir SAW dönüştürücüsü Şekil 18'de gösterilmektedir [37]. Anten tarafından toplanan radyo frekansı (RF) enerjisi, elektrik enerjisinden, dijital dönüştürücü (interdigital transdüser- IDT) tarafından malzemenin yüzeyi üzerinde mekanik dalgalara dönüştürülür. IDT çift yönlüdür ve bu nedenle iki yönde dalga oluşturur. Dalgalar alt tabaka boyunca hareket eder ve her bir rezonatör kümede bulunan dört rezonatör ağıyla karşılaşır. Dalgalar farklı zaman gecikmeleri ($\tau D1$ ve $\tau D2$) ile tekrar elektrik enerjisine dönüştürüldükleri IDT'ye geri yansır, bu da RF enerjisinden sonra antenden dışarı doğru yayılır.

İki tipik yük durumu vardır:

- Çekme altında, SAW parmak genişlikleri ve aralıkları hem artar, hem de çalışma frekansında bir azalmaya neden olur.
- Basma altında, parmak genişlikleri ve aralıkları azalır, bu da çalışma frekansının artmasına neden olur.

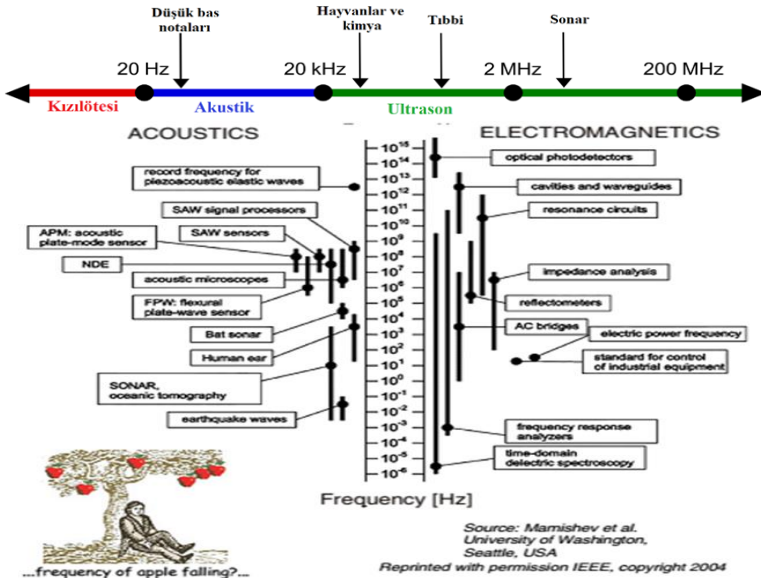
SAW dönüştürücü frekansındaki bu değişiklik uygulanan kuvvet ile orantılıdır.



Şekil 18. Dört OFC reflektör ve antenden oluşan iki rezonatör ile SAW dönüştürücü. Malzemede hareket eden yüzey akustik dalgalar direkt (kırmızı) ve ters (yeşil) oklarla temsil edilir.

7. Ultrasonik Kuvvet Ölçme Cihazları

İnsan kulağı 20 Hz ila 18.000 Hz arasında frekansa sahip ses dalgalarını duyabilir. Frekansları 1-20 Hz arasında olan ses dalgaları infrason olarak adlandırılırken, 18.000 Hz'in üzerindeki ses dalgaları ultrasonik olarak tanımlanmıştır. Şekil 19'da ultrasonik dalgalarının frekans aralığı gösterilmiştir. Ses dalgaları mekanik titreşimlerle meydana geldiğinden ancak bir ortam içinde yayılabilirler, boşlukta yol alamazlar. Tüm diğer dalgalarda olduğu gibi ses dalgaları da yansır, kırılır, dağılır, absorbe olur. Bir ortamdaki enerjilerinin bir kısmını kaybederler. Ultrasonik kuvvet dönüştürücüler, ultrasonik dalgalar ile nesnelere algılamak ve gerekli kuvvetleri hesaplamada kullanılırlar.



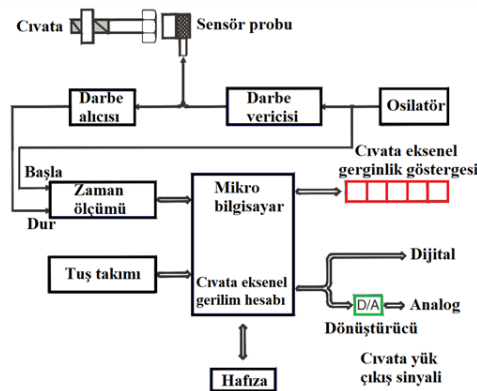
Şekil 19. Bazı örneklerle yaklaşık frekans aralıkları

7.1. Ultrasonik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Endüstriyel Uygulamaları

Hagiwara Electric tarafından, cıvata bağlantılarının sıkma kuvvetini ölçmek için ultrasonik dalga iletimi ilkesine göre çalışan bir cihaz tasarlanmıştır. (Şekil 20). Bir cıvatanın sıkılması veya bir somunun çevrilmesi, bir çekme gerilimine neden olarak uzamaya neden olur. Ultrasonik dalga, cıvata boyunca ilerler ve cıvatanın diğer ucuna ulaşır ve buradan dalga geri yansır. Artan gerilimlerle dalga iletim hızı azalır. Cıvatanın uzaması, gelen dalganın girişi ile geri dönen dalganın arasındaki yankı zaman aralıklarını uzatır. Cihaz, ultrasonik dalga iletiminin bu iki özelliğinin birleşik etkisini kullanır. Başlangıç gerilimi σ (sıkma işleminin neden olduğu gerilim) (13) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\sigma = K_u(T_p - T_0) \quad (13)$$

Burada K_u , değeri test edilecek cıvatanın boyutlarına göre belirlenen bir sabittir. Test işleminden önce K_u değeri belirlenir ve verilen bir cıvata için boyutsal veri girişi yapılarak ünitenin hafızasına kaydedilir. Cıvata sıkılmadan önce, T_0 süresini ölçmek için sensör probu cıvatanın baş kısmına uygulanır ve sıkıldıktan sonra T_p zamanını ölçmek için prob tekrar aynı şekilde uygulanır. Yerleşik mikrobilgisayar, denkleme göre σ değerini verecek şekilde programlanmıştır. Dijital ekran, cıvata yükünün doğrudan okunmasını sağlayan hesaplamaların sonucunu gösterir. Bu aletin avantajı, cıvata bağlantılarını gevşetmeden veya sıkma sırasında ihtiyaç duyulan torkun ölçülen veya hesaplanmış değerlerini kullanmadan sıkma kuvvetinin ölçebilmesidir. Bu ölçüm sırasında cıvata bağlantısı “değişmeden (harektet etmeden)” kalır.



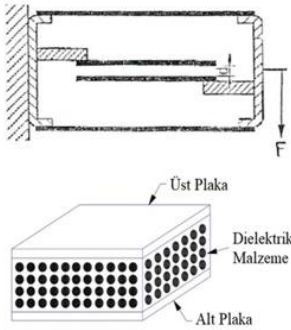
Şekil 20. Ultrasonik cıvata sıkma kuvveti dönüştürücüsü

8. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazları

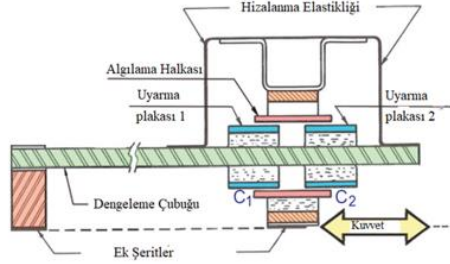
Kapasitör veya kondansatör denilen eleman, temel olarak yalıtkan bir malzeme ile birbirinden ayrılmış iki plakadan oluşur. Kondansatörün kapasitesi, plakalar arasındaki mesafe ile ters, plakaların yüzey alanı ile doğru orantılı olarak değişir. Plakaların yüzey alanını değiştirilmenin güçlüğünden dolayı plakaların arasındaki mesafe değiştirilerek ölçüm yapılır. Bunun için plakalardan bir tanesi sabit, diğeri ise uygulanan yüke bağlı olarak hareketlidir. Yükün uygulanmasıyla plakalar arasındaki mesafe değişir; bu da kapasitenin değişmesine neden olur (Şekil 21). Bir elektrikli titreşim devresinin elemanı olarak yerleştirilmiş bulunan bu kondansatörün kapasitesinin değişmesi bir akım değişimi meydana getirir. Ayrıca devrenin rezonans frekansı ve geçen akımın fazı da değişir.

Kapasitif tip kuvvet ölçme cihazları yüksek hassasiyet ve çözünürlük, geniş bant genişliği, sağlamlık ve kararlı ölçüm yeteneği ile bilinirler. Şekil 22'te diferansiyel kapasitif tip kuvvet ölçme cihazının iç yapısı verilmiştir. Uygulanan kuvvete bağlı olarak, dış halka, iki iç boruya göre ekstenel olarak hareket ederek, diferansiyel halkası C1 ve C2'yi değiştirmektedir. Bu değişim algılama halkası tarafından algılanarak ölçüm gerçekleştirilir. Bu yapı, hem basma hem de çekme gerilmesinde son derece iyi bir doğrusalılıkta sonuçların elde edilmesini sağlar.

Bu tip yük hücreleri dinamik kuvvet ölçümleri için tasarlanmış olup, geniş bir frekans çıkışına ihtiyaç vardır. Sıcaklığa karşı hassas olması ve elektrik devresinin karmaşıklığı ise en büyük dezavantajlarıdır.



Şekil 21. Kapasitif Kuvvet Ölçme Cihazı Çalışma Prensibi



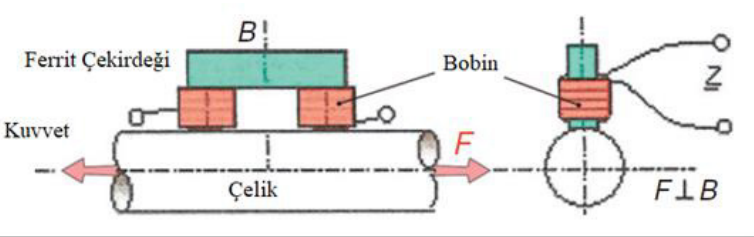
Şekil 22. Diferansiyel kapasitif kuvvet ölçme cihazının iç yapısı

9. İndüktif Kuvvet Ölçme Cihazları

Bir parametrik dönüştürücü tipi olan bu cihazların prensibi endüktans değişimine dayanır. Şekil 23'te verilen cihazda bobin bir ferrit çekirdeğe sarılır

ve bir çelik çubuğa monte edilir. Çelik çubuğa çekme gerilmesi uygulandığında manyetik devre demirin içinden kapandığı için, bobin empedansı, uygulanan kuvveti ile orantılı olarak ölçülebilir.

Diğer bir indüktif kuvvet ölçme cihazları, lineer değişen diferansiyel transformatör (LVDT) cihazıdır. Bir LVDT'nin yer değiştirme özelliğinin iki yönlü yapısı, elastik bir elemanın iki yönlü değişimini mükemmel şekilde algılar. Bu tür ölçme cihazı, uygulanan yük ile orantılı bir çıkış voltajı üretir ve çekme yönünden basma yönüne olan bir değişimde faz veya polarite tersine dönüşür.



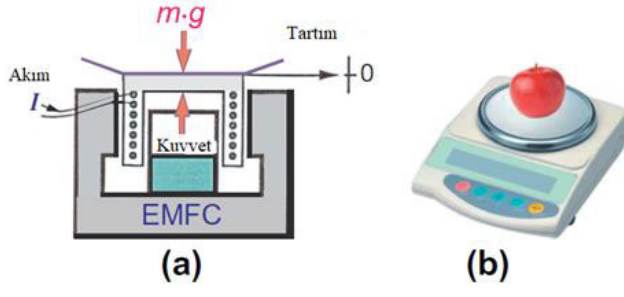
Şekil 23. Çelik çubuk üzerindeki bir indüksiyon akımı dönüştürücüsüyle kuvvet ve gerilim ölçümü

10. Elektrodinamik Kuvvet Ölçme Cihazları

Genellikle elektromanyetik kuvvet kompanzasyonu (EMFC) olarak adlandırılan prensibe dayanan bir dinamik tartım sistemi Şekil 24'te gösterilmiştir. Manyetik alandaki akım akışı bir kuvvet üretir. Elde edilen kuvvet F , manyetik alan B , akım I ve yol uzunluğu L ile orantılıdır. B ve l sabit ise, kuvvet ve akım arasındaki orantı ölçüm için kullanılabilir.

Elektromanyetik kuvvet kompanzasyonu (EMFC) sistemin avantajları şunlardır

- Sistemde sürtünme yoktur.
- Sistem aktif olup kontrol edilebilir.
- Ölçüm sırasında bobin hareketi (deplasmanı) olmadığı için sistem her zaman aynı konumda (ayar noktasında) ölçüm alır. Bu husus teraziler için önemli bir parametredir.



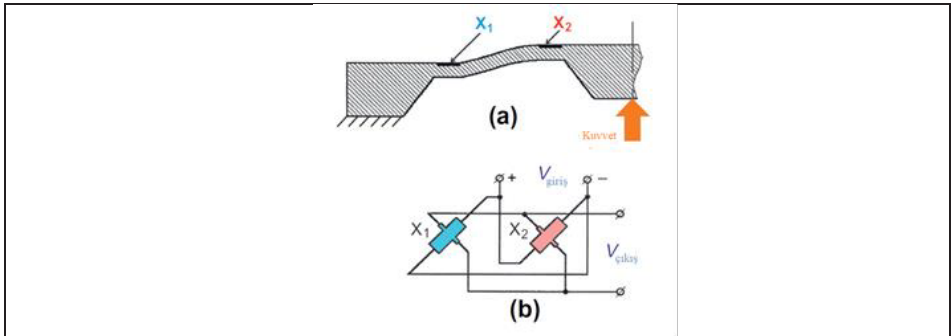
Şekil 24. (a) Ticari bir terazi içinde kullanılan elektrodinamik kuvvet kompanzasyon ilkesi prensip şekli, (b) Ticari bir terazi modeli

11. Galvanomanyetik Kuvvet Ölçme Cihazları

Enine elektromotor kuvvet etkisine dayanan bir Hall etki cihazı, Şekil 25'de şematik olarak gösterilmektedir. Diyafram üzerinden dağıtılan yük uygulaması, karşı sinyalleri olan enine voltaj uzama göstergeleri (transverse voltage strain gauges - TVSGs), konumlarında zıt işarete sahip bir gerilim üretirler (Şekil 25a). Uzama ölçerlerden birisi eksenel olarak sıkıştırılırken (X_1), diğeri eksenel olarak gerilir (X_2), ya da tam tersi bir durum oluşur. Kuvvet dönüştürücüsünün çıkış voltajı $V_{\text{çıkış}}$, iki TVSGs tarafından üretilen enine gerilimlerin farkıdır (Şekil 25b).

Enine voltaj uzama ölçerler, Wheatstone köprüsüne bağlı dirençli uzama ölçerlere kıyasla bazı önemli avantajlara sahiptir:

- Küçük sıfır basınç dengelemesi,
- Daha az sıcaklık hassasiyeti dağılımı,
- Nominal çıkış sinyali birleştirme için daha basit ek devre ihtiyacı



Şekil 25. (a) Silikon kare şekilli diyaframın düzlemsel tarafına konumlandırılmış enine voltaj uzama ölçerler (TVSGs). (b) TVSGs'lerin Hall topolojisine sahip dört terminalli dönüştürücü olarak paralel bağlantısı

Bu Hall etki cihazları, tüm elektromanyetik kuvvet ölçme cihazları arasında en iyi doğrusalığa sahiptir. Yarıiletken malzemelerin ve devre tasarımının dikkatli bir şekilde seçilmesi ile Hall-etkili sensörleri manyetik alandaki voltajı oldukça doğrusal olarak elde edilebilir.

5. Sonuç ve Öneriler

Kuvvet ölçme cihazları temel olarak uygulanan bir kuvvet sonucunda meydana gelen değişimi algılayıp, elektriksel bir sinyale dönüştüren cihazlardır. Bu cihazların ölçüm prensiplerine göre pek çok çeşitleri mevcuttur. Bu çalışmada, elektriksel kuvvet ölçümünde kullanılan 10 farklı yöntem hakkında bilgiler aktarılmıştır. Çalışma prensipleri ve çalışma mekanizmaları, avantajları ve dezavantajları daha geniş ölçekte ve diğer iyi bilinen değerlendirmelere kıyasla daha sayısal veriler bağlı olarak verilmiştir. Bu çalışma ile ölçme sensörleri üzerine araştırma yapanlar için potansiyel bilgilendirici, eğitici ve pratik bir bilgi kaynağı olacağı düşünülmüştür. Bu çalışma ile kuvvet ölçme sensörleri ve bunların çalışma prensipleri üzerine bir rehber doküman oluşturulması amaçlanmıştır.

Kaynaklar

1. Stefanescu, D. M. (2011), Handbook of Force Transducers, Berlin: Springer-Verlag.
2. Stefanescu D. M., Anghel M. A., (2013), “Electrical methods for force measurement – A brief survey”, Measurement 46, 949–959
3. Aydemir B. (2021), Kuvvet Kalibrasyon Rehberi, TÜBİTAK UME, Eylül 2021
4. Aydemir B., Dizdar H., Vatan C., (2017), “Genel Kuvvet Metrolojisi Eğitim Dokümanı”, G2KV-010, TÜBİTAK UME, Gebze-Kocaeli, Aralık 2017.
5. Aydemir B., Ayan E., Elmas B.S., Dizdar H., (2019). “Piezoelektrik Kuvvet Ölçme Cihazlarının Yapısı, Avantajları ve Kalibrasyonu”, 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2019), Alanya Antalya/Turkey, Nisan 2019, p. 1054-1060
6. Altınok M., Aydemir, B, Gülen A.U, (2020), Elektro Manyetik Kuvvet Ölçme Cihazı Yapısının ve Kullanım Yerlerinin İncelenmesi, 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2020) April 20-22, 2020, Alanya Antalya/Turkey
7. Altınok M., Aydemir, B, Gülen A.U, (2020), Manyeto Elastik Kuvvet Ölçme Cihaz Yapılarının İncelenmesi, 5th International Mediterranean Science and Engineering Congress, (IMSEC 2020) April 20-22, 2020, Alanya Antalya/Turkey
8. Measurements Group Yayını, 1984. Modern Strain Gage Transducers, Epsilonics, Measurements Group Inc., U.S.A.
9. Measurements Group Yayını, 1988. Strain Gage Based Transducers, Their Design And Construction, Measurements Group Inc., USA
10. Measurements Group Yayını, 1989, Measurements Group -Vishay-U.S.A. Technotes
11. Measurements Group Katalog, Transducer Class Strain Gages, Measurements Group Inc., USA.
12. Bray, A., Barbato, G., Levi, R., 1990. Theory And Practice Of Force Measurement, Academic Press, London
13. Technical Note, 1978. Strain Gage Installation Procedures For Transducers, Measurement Group Inc. USA
14. Technical Note, 1979. Optimising Strain Gage Excitation Level, Measurement Group Inc., TN-502, USA.
15. Technical Note, 1983. Errors Due To Misalignment Of Strain Gages, Measurement Group Inc., TN-511, USA.

16. Technical Note, 1992. Strain Gage Thermal Output And Gage Factor Variation With Temperature, Measurement Group Inc., TN-504-1, USA
17. Aydemir, B., 2003, 17-4 PH çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik kuvvet dönüştürücü yay elemanlarının iç yapısal özelliklerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir
18. Kaufmann, R., 1983. Messwertaufnehmer Auf DMS_Basis Und Ihr Temperaturverhalten, Messen Und Prüfen, December, S.745-750
19. EURAMET cg-04, Uncertainty of Force Measurements Version 2.0, 2011.
20. Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., 2015, EURAMET-cg-04, Kalibrasyon Rehberi, “Kuvvet Ölçümlerinde Belirsizlik” TÜBİTAK UME, Şubat 2015
21. Singhab, A.P., Ghoshala, S.K, Kumar, H., (2018), “A contemporary investigation of force transducers: Past and present scenario”, Indian Journal of Pure & Applied Physics, Vol. 56, pp. 717-727.
22. Fank, S., 2002, Kuvvet Dönüştürücülerinde Yay Elemanı Malzemesi Özelliklerinin Performans Üzerindeki Etkisi, Doktora tezi, İTÜ, İstanbul
23. Test & Measurement Force and Strain - Measurement Equipment for Demanding T&M Applications, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 5 Mart 2020.
24. Force Sensors, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 1 Mart 2020.
25. Instruction Manual - Press Force Sensor, www.kistler.com, Ziyaret tarihi: 18 Mart 2020
26. Aydemir, B., Özgen, D., Durgut, Y., Küçük, O., Özal, A.S., Tosun, İ., (2016), “Dinamik Ölçümlerde Sensör Uygulamaları”, IMSEC 2016, p. 1046-1054.
27. <https://www.hbm.com/en/3215/strain-gauges-or-piezoelectric-sensors/>, Ziyaret tarihi: 13 Mart 2020.
28. <https://www.ele.com/product/50kn-clamped-boss-load-ring-/422>, Ziyaret tarihi: 15 Mart 2020.
29. Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., Decarlo, M., Campanella, C.E. (2017), Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, Sensors, 17(10), 2284.
30. Hauptmann, P.: Sensors: Principles and Applications. Carl Hanser Verlag, Munich(1991)
31. Platil, A.: Mechatronics Sensors. PPT-05-force-b on Internet, January 3 (2005)
32. Wieringa, H.: Electrical force measuring transducers. In: Proc. Symposium Force, Pressure, Displacement and Flow Sensors, May 13-14, pp.

- 179-197. Twente University of Technology, Enschede, The Netherlands (1982)
33. Turner, J.D., Austin, L.: Sensors for automotive telematics (review article). *Measurement Science and Technology* 11, R58–R79 (2000)
 34. Lupu, N.: Magnetostriction versus magnetoelastic effects. European School on Magnetism, Cluj-Napoca, Romania, September 9-18 (2007)
 35. Hauptmann, P.: *Sensors: Principles and Applications*. Carl Hanser Verlag, Munich (1991)
 36. Boll, R., Borek, L.: Magnetic sensors of new materials. *SIEMENS Forschungs- und Entwicklungsberichte* 10(2), 83–90 (1981)
 37. Daga, A., Ganesan, N., Shankar, K.: Behavior of magneto-electro-elastic sensors under transient mechanical loading. *Sensors and Actuators A: Physical* 150(1), 46–55 (2009)
 38. Oppermann, K., Zagar, B.G.: A novel magneto-elastic force sensor design based on Terfenol-D. In: *Proceedings SENSOR + TEST Conference 2009*, Nuremberg, Germany, May 26-28, vol. 2, pp. 77–82 (2009)
 39. Foşalău, C., Postolache, O., Creţu, M.: A novel transducer for force and angle measurement based on magnetostrictive amorphous wires. In: *Proc. 44th International Scientific Colloquium IWK 1999*, Ilmenau, Germany, September 20-23, pp. 257–261 (1999)
 40. Chiriac, H., Hristoforou, E., Neagu, M., Borza, F.: Force measurements using Ferich morphous wire as magnetostrictive delay line. *Sensors and Actuators A: Physical* 91, 223–225 (2001)
 41. Bieńkowski, A., Szweczyk, R.: The possibility of utilizing the high permeability magnetic materials in construction of magnetoelastic stress and force sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 113(3), 270–276 (2004)
 42. Zakrzewski, J.: New magnetoelastic force transducer. In: *Proc. XIIIth IMEKO World Congress*, Turin, Italy, September 5-9, vol. I, pp. 241–245 (1994)
 43. May, L.A.: Magnetic-based force/torque sensor. European Patent EP 1274974 (2003)
 44. Torductor Torque measurement with Pressductor Technology. ABB Automation Products AB, Västerås, Sweden, PDF created on October 16 (2007)
 45. S.I. Yaniger, (1991) “Force Sensing Resistors: A Review of The Technology”, Interlink Electronics, Inc., Carpinteria, CA, USA

Bölüm 7

Plastiklerin ISO 527 Standardına Göre Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi

Bülent AYDEMİR¹

¹ TÜBİTAK UME Ulusal Metroloji Enstitüsü Kuvvet Laboratuvarı

1. Giriş

Plastik kullanımı giderek artmakta ve tüm zamanların en yüksek kullanım seviyesine yaklaşmaktadır. Plastiklerin tasarım şartlarına uygun ve doğru olarak kullanılabilmesi için üreticilerin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde ölçebilmeleri gereklidir. Bu bağlamda, plastiklerin çekme deneyi için pek çok yayınlanmış standart vardır. Termoplastik ve termoset malzemeler için kullanılan çekme deney standartları ASTM D638 ve ISO 527-2 olarak karşımıza çıkarlar [1-3]. Bu standartlar, plastikler için uygulanan çekme testinin temel öğelerini, ekipmanlarını, yazılımı ve gerekli numuneleri genel olarak tanıtmak için hazırlanmıştır.

Çeşitli plastik türleri için birçok farklı çekme test yöntemi vardır. ASTM D638, yalnızca 1.00 mm ile 14 mm kalınlığındaki sert plastik numuneler için geçerlidir. Eğer numune 1,00 mm'den daha ince bir tabaka veya film ise, ASTM D882'ye göre test edilmelidir. ISO 527-2 ile benzer sonuçlar sağlarken, ASTM D638, numune boyutundaki ve test gereksinimlerindeki farklılıklar nedeniyle teknik olarak eşdeğer kabul edilmez. Bazı büyük çok uluslu üreticiler hem ASTM D638 hem de ISO 527-2'yi test ederken, müşterilerimizin çoğu coğrafi konumlarına göre bu standartlardan birini yâda her ikisini de tercih edebilmektedir. Kuzey Amerikalı üreticiler plastik malzemeleri genellikle ASTM D638'e göre test yaparken, Avrupa ve Asya'daki üreticiler öncelikle ISO 527-2'ye göre test eder. Çin'deki müşteriler ise, ASTM D638 ve ISO 527-2'yi eşit olarak kullanmaktadır.

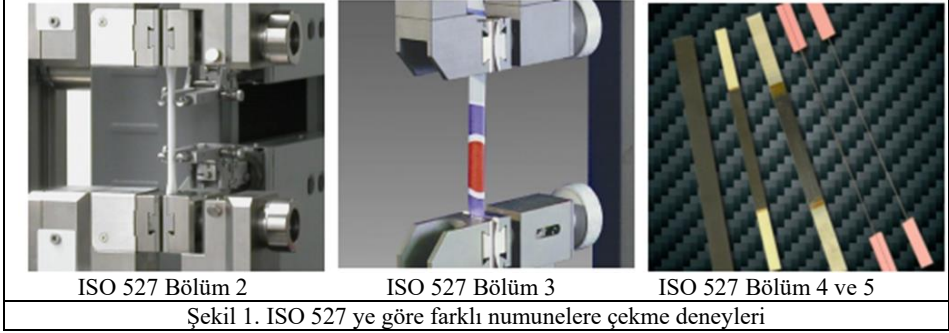
Bu çalışmada, ISO 527 standartları esas alınarak plastiklerin çekme deneyi detaylı olarak ele alınmıştır. Çekme deneyinde elde edilen sonuçlar ve çekme deney hızları hakkında bilgiler verilmiştir.

2. ISO 527 Göre Plastik Malzemelerde Çekme Deneyi

ISO 527 standartları, dolgulu ve dolgusuz kalıplamalı plastikleri, ekstrüzyon ve döküm malzemeleri, plastik film ve levhaların yanı sıra uzun elyaf takviyeli kompozitlerin çekme özelliklerini açıklayan bir grup standartlarıdır. Bölümleri aşağıda sıralanmıştır:

- ISO 527 Bölüm 1: Genel prensipler
- ISO 527 Bölüm 2: Kalıplama ve ekstrüzyon plastikleri için deney şartları
- ISO 527 Bölüm 3: Filmler ve levhalar için deney şartları
- ISO 527 Bölüm 4: İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları
 - İzotropik kompozit: Malzemenin özellikleri ölçme yönüne göre değişmeyen malzemedir.
 - Anizotropik Kompozit: Malzemenin ölçme yapılan eksen veya eksenlere göre farklı özellikler göstermesidir.
 - Ortotropik Kompozit: Anizotropik malzemelerin alt sınıfı olarak tanımlanan kompozit sınıfıdır. Ortotropik malzemelerin özellikleri üç eksenle farklıdır. Ortotropik mekanik özellikler oryantasyonun bir fonksiyonudur.

- ISO 527 Bölüm 5: Tek yönlü elyaf takviyeli plâstik kompozitler için deney şartları [1-6].



Standartlar genel olarak, plastik çekme testinin temel öğelerini, cihazları, yazılımı ve gerekli numunelere genel bir bakışı tanıtmak için hazırlanmıştır. Standartta uygun deney numunesine bir çekme kuvveti uygulanır ve numunenin gerilme altındaki çeşitli mekanik özellikleri belirlenir. Bir malzeme test makinası üzerinde çekme numunesi kopuncaya kadar, genellikle 1 ila 500 mm/dak arasında değişen çekme hızlarında gerçekleştirilir. Birçok farklı mekanik özelliğin ölçülmesine rağmen, en yaygın olanları şunlardır:

- Çekme mukavemeti – bir plastiğe, akma(kalıcı bir şekilde esnemen) veya kırılmadan önce uygulanabilecek kuvvet miktarıdır.
- Çekme modülü – bir malzemenin akmadan önce gerilmeye tepki olarak ne kadar deforme olabileceğidir. Modül, malzemenin sertliğinin bir ölçümüdür.
- Uzama - kırılmadan sonra ölçü uzunluğundaki artış, orijinal ölçü uzunluğuna bölünür ve 100 ile çarpılarak sonuç yüzde olarak verilir. Daha fazla uzama, daha yüksek sünekliliği gösterir.
- Poisson Oranı - bir malzemenin ne kadar gerildiği ile çekme işlemi sırasında ne kadar incelendiği arasındaki ilişkinin ölçümüdür.

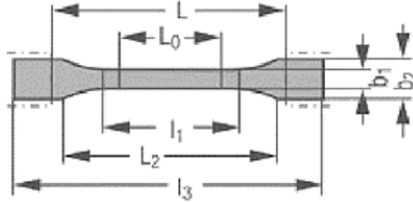
2.1. Numune şekilleri ve boyutları

ISO 527-2' ye göre 6 tip olası test numune boyutu vardır (Şekil 1). Tercih edilen numuneler, 1A tipi (enjeksiyonla kalıplanmış) ve 1B (işlenmiş) köpek kemiği veya dambıl şeklindeki numunelerdir. Malzemenin sınırlı olduğu durumlarda, birçok laboratuvar 1BA, 1BB, 5A veya 5B tipi alt boyutlu numuneler kullanır. Bu durumlarda, küçük ölçü uzunlukları ve kısa test süreleri nedeniyle çekme modülünü ölçmek teknik olarak zor olabilir.

ISO 527-2, kalıplanmış, ekstrüde edilmiş, işlenmiş veya dökülmüş, katı ve yarı sert plastiklerin test edilmesi için hazırlanmıştır. ISO 527-2 ayrıca güçlendirilmiş plastikler için de geçerlidir (ISO 527-4 ve ISO 527-5 kapsamındaki fiber takviyeli plastikler hariç). Kalınlığı 1 mm'den az olan filmleri ve levhaları test ederken ISO 527-3 standardı kullanılmalıdır.

ISO 527-2 ile kalıplanmış numune için Tip 1A ve işlenmiş numune için tip 1B çekme testleri için kullanılacak numuneleri tanımlar (Şekil 2). İlave olarak, ISO 20753 standardı ise, plastikleri genel bir şekilde test etmek için numuneyi tanımlar [7]. Daha küçük ölçekli numune için 1BA (A22) ve 1BB (A25) tipleri standardın sadece bilgilendirici ek kısmında verilmiştir. Ayrıca ISO 37 ile orantılı Tip 5A ve 5B, tip 2 ve 3 numuneleri de yine standardın bilgilendirici ek kısmında tanımlanmıştır[8].

ISO 293 ve ISO 294 standartları, numunenin basınçla kalıplanması ve enjeksiyonla kalıplanması için koşulları tanımlar[9,10].



Standart		l_0 mm	l_1 mm	b_0 mm	b_1 mm	h mm	L_0 mm	L mm	Geometrisi
ISO 527-2	1A	≥ 150	80 ± 2	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	115	
ISO 527-2	1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	$l_2 + 5^A$ $l_3 = 106 \dots 120$	
ISO 527-2	1BA	≥ 75	30 ± 0.5	10 ± 0.5	5 ± 0.5	≥ 2	25 ± 0.5	$l_2 + 2^A$ $l_3 = 58 \pm 2$	
ISO 527-2	1BB	≥ 30	12 ± 0.5	4 ± 0.2	2 ± 0.2	≥ 2	10 ± 0.2	$l_2 + 5^A$ $l_3 = 23 \pm 2$	
ISO 527-2	5A	≥ 75	25 ± 1	12.5 ± 1	4 ± 0.1	≥ 2	20 ± 0.5	50 ± 2	
ISO 527-2	5B	≥ 35	12 ± 0.5	6 ± 0.5	2 ± 0.1	≥ 1	10 ± 0.2	20 ± 2	

Şekil 2. ISO 527-2 göre numune boyutları

2.2. Ekstansometre Ölçü Uzunluğu (Boyu)

Numune tipi 1A için tercih edilen ölçü uzunluğu standardın 2019 yılında yapılan güncellemesi ile 75 mm'ye yükseltildi. Ancak, numune tipi 1B için ölçü uzunluğunda bir değişiklik olmadı. Tip 1B için 50 mm ölçü uzunluğu olarak hala kullanılabilir. Ancak tip 1A için bu ölçü uzunluğu tercih edilmez. Ölçü uzunluğunun 75 mm çıkartılması 80 mm uzunluğundaki 1A numunesinin paralel kısmının daha iyi kullanılması sağlar. Modül ölçümleri için doğruluk seviyelerini geliştirir. Ancak akma ve kırılma noktalarının belirlenmesi üzerine etkisi yoktur.

2.3. Boyut ölçümleri

Doğru sonuçlar elde etmek için doğru boyut ölçümü gereklidir. Boyut ölçümleri için gereklilikler ISO 16012 standardında plastik malzemeler için, ISO 23529 standardında ise kauçuk malzemeler için tanımlanmıştır[11,12].

Plastik numune genişliği, bir kumpas, bir mikrometre veya bir kesit ölçüm istasyonu ile ölçülebilir (Şekil 3). Plastik numune kalınlığı ise yine bir mikrometre veya bir kesit ölçüm istasyonu ile ölçülebilir. ISO 527-1 standarda göre temas kuvveti 5 ile 15 N arasında olan ve ölçüm yüzü ile destek yüzü dairesel düz ve tipik olarak 6,35 mm (6,5 mm) çapında olması gerektiğini tanımlar. Ölçüm, numunenin ortasından ve ölçü uzunluğu içinde yapılmalıdır. Enjeksiyonla kalıplanmış numuneler de, ölçü uzunluğunun merkezine 5 mm mesafe içinde ölçülmelidir. Kalınlık ölçümünde < 10 mm boyutlarda $\pm 0,02$ mm doğruluk gerekli olduğu ISO 16012 standardında tanımlanmıştır[11]. Kalınlık ölçümünde 0,1 mm'lik bir hata, yaklaşık % 2,5'lik bir hataya karşılık gelebileceği bilinmelidir.



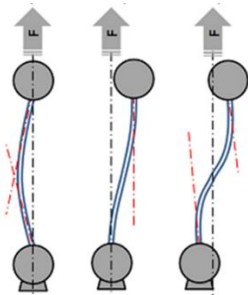
Şekil 3. Boyut ölçüm cihazları, mikrometre ve kesit ölçüm istasyonu

2.4. Numune sayısı ve şartlandırma koşulları

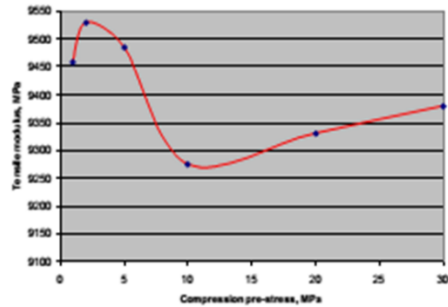
ISO 527-1 standardı en az 5 numunenin test edilmesi gerektiğini ifade eder. Daha fazla sayıda numune kullanılmasına da müsaade eder.

Test ortam şartları olarak $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ ve $(50 \pm 10) \% \text{RH}$ tavsiye eder. Bazı malzemeler için nem şartını ihmal edilebileceğini de belirtir. Ancak malzeme ile ilgili başka standartta ortam şartları ile ilgili bir tanımlama olması durumunda o şartlar esas alınabilir.

2.5. Sıkıştırma(tutma) ön gerilmesi



Şekil 4. Çene tutma işlemi sırasında oluşabilecek numune şekilleri



Şekil 5. Çenelerin sıkıştırma ön kuvveti ile çekme modülü sonuçlarının değişim eğrisi

Plastik numuneyi çenelere tutturduğunuz anda çenenin sıkıştırma kuvvetinin büyük olması sebebiyle numunenin şeklinde bir bozulma ve bir ön gerilme kuvveti oluşur(Şekil 4). Bu sorunun önlenmesi gereklidir. Bunu önlemek için çeşitli yazılımlar kuvveti sabit tutma işlevi geliştirmişler ve çene tutma işlemi sırasında oluşabilecek ön gerilimlerinden kaçınabilirler. Şekil 5'te sıkıştırma ön kuvveti ile çekme modülünün değişim eğrisinden görülebileceği gibi çenelerin tutma sırasındaki sıkıştırma gerilimleri, çekme modülünü %3'ten fazla değiştirebilir

2.6. Ön gerilme kuvveti

Gerilme-uzama diyagramının başlangıcında bir basamak bölgesinden kaçınmak için küçük pozitif bir ön gerilme (σ_0) gereklidir. Ön gerilme noktası σ_0 uzamanın sıfır noktasına karşılık gelir. Bu tanım, operatör veya ekipman etkilerinden bağımsız olan, test için tekrarlanabilir bir başlangıç noktası sağlar. Ön gerilme değeri için yapılan tanımlama aşağıdaki şekildedir:

a) İlgili gerilimlerin ölçümü için:

$$0 < \sigma_0 \leq \sigma / 100$$

b) Modül ölçümü için:

$$0 < \sigma_0 \leq Et / 2000$$

Diyagramdan kesilen uzamanın %0,05'ten küçük olduğu anlamına gelir.

2.7. Çekme test hızı ve gereklilikleri

ISO 527-1 standardının 9.6 bölümünde test hızı için şartlar tanımlanmıştır. ISO 527-2 standardında ise, ISO 527-1 standardına atıf yapılmıştır. Test hızını ilgili malzeme için uygun ISO 527-1 standardında verilen Tablo 1'den seçilebilir veya ilgili taraflar arasında hız için bir değer kararlaştırılabilir.

Tablo 1. ISO 527-1 standardına göre tavsiye edilen test hızları

Test hızı, v mm/dak	Tolerans %
0,125 0,25 0,5 1 2 5 10	± 20
20 50 100 200 300 500	± 10

Çekme modülünün ölçümü için seçilen test hızı, dakika başına gösterge uzunluğunun % 1'ine mümkün olduğunca yakın bir şekil değişim oranı sağlanmalıdır. Farklı numune türleri için elde edilen test hızı, ISO 527'nin test edilen malzeme türüne göre ilgili bölümünde verilir.

Çekme modülünün tespiti için akma noktasına kadar olan gerilme-uzama diyagramının elde edilmesi sırasında çekme hızı ile akma noktası sonrasındaki özelliklerin belirlenmesinde kullanılan çekme hızları farklı belirlenebilir. Çekme modülü tayini için uzamalar belirlendikten sonra ($\varepsilon_2 = 0,25$ % uzamaya kadar), testi sürdürmek için aynı test numunesi kullanılabilir.

Test numunesini farklı bir hızda test etmeden önce çekme yükünü boşaltmak tercih edilir, ancak çekme modülü belirlendikten sonra yükü boşaltmadan hızı değiştirmek yöntemi de kabul edilebilir. Test sırasında hızı değiştirirken, hızdaki değişimin $\varepsilon \leq$ % 0,3 uzama olduğuna dikkat edilmelidir. Standartta göre hız değişimlerinde bu uzama değerinin üzerinde olan uzamalara müsaade edilmez.

Test raporlarından test hızının aşağıdaki formata uygun olarak belirtilmesi tarif edilmiştir. Yazım formatı: Çekme test standardı/Numune tipi/Test hızı (mm/min).

Örnek: ISO 527-2/1A/50 olabilir.

ISO 527-1 standardında 1A ve 1B numune tipleri için çekme modülünün ölçümünde test hızı 1 mm/dak olması gerektiği ilave olarak belirtir. Ayrıca bu, yaklaşık %1 min-1'lik bir uzama oranına karşılık gelir.

ISO 527-1 standardında test hızının etkili olduğu bazı tanımlar yapılmıştır. Standartta göre Poisson Oranı 5 mm/dak hızında belirlenmelidir.

ISO 527-1 standardına göre uzama verilerinin kaydedilmesinde, sensörden göstergeye iletim için gerekli olan minimum veri toplama frekansı (f_{min}) aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. Test makinasının kayıt frekansı en az bu veri hızı (f_{min}) değerine eşit olmalıdır.

$$f_{min} = \frac{v}{60} \cdot \frac{L_0}{L \cdot r} \quad (1)$$

f_{min} , hertz (Hz) biriminde ifade edilen frekans,

v , mm/dak olarak ifade edilen test hızı,

L_0 / L , ilk ölçü uzunluğu L_0 ile ilk çeneler arası mesafe L arasındaki orandır;

r , doğru veri elde etmek için gereken uzama sinyalinin milimetre (mm) biriminde ifade edilen minimum çözünürlüğüdür. Tipik olarak, doğruluk değerinin yarısı daha iyidir.

Kuvvet verilerinin kaydedilmesinde ise gerekli kayıt hızı, test hızına, uzama aralığına, doğruluğa ve ilk çeneler arası mesafesine bağlıdır. Çekme modülü, test hızı ve çeneler arası mesafe, kuvvetin artış hızını belirler. Kuvvet artış hızının gereken doğruluğa oranı kayıt frekansını belirler. Kuvvetin artış hızı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$\dot{F} = \frac{E_t \cdot A \cdot v}{60 L} \quad (2)$$

F, Newton bölü saniye (N/s) olarak ifade edilen, kuvvetin artış hızı,
 E_t , megapaskal (MPa) biriminde ifade edilen çekme modülü,
A, test numunesinin milimetre kare (mm^2) olarak ifade edilen kesit alanı,
v, milimetre bölü dakika (mm/dak) olarak ifade edilen test hızı,
L, milimetre (mm) biriminde ifade edilen çeneler arası mesafesidir.

Doğruluk gereksinimini ekstansometre ile aynı şekilde tanımlamak için çekme modülü aralığındaki kuvvet farkını kullanarak, ilgili kuvvetin % 1 dahilinde belirleneceği varsayılır ve Formül (3) ve (5) uygulanır.

Çekme modülü belirleme aralığındaki kuvvet farkı:

$$\Delta F = E_t \cdot A \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) = E_t \cdot A \cdot \Delta \varepsilon \quad (3)$$

Doğruluk (% 1'in yarısı):

$$r = 5 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta F = 5 \cdot 10^{-3} \cdot E_t \cdot A \cdot \Delta \varepsilon \quad (4)$$

Kayıt frekansı:

$$f_{force} = \frac{\dot{F}}{r} = \frac{E_t \cdot A \cdot v}{E_t \cdot A \cdot \Delta \varepsilon \cdot 60 \cdot L \cdot 5 \cdot 10^{-3}} \quad (5)$$

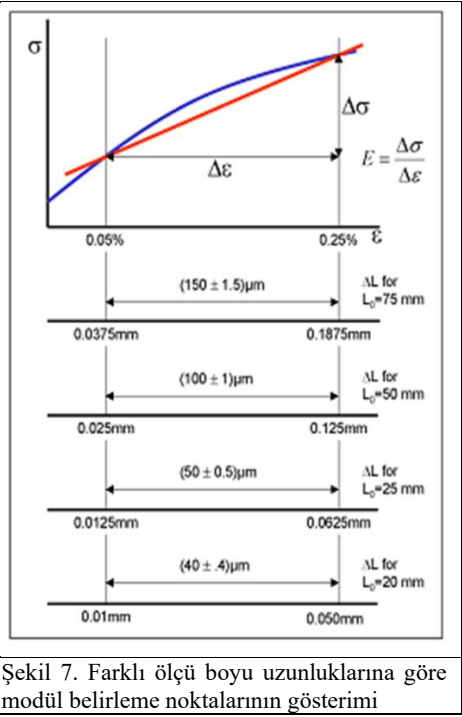
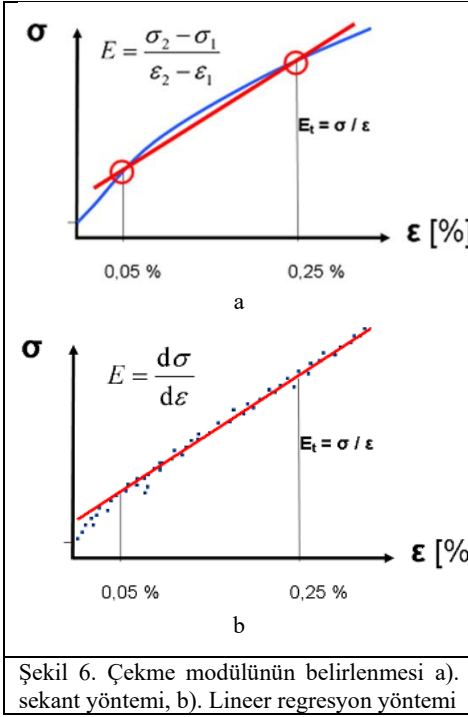
Örneğin, $v = 1$ mm/dak, $\Delta \varepsilon = 2 \times 10^{-3}$ ve $L = 115$ mm ile, $f_{force} = 14,5$ Hz'lik bir kayıt frekansı bulunur.

2.8. Çekme cihazı gereklilikleri

ISO 527-1 standardında çekme cihazının kuvvet kalibrasyonunun ISO 7500-1 standardına uygun olarak yapıp sınıf değerinin “sınıf 1” veya daha iyi olması gerektiğini tanımlar. Benze biçimde ekstansometre cihazının kalibrasyonunun ISO 9513 standardına uygun olarak yapıp sınıf değerinin “sınıf 1” veya daha iyi olması gerektiğini belirtir [16,17]. Ancak ekstansometreler için bazı ilave gereklilikler çekme modülünün belirlenmesi bölümünde tanımlanmıştır.

2.9. Çekme modülünün belirlenmesi

Çekme modülü iki uzama değeri arasından hesaplanmalıdır. Gerilim-uzama diyagramında % 0.05 ile % 0.25 uzama değerleri arasındaki eğimdir. Tanımlanan bu iki nokta arasında sekant veya lineer regresyon hesabı ile hesaplanabilir (şekil 6).



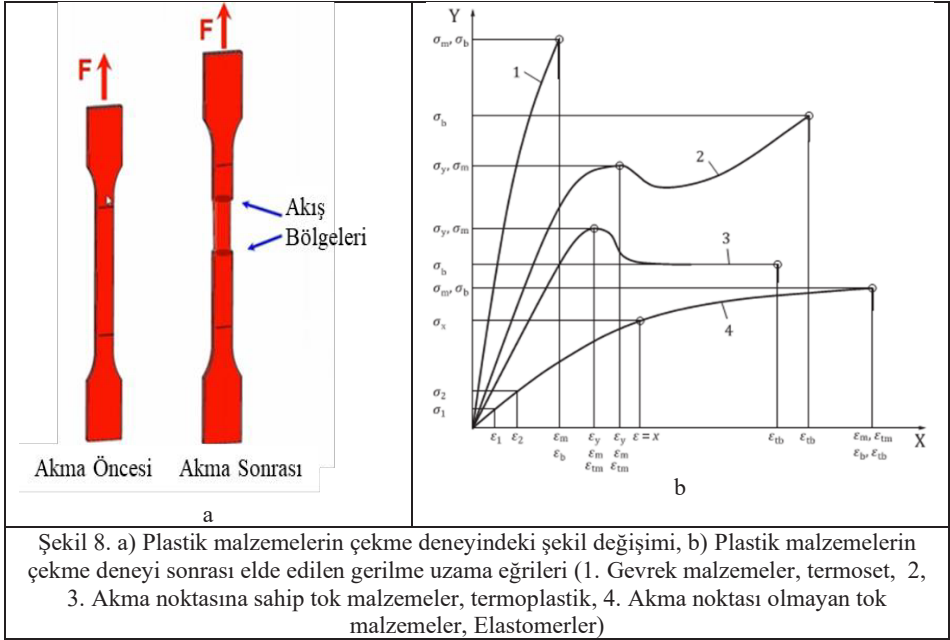
Modül ölçümü, son derece hassas bir ekstansometre gerektirir. Modül belirlemeleri için uzama ölçümü ISO 527-1, madde 5.1.5.1 gereksinimleri detaylandırılmıştır. ISO 527 göre standart numune tipleri için ekstansometre için doğruluk gereksinimi, tip 1A için $\pm 1,5 \mu\text{m}$ ve tip 1B için $\pm 1,0 \mu\text{m}$ 'dir. Daha küçük ölçü uzunluklarına sahip daha küçük numuneler için gereksinimler daha yüksek olur. Bu sebepten ISO 9513 standardına göre kalibre edilmiş ve sınıf 1 cihaz bazı ölçümler için uygun olmayacaktır. ISO 527-1 ek C kısmında modül ölçümü gereklilikleri sınıflandırmaya ek olarak olması gereken şartlar tanımlanmıştır. Ayrıca ek C kısmında ekstansometre cihazının kalibrasyonu için kullanılan referans cihazın ISO 9513 standardına göre sınıf 0,2 olması gerektiği de ifade edilmiştir.

2.10. Çekme deneyi

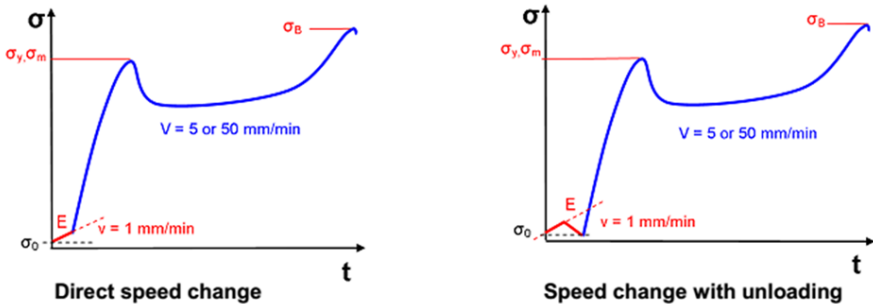
Plastik malzemelere çekme kuvveti uygulandığında akma değerine kadar homojen bir şekil değişimi gözlemlenir. Akma noktası aşıldıktan sonra bölgesel olarak incelme veya akma oluşur. Çekme kuvvetinin artması ile bölgesel incelme numunenin diğer bölgelerine de yayılır ve genellikle numunenin orta kısmında kopma oluşur. Çekme deneyi sonucunda farklı plastik malzeme türleri için elde edilen gerilme-uzama grafikleri Şekil 8'de verilmiştir [13,18-20].

Çekme testi esnasında çeneler hazırlanan plastik numunelerin üzerine sıkıldığında, genellikle istenmeyen sıkıştırma kuvvetleri oluşur. Bu kuvvetler, çok küçük olmasına rağmen, doğru bir büyüklükte uygulanmaz ise test

sonuçlarını etkileyebilir. Numune yerleştirildikten sonra sıkıştırma kuvvetleri ve ön yük kuvveti test sonuçları üzerinde oldukça etkilidir.



Modül belirleme işlemi tamamlandıktan sonra hız değiştirilmelidir. Tipik hızlar 5 mm/dak veya 50 mm/dak'dır. ISO 527-1 artık modül belirleme işleminden sonra hız değişikliğine açıkça izin veriyor (madde 9.6). Modül belirleme ve diğer test sonuçları tek bir numuneden belirlenebilir. Hız değişimi % 0,3 veya altındaki uzamalarda meydana gelmelidir. Numuneyi farklı bir hızda test etmeden önce yükü boşaltmak tercih edilebilir, Ancak hızı boşaltmadan değiştirmek de kabul edilebilir [13].



Şekil 9. Modül belirleme noktasından sonra hız değişimi a) doğrudan hız değişimi, b) yükü boşaltarak hız değişimi

Plastik malzemelerin çekme deneyi sonucunda 4 farklı gerilme-uzama eğrisi ile karşılaşılır (Şekil 8b). Bunlar:

- 1. (Eğri a) Gevrek malzemeler, termoset,
- 2, 3. (Eğri b ve c) Akma noktasına sahip tok malzemeler, termoplastik,
- 4. (Eğri d) Akma noktası olmayan tok malzemeler, Elastomerler

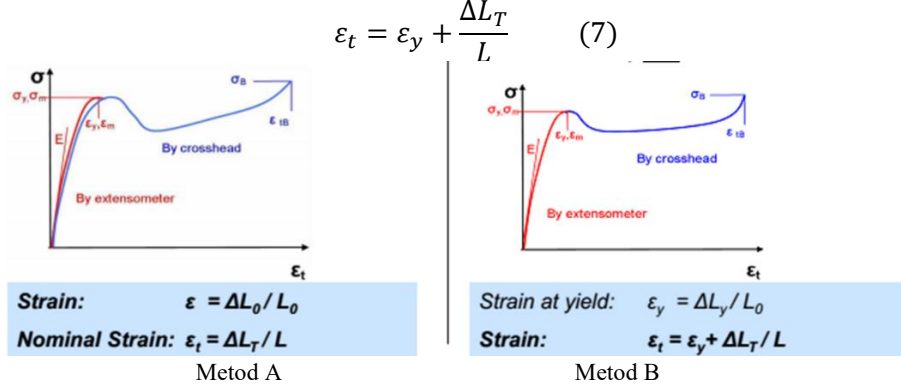
Bir akma noktası geçildikten sonra belirlenen uzama sonuçları “Nominal uzama” olarak ölçülür. Nominal uzama: herhangi bir akma noktasının ötesindeki gerilmeler için LoT ile ilgilidir. Lo ile ilgili akma noktasına kadar uzamalar

ISO 527-1 standardı nominal uzamayı ölçmenin iki yolunu tanımlar (Şekil 10). Bu metodlar:

- Metot A
1993'ten beri ISO 527'de kullanılmaktadır Gerilme-uzama diyagramlarında tüm sonuçları doğru bir şekilde göstermek için iki grafiğe ihtiyaç duyar.

$$\varepsilon_t = \frac{L_T}{L} \quad (6)$$

- Metot B
ISO 527 standardının yeni yöntemidir. Çok farklı tip numunelerle (1A ve 1B tipleri) kullanım için tercih edilir. Tüm sonuçlar tek bir şemada gösterilir. Gerilmenin tek bir tanımı vardır.



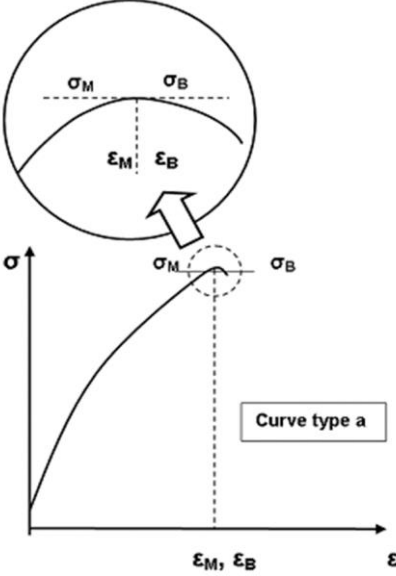
Şekil 10. Uzama belirlenmesinde kullanılabilen Metod A ve Metod B farklılıkları

“a” tipi çekme deney eğrisinde tüm sonuçlar tek bir noktada belirlenir (Şekil 11). Eğri tipi a’ dan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

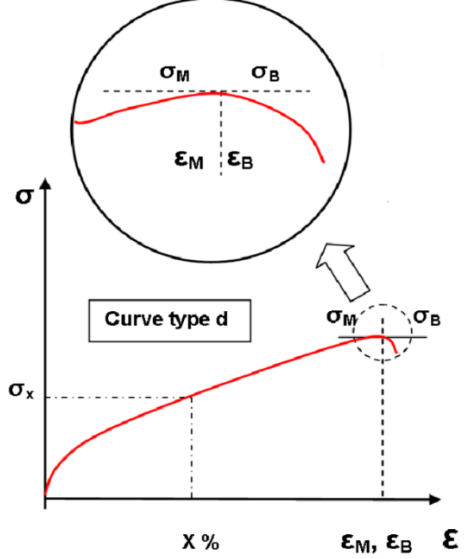
- Çekme modülü
- Maksimum gerilme
- Maksimum uzama
- Kopma gerilmesi ve uzaması

“d” tipi çekme deney eğrisinde de tüm sonuçlar tek bir noktada belirlenir (Şekil 12). Eğri tipi d’den elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Modüller
- Maksimum gerilme ve maksimum uzama
- Kopma gerilmesi ve uzaması
- % X uzamadaki gerilme değeri
-



Şekil 11. “a” tip çekme eğrisinden elde edilen sonuçların gösterimi



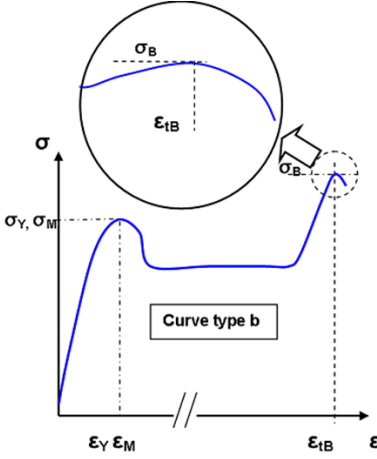
Şekil 12. “d” tip çekme eğrisinden elde edilen sonuçların gösterimi

“b” ve “c” tipleri çekme deney eğrisi gösteren katkısız termoplastik malzemeler tipik olarak bir akma noktası gösterir. Akma noktasında homojen olmayan uzama dağılımı vardır. Akma noktası altında, uzama numunenin paralel kısmı içinde oldukça homojen bir şekilde dağılmıştır. Akma noktasına yaklaşıldığında, uzama oranı sınırlı bir alanda artarken diğer alanlarda azalır. Akma noktası geçildikten sonra, akış bölgelerinde çok yüksek uzama oranları gözlemlenebilir. Bu yerel uzama oranları, ortalama uzama hızından 10 kat daha fazla olabilir. Akma noktası geçildikten sonraki kısımda doğrudan uzama ölçümü, istatistiksel olarak güvenli olmayan sonuçlara yol açabilir.

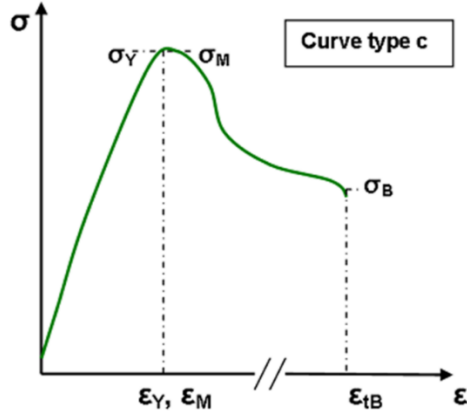
“b” tipi çekme deney eğrisi Şekil 13’de ve “c” tipi çekme deney eğrisi de Şekil 14’de verilmiştir. Eğri tipi “b” ve “c” den elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Modül, Et
- Akma gerilimi, σ_y
- Akma uzaması, ϵ_y
- Maksimum gerilme, σ_M
- Maksimum gerilmedeki uzama, e_M

- Kopma gerilmesi, σ_B
- Kopmadaki nominal uzama, ϵ_{tB}



Şekil 13. "b" tip çekme eğrisinden elde edilen sonuçların gösterimi



Şekil 14. "c" tip çekme eğrisinden elde edilen sonuçların gösterimi

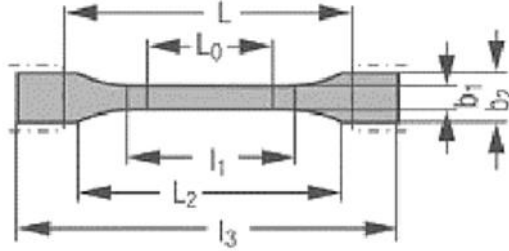
2.11. Test raporu

Plastik malzemelerin çekme deneyini sonucunda hazırlanacak test raporunda olmasında gerekenler aşağıda sıralanmıştır.

- ISO 527 standardının ilgili bölümüne atıf,
- test edilen malzeme tanımlanması için gerekli tüm veriler
- Numune biçiminin tanımı; ana boyutları, şekli, üretim yöntemi
- test numunesinin türü;
- test numunelerinin hazırlanma yöntemi ve imalat yöntemi
- numunenin kesildiği ürün veya yarı mamule göre oryantasyonu;
- test edilen test numunesinin numarası;
- şartlandırma ve test için standart ortam şartları
- test makinasının ve ekstansometrenin doğruluk derecelendirmesi (ISO 7500-1, ISO 9513 standartlarına göre)
- Ekstansometre veya uzama ölçüm cihazı tipi ve ölçü uzunluğu L_0
- kavrama cihazının tipi, kavrama mesafesi L ;
- test hızları;
- her bir deney numunesi genişliği, kalınlığı
- genişlik, kalınlık ve ölçülen özelliklerin ortalama değerleri
- standart sapma ve/veya varyasyon katsayısı ve/veya gerekirse ortalamanın güven sınırları;
- herhangi bir test numunesinin reddedilip reddedilmediği
- ölçüm tarihi.

2.12. ISO 527 grubu standartlarda tanımlanmış numune tipleri ve boyutları

Plastik malzemelerin çekme deneyini ele alan ISO 527 standartlarında tanımlanmış tüm numune tipleri ve boyutları Şekil 15, 16, 17 de verilmiştir [14].



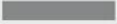
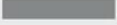
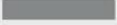


Standard	Type	l_3 mm	l_1 mm	b_2 mm	b_1 mm	h mm	L_0 mm	L mm	Shape
ISO 527-2	1A	≥ 150	80 ± 2	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	115	
ISO 527-2	1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2 (preferred)	50 ± 0.5	$l_2 + 5^{\text{a}}$ $l_2 = 106 \dots 120$	
ISO 527-2	1BA	≥ 75	30 ± 0.5	10 ± 0.5	5 ± 0.5	≥ 2	25 ± 0.5	$l_2^{\text{a}} + 2^{\text{a}}$ $l_2 = 58 \pm 2$	
ISO 527-2	1BB	≥ 30	12 ± 0.5	4 ± 0.2	2 ± 0.2	≥ 2	10 ± 0.2	$l_2 + 5^{\text{a}}$ $l_2 = 23 \pm 2$	
ISO 527-2	5A	≥ 75	25 ± 1	12.5 ± 1	4 ± 0.1	≥ 2	20 ± 0.5	50 ± 2	
ISO 527-2	5B	≥ 35	12 ± 0.5	6 ± 0.5	2 ± 0.1	≥ 1	10 ± 0.2	20 ± 2	

Şekil 15. Termoplastik ve termoset malzemeler için numune boyutları

Standard	Type	l_3 mm	l_1 mm	b_2 mm	b_1 mm	h mm	L_0 mm	L mm	Shape
ISO 527-3	2	≤ 150			10	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
		≤ 150			12	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
		≤ 150			13	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
		≤ 150			15	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
		≤ 150			20	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
		≤ 150			25	≤ 1	50 ± 0.5	100 ± 5	
ISO 527-3	5	≥ 115	33 ± 2	25 ± 1	6 ± 0.4	≤ 1	25 ± 0.25	80 ± 5	
ISO 527-3	1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.5	10 ± 0.2	≤ 1	50 ± 0.5	115 ± 5	
ISO 527-3	4	≥ 152	50 ± 0.5	38	25.4 ± 0.1	≤ 1	50 ± 0.5	73.4	

Şekil 16. Plastik ince yaprak ve film malzemeler için numune boyutları

Standard	Type	I_3 mm	I_1 mm	b_2 mm	b_1 mm	h mm	L_0 mm	L mm	Shape
ISO 527-4	1B	≥ 150	60 ± 0.5	20 ± 0.2	10 ± 0.2	4.0 ± 0.2	50 ± 0.5	115	
ISO 527-4	2	≥ 250		25 ± 0.5 or 50 ± 0.5		2...10	50 ± 1	150 ± 1	
ISO 527-4	3	≥ 250		25 ± 0.5 or 50 ± 0.5		2...10	50 ± 1	136	
ISO 527-5	A	250		15 ± 0.5		1 ± 0.2	50 ± 1	136	
ISO 527-5	B	250		25 ± 0.5		2 ± 0.2	50 ± 1	136	

Şekil 17. Güçlendirilmiş plastik kompozit malzemeler için numune boyutları

3. Sonuç ve Öneriler

Malzeme test makinalarında doğru ve standartlara uygun bir deney gerçekleştirebilmek için pek çok parametreye dikkat edilmesi gerekmektedir. Öncelikle uygun deney cihazı (kuvvet dönüştürücü, ekstansometre, yazılım) kullanılmalıdır. Daha sonra tanımlanan standartlara uygun olarak deney gerçekleştirilerek ölçüm sonuçları raporlanmalıdır. Bu çalışma ile plastik malzemede çekme deneyi yapacak kişilerin dikkat etmesi gereken hususlar ve anlaşılması zor olan kısımların daha uygulamaya yönelik olarak çözümler paylaşılmıştır. Bu çalışma plastik malzemede çekme deneyi üzerine araştırma yapanlar için potansiyel bilgilendirici, eğitici ve pratik bir rehber doküman oluşturulması amaçlanmıştır.

Kaynaklar

- [1]. ISO 527-1, 2019, Plastics-Determination of tensile properties - Part 1: General principles
- [2]. ISO 527-2, 2012, Plastics-Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics
- [3]. ASTM D638, 2014, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- [4]. ISO 527-3:2018, Plastics - Determination of tensile properties - Part 3: Test conditions for films and sheets
- [5]. ISO 527-4:2021, Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites
- [6]. ISO 527-5:2021, Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites
- [7]. ISO 20753:2018, Plastics - Test specimens
- [8]. ISO 37: 2017, Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties
- [9]. ISO 293: 2004, Plastics - Compression moulding of test specimens of thermoplastic materials
- [10].ISO 294 -1:2017, Plastics - Injection moulding of test specimens of thermoplastic materials - Part 1: General principles, and moulding of multipurpose and bar test specimens
- [11].ISO 16012: 2015, Plastics - Determination of linear dimensions of test specimens
- [12].ISO 23529: 2016, Rubber - General procedures for preparing and conditioning test pieces for physical test methods
- [13].Fahrenheit, H., Plastics ISO 527: Determination of tensile properties. 2018 testXpo. October 2018
- [14].Testing of Plastics and Rubber, Catalogue, Zwick/Roell, www.zwickroell.com
- [15].Aydemir, B., Taşcan, H., Camyurdu, C., O. Baran, A. Temiz, Metalik Malzemelerde Farklı Deney Hızlarının Sonuçlar Üzerine Etkilerinin Araştırılması, 2017, 2nd International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia (IMSTEC'17), October 11-13, 2017, Nevşehir, Turkey, S.155-160
- [16].ISO 7500-1, 2018, Metallic materials - Calibration and verification of static uniaxial testing machines - Part 1: Tension/compression testing machines - Calibration and verification of the force-measuring system
- [17].ISO 9513, 2012, Metallic materials - Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing
- [18].Aydemir, B., Taşcan, H., Camyurdu, C., Baran, O., Metalik malzemede farklı deney hızlarında gerçekleştirilen çekme deneyi sonuç raporu, UME-KV-17-02, Tübitak UME, 08.2017

- [19].Aydemir, B., Taşcan, H., Camyurdu, C., “Çekme deneyinde farklı uzama ölçme yöntemlerinin etkilerinin incelenmesi”, 2015, Metal Dünyası, Sayı 266, S.44-50, İstanbul
- [20].Aydemir, B., “Çekme deneyinde gerilme oranı veya uzama oranı olarak tanımlanan hızların sağlanabilmesi için hareketli tabla hızının belirlenmesi”, 4nd International Conference on Material Science and Technology in Kızılcahamam (IMSTEC'19), October 18-20, 2019, ANKARA, Turkey, s.261-264

Bölüm 8

Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbininde Çift Kafesli Azaltılmış ve Tam Derece Modelleri ile Arıza Analizlerinin İncelenmesi

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU¹
Mustafa DURSUN²

¹ Doç. Dr. Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

² Dr. Öğr. Üyesi Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Giriş

Günümüzde kullanılan fosil yakıtların fiyatlarındaki artış ve çevresel problemlerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en önemli olanlarından biriside rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretebilmek için çeşitli generatörler kullanılmaktadır. Bunların içerisinde moment ve aktif güç kontrolü daha iyi olan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri genellikle şebeke ile birlikte çalışmaktadır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri şebeke ile beraber çalışması esnasında bazı olumsuz durumlar ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu olumsuz durumların en önemlisi şebeke tarafında meydana gelen dengeli ve dengesiz arızalardır. Bu arıza durumlarında MW mertebesindeki ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinin zarar görmesini engellemek amaçlı olarak yapılan birçok benzetim çalışması bulunmaktadır. Benzetim çalışmasının performansı arttırmak ve geçici kararlılık çalışmalarında sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale gelmesi için Azaltılmış Derece Modeli (ADM) kullanılmaktadır.

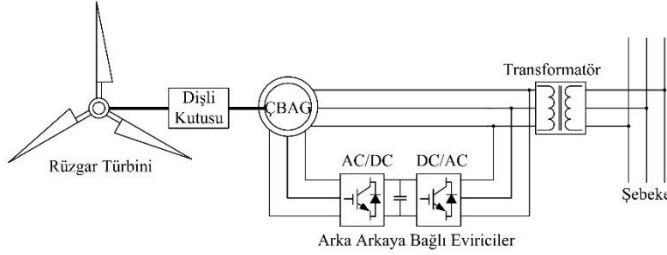
ADM'nin rüzgâr türbininde tek ve çok makinalı olarak kullanılması durumundaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Rotor tarafındaki ve şebeke tarafındaki evirici devreleri üzerinde ADM'in etkileri incelenmiş olup, tek ve çok makinalı sistemin şebeke tarafındaki arızalar karşısındaki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir [1-2]. ADM modeli tabanlı ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinde mekanik model ve güç modelleri geliştirilmiştir. Geçici kararlılık durumlarında salınımların bastırılması ve kapasiteyi arttırmada önemli bir avantaj sağlamıştır [3]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde geçici kararlılığa karşı ADM kullanarak nümerik ve seçici model analizleri kullanılmıştır. Kullanılan bu modellerin arızalara karşı etkili olduğu tespit edilmiştir. [4,5]. ADM tabanlı ÇBAG'de geçici kararlılık durumlarına karşı sistemi korumak amaçlı olarak rotor tarafındaki evirici devresinde akımı sınırlandırmak için kontrol modelleri geliştirilmiştir. Dört farklı çalışma bölgesine geliştirilen kontrol ünitelerinin arızalar esnasındaki vermiş olduğu etkiler incelenmiş olup, bulunan sonuçlar detaylı olarak yorumlanmıştır [6,7]. Rotor tarafındaki eviricinin yanı sıra şebeke tarafındaki evirici devresi arızalara karşı korumak için ve sistemde oluşan salınımları bastırmak için enerji depolama sistemi elemanları kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemi elemanlarından süperkapasitörün hem dengeli hem de dengesiz arızalara karşı etkili olduğu görülmüştür [8,9]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde ADM modeli kullanarak koruma devresi ünitesi geliştirilmiştir. Şebeke tarafındaki arıza esnasında hem ÇBAG hem de şebekenin zarar görmesi engellemek amaçlı olarak geliştirilen bu model ile geleneksel olarak kullanılan modelin karşılaştırmaları yapılmıştır [10,11]. ÇBAG'de ADM modeli kullanarak rotor ve şebeke tarafındaki evirici devresinde orta kısmında bulunan kondansatörün geçici durumda daha etkili bir şekilde kullanmak için farklı kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu kontrol modelinin geliştirilmesi ile aktif ve reaktif güç akışı geçici kararlılık durumları için izlenmiştir [12]. ADM'nin ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde kullanım alanlarından birisi de elektriksel ve mekaniksel parametrelerin optimum değerinin belirlenmesidir. ADM'nin farklı

derece modellerinin geliştirilmesi ile geçici kararlılık durumları farklı senaryolar ile karşılaştırılmıştır. Hem elektriksel hem de mekaniksel parametrelerin neler olabileceği yorumlanmıştır [13]. ADM tabanlı rüzgâr türbininde dengeli ve dengesiz arızalara karşı etkinliği açısından bir diğer kullanım alanı optimum enerji dağılımıdır. Geçici kararlılık durumlarında sistemin kararlı olarak çalışması için evirici devrelerinde güç alış-verişinin belli bir düzen içerisinde olmasının önemli olacağı ortaya çıkarılmıştır [14]. ADM tabanlı rüzgâr türbinin frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı analizlerinde de yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Özellikle sistemin frekans kararlılığını bulmak için ADM kullanılarak öz değer analizleri ve dinamik akı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerilim kararlılığı analizinde de ADM'nin sistemde kullanılan lineer olmayan yük modellerini üzerindeki etkileri ile iletim ve dağıtım mertebesindeki arıza analizleri değerlendirilmiştir [15,16]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde gerilim dengesizliği, harmonik ve titreşim analizlerinde ADM'nin etkileri detaylıca incelenmiştir. ADM modelin kullanılması ile gerilim dengesizliğinin ortadan kalktığı, harmonik ve titreşim analizlerinde de akım ve gerilim değerlerinde önemli bir iyileşme olduğu görülmüştür [17]. ÇBAG tabanlı ADM'nin geçici kararlılık çalışmalarda diğer kullanım alanları ile Tam Derece Modeli (TDM) ile farklı analizlerde karşılaştırmaları yapılmaktadır. Özellikle lineer olmayan yük modelleri, dengeli arıza ve farklı zamanlardaki dengeli arıza analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ADM'nin TDM modele göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [18-20].

Yapılan bu çalışmada ADM'nin literatürdeki kullanımından farklı olarak geliştirilmesi amaçlanmıştır. ADM'nin rotor tarafı modellemesi giriş kısmında verilen literatür çalışmalarında tek kafesli (TK) olarak kullanılmıştır. TK olan rotor devresi Çift Kafesli (ÇK) olarak geliştirilmiş olup, hem TDM modelde hem de ADM modelde kullanılması ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar için dengeli olan 3 faz arızası ve dengesiz olan 2 faz arızası kullanılmıştır. TDM ve ADM modellerin karşılaştırması 34.5 kV bara gerilimi ile ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde çıkış gerilimi, açısal hız, elektriksel moment ve d-q eksen stator akım parametreleri kullanılmıştır.

TDM ve ADM Tabanlı Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) Modeli

ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini devre modeli Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini devre modeli

ÇBAG generatör, dişli kutusu ve arka arkaya bağlı evirici devresinden oluşmaktadır. Arka arkaya bağlı evirici devresi şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devresi şeklinde ikiye ayrılmaktadır. ÇBAG'nin statoru doğrudan şebekeye bağlıdır. Rotor tarafı arka arkaya bağlı olan evirici devresi üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Arka arkaya bağlı olan şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devreleri ortak bir DC barada birleşmektedir. ÇBAG'nin davranışı şebeke tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici devrelerinin sürekli ve geçici çalışma durumlarına bağlı olarak değişmektedir. Arka arkaya bağlı olan eviricilerin kontrolü genlik ve faz açısına bağlıdır. Çünkü eviriciler bunlara bağlı olarak aktif ve reaktif güç kontrolünü sağlarlar.

Rotor modeli rüzgâr hızının, kanat uç hız oranının ve kanat eğim açısının bir fonksiyonu olan rüzgârdan çekilen mekanik gücü ifade etmektedir. Rüzgâr türbini mekanik güç ifadesi denklem 1’de gösterilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p(\lambda, \theta) \quad (1)$$

Burada, P_w rüzgâr türbini rotoru tarafından çıkarılan mekanik gücü, ρ havanın yoğunluğunu, A rotorun süpürme alanını, u rüzgâr hızını, C_p güç katsayısını ifade etmektedir. Güç katsayısı, rotor kanatlarının hem uç hız oranını (λ) hem de eğim açısının (θ) bir fonksiyonu olarak rotor aerodinamiğini ifade etmektedir. Uç hız oranı, kanat uç hızı ile rüzgâr hızı arasındaki oran bağıntısı denklem 2’de gösterilmiştir.

$$\lambda = \frac{w_r R}{u} \quad (2)$$

Burada, w_r rotor hızını, R rüzgâr türbini rotor yarıçapıdır. Rotor hızı belirli bir uç hız oranı için meydana gelen güç katsayısı maksimum olması sağlandığında rüzgârdan elden edilen güç maksimize edilir.

DFIG rüzgâr türbininin kontrol sistemi çeşitli rüzgâr hızları için çıkış gücünü en üst düzeye çıkaracak şekilde değişken hızda çalışmaktadır. Bunu da optimum güç çıkarma eğrisine göre belirlemektedir. Optimum güç çıkarma ifadesi denklem 3'de gösterilmiştir.

$$P_{op} = K_{op} w_r^2 \quad (3)$$

Burada, P_{op} optimum güç, K_{op} kullanılması gereken optimum katsayıdır.

Rüzgâr türbini yüksek rüzgârlar için çıkış gücünü generatörün nominal gücüyle sınırladığından güç-hız eğrisi nominal güç olarak ifade edilmektedir [21].

ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde generator modeli olarak geleneksel olan TDM kullanılmaktadır. TDM d-q eksen referans çatısı altında modellenmektedir. Referans çatı altında hesaplama kolaylığı açısından park dönüşüm modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra hesaplamalar p.u. cinsinden yapılmaktadır. Rotor tarafı tek kafes şeklinde oluşturulmaktadır. TK olan bu modelde d-q eksen stator ile rotor ve moment ifadeleri denklem 4 ile denklem 9 arasında gösterilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - w_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (4)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + w_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (5)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s w_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + s w_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (7)$$

$$M = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \quad (8)$$

Burada, v_{ds} , v_{dr} , v_{qs} , v_{qr} d-q eksen stator ve rotor gerilimleri, i_{ds} , i_{dr} , i_{qs} , i_{qr} d-q eksen stator ve rotor akımları, λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} , λ_{qr} d-q eksen stator ve rotor manyetik akıları, R_s stator direnci, R_r rotor direnci, s kayma, M ise momenttir. TK ÇBAG modelde d-q eksen akı-endüktans ifadeleri denklem 9 ile denklem 12 arasında gösterilmiştir.

$$\lambda_{ds} = (L_s + L_m)i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (9)$$

$$\lambda_{qs} = (L_s + L_m)i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (10)$$

$$\lambda_{dr} = (L_r + L_m)i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (11)$$

$$\lambda_{qr} = (L_r + L_m)i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (12)$$

Burada, L_s stator endüktansı, L_r rotor endüktansı ve L_m manyetik endüktansdır. ÇBAG'de generatörde modellenen ADM geçici kararlılık esnasında benzetim performansı arttırdığı için genellikle tercih edilmektedir. ADM kullanım amaçlarından biriside stator dinamiği sağlamasıdır. ADM d-q eksen stator akı türevlerinin ihmal edildiği bir geçici reaktansın arkasında bir geçici gerilim kaynağının oluşturulması ile elde edilmektedir. Bunun yapılmasındaki asıl amaç ise dc bileşeninin stator geçici akımından çıkarılmasıdır [22-25]. ADM modelde kullanılan eşitlikler denklem 13 ile denklem 19 arasında gösterilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - X' i_{qs} + e_{ds} \quad (13)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + X' i_{ds} - e_{qs} \quad (14)$$

$$\frac{de_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_0} [e_{ds} - (X - X') \times I_{qs}] \quad (15)$$

$$+ s \times w_s \times e_{qs} - w_s \times \frac{L_m}{L_m + L_s} \times v_{dr}$$

$$\frac{de_{qs}}{dt} = -\frac{1}{T_0} [e_{qs} + (X - X') \times I_{ds}] \quad (16)$$

$$- s \times w_s \times e_{ds} + w_s \times \frac{L_m}{L_m + L_s} \times v_{qr}$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + s w_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (17)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - s w_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (18)$$

$$M = e_{ds} i_{qs} + e_{qs} i_{ds} \quad (19)$$

Burada, e_{ds} ve e_{qs} stator gerilim kaynağı, X' geçici reaktans, X stator reaktansı, w_s açılma hızıdır. ADM'nin geçici reaktans ifadesi ve geçici açık devre zaman sabiti ifadeleri sırasıyla denklem 20 ve denklem 21'de gösterilmiştir.

$$X' = w_s \left((L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \right) \quad (20) \quad T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} \quad (21)$$

ÇK ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininde akım dış iletkenen aktığında stator ile sıkı bir şekilde bağlanmaktadır. Bu yüzden daha küçük bir sızıntı reaktansı oluşmaktadır, ancak bakır çubuğun daha küçük bir kesiti nedeniyle daha yüksek direnç göstermektedir. Başka bir şekilde ifade edilirse, akım daha derindeki çubuktan aktığında çok hafif bir şekilde statora bağlanarak daha büyük bir kaçak reaktansı oluşturmaktadır, ancak bakır çubuğun büyük bir kesiti nedeniyle daha küçük direnç göstermektedir. ÇK ÇBAG modelde rotor devresi birbirine paralel iki ayrı devre şeklinde gösterilmektedir. Çift kafesli bir ÇBAG'nin matematiksel modeli TK bir generatörün birim başına d-q modelinin türetilmesine çok benzeyen bir şekilde geliştirilmektedir. Oluşturulan bu model TDM'ye uygulanmıştır. Bu modelleme aşağıda verilen varsayımlara göre oluşturulmaktadır [26,27].

- Nüve ve mekanik kayıplar ihmal edilmiştir.
- Makine simetriktir.
- Her iki rotor sargısı da manyetik olarak bağlanmıştır ve harmoniklerin etkileri ihmal edilmektedir.
- İki kafesin her biri bağımsız uç halkaları tarafından kısa devre edilmektedir.
- Rotor çubukları demirden yalıtıldığı için çubuklar arası akım akmamaktadır.
- Doygunluk etkisi ve diğer doğrusal olmayan durumlar ihmal edilmektedir.

ÇK ÇBAG'nin temel diferansiyel denklemleri d-q referans çerçevesinde ifadeleri denklem 22 ile denklem 27 arasında gösterilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - w_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (22)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + w_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (23)$$

$$0 = R_{r1} i_{dr1} - s w_s \lambda_{qr1} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr1} \quad (24)$$

$$0 = R_{r1}i_{qr1} - sw_s \lambda_{dr1} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr1} \quad (25)$$

$$0 = R_{r2}i_{dr2} - sw_s \lambda_{qr2} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr2} \quad (26)$$

$$0 = R_{r2}i_{qr2} - sw_s \lambda_{dr2} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr2} \quad (27)$$

ÇK ÇBAG d-q eksen akı-endüktans ifadeleri denklem 28 ile denklem 33 arasında gösterilmiştir.

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr1} + L_m i_{dr2} \quad (28)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr1} + L_m i_{qr2} \quad (29)$$

$$\lambda_{dr1} = L_m i_{ds} + (L_{r1\sigma} + L_{12}) i_{dr1} + L_{12} i_{dr2} \quad (30)$$

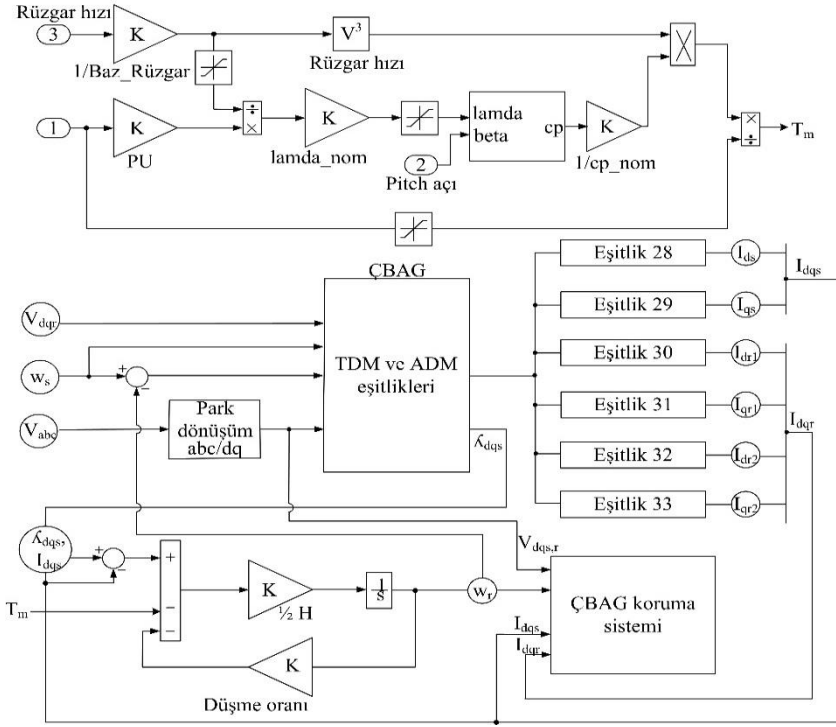
$$\lambda_{qr1} = L_m i_{qs} + (L_{r1\sigma} + L_{12}) i_{qr1} + L_{12} i_{qr2} \quad (31)$$

$$\lambda_{dr2} = L_m i_{ds} + L_{12} i_{dr1} + (L_{r2\sigma} + L_{12}) i_{dr2} \quad (32)$$

$$\lambda_{qr2} = L_m i_{qs} + L_{12} i_{qr1} + (L_{r2\sigma} + L_{12}) i_{qr2} \quad (33)$$

Burada, i_{dr1} ve i_{qr1} d-q eksen tek kafes rotor akımı, i_{dr2} ve i_{qr2} d-q eksen çift kafes rotor akımı, $L_{r1\sigma}$ tek kafes rotor endüktansı, L_{12} tek kafes rotor etkileşim endüktansı, $L_{r2\sigma}$ çift kafes rotor endüktansıdır. ADM tabanlı olarak elde edilen ÇK model bu şekilde elde edilmektedir. ADM tabanlı ÇBAG'de ise denklem 17 ve denklem 18 ifadelerin ÇK modele göre değiştirilmesi ile elde edilmiş diğer bloklar üzerinde değişiklikler yapılarak oluşturulmaktadır.

ÇBAG tabanlı Rüzgâr türbini elektriksel ve mekaniksel kısımdan oluşmaktadır. Elektriksel kısımda stator tarafındaki evirici ve rotor tarafındaki evirici kısmı bulunurken, mekaniksel kısımda türbin pitch açısı kontrolü bulunmaktadır. TDM ve ADM Şekil 2'de gösterilmiştir.

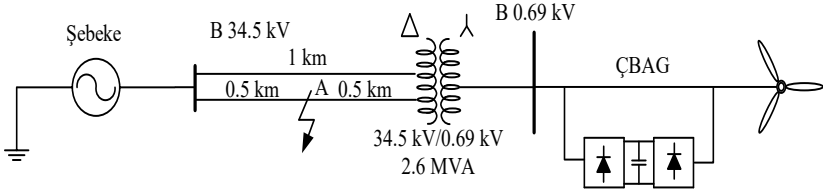


Şekil 2. ÇBAG’de TDM ve ADM

Şekil 2’de kayma ve açılal hız bloklarının yanısıra, d-q eksen stator-rotor gerilim ve akım denklemler eklenmiştir. ADM kısmında düşük gerilim iyileştirme performansını için maksimum akım seviyesini ayarlama için gerilim kaynağı blokları kullanılırken, TDM kısmında ise akı modelleri kullanılmaktadır. ADM’de kullanılan gerilim kaynağında stator akı türevleri ihmal edilmektedir. ADM ve TDM’de çift kafes modelleri geliştirilmiştir. Çift kafes modelde rotor akımları her iki modelde rotor devresinin ikiye bölünmesi ile oluşturulmaktadır. Şekil 2’de kullanılan diğer önemli bölüm ÇBAG koruma sistemidir. Koruma sisteminde düşük veya yüksek açılal hızda sistem korumasını akım ve gerilime göre ayarlamaktadır. Belli bir açılal hızın altına düştüğü veya yükseldiği durumlarda ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini şebekeden ayırmaktadır.

Benzetim Çalışması

0.5 MW gücündeki ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinin şebeke bağlantısının sağlandığı test sistemi Şekil 3’de verilmiştir.

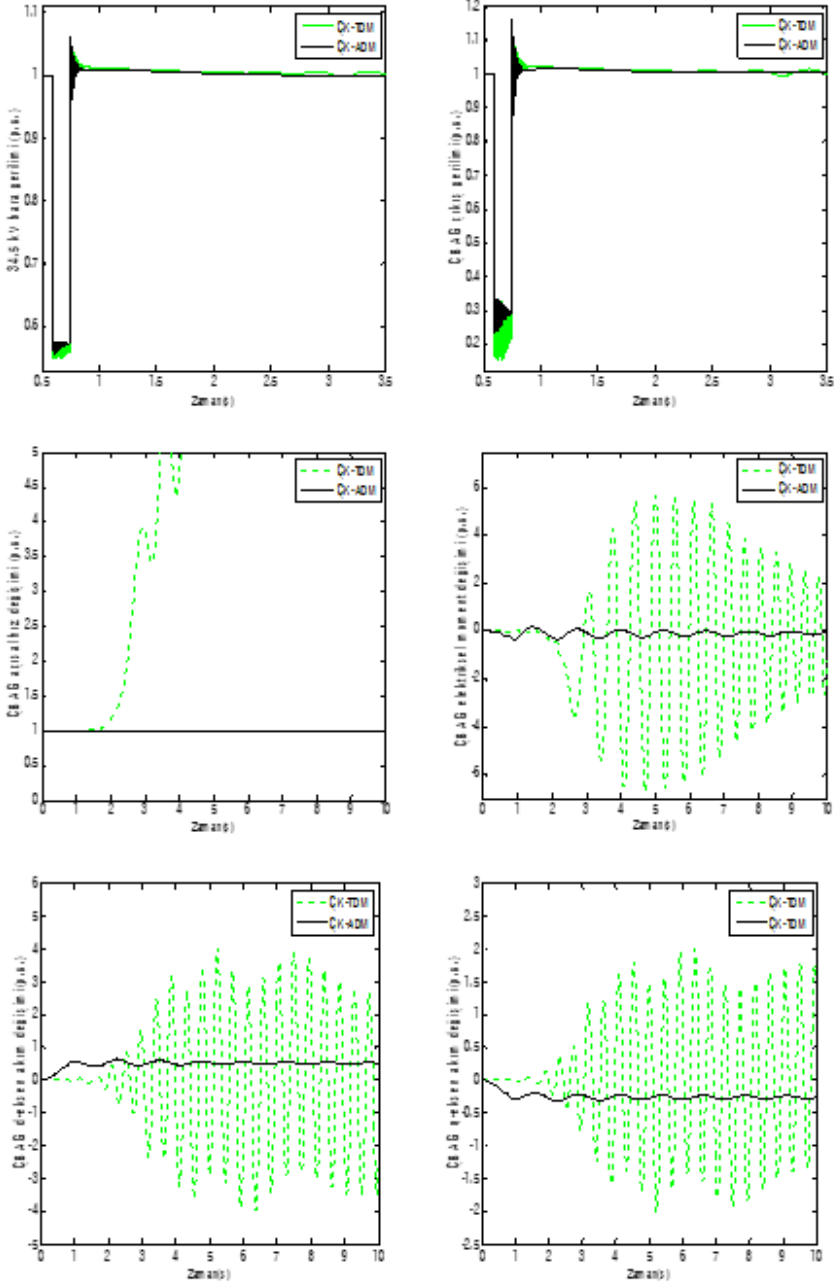


Şekil 3. 0.5 MW gücündeki ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinin şebeke bağlantısının sağlandığı test sistemi

Şekil 3’de verilen sistemde ÇBAG’de 2 farklı model kullanılmıştır. Bunlar ÇK-TDM ve ÇK-ADM’dir. Rüzgâr türbini 34.5 kV şebekeye 2.6 MW, 0.69 kV Y/34.5 kV Δ değerindeki yükseltici tip transformatör ile bağlanmıştır. Transformatörün doyum oranları ihmal edilmektedir. Bu çalışmada rüzgâr hızı 8 m/sn olarak kullanılmıştır. 34.5 kV’luk şebekenin kısa devre gücü 2500 MVA, X/R oranı 7 olarak seçilmiştir. ÇBAG’de stator direnci 0.00706 ohm, ilk kafesteki rotor direnci 0.002 ohm, çift kafesteki rotor direnci 0.003 ohm, stator endüktansı 0.171 henry, ilk kafesteki rotor endüktansı 0.0624 henry, çift kafesteki rotor endüktansı 0.0936 henry olarak seçilmiştir. ÇBAG tarafındaki transformatör ile şebeke arasında 1 km uzunluğunda iki tane paralel hat kullanılmıştır. Aşağıda verilen hattın tam orta noktasında 3 faz ve 2 faz arızaları meydana gelmiştir. 0.6 saniye ile 0.75 saniyeler arasındaki 3 faz ve 2 faz arızaları karşılaştırmaları ÇK-TDM ve ÇK-ADM için gerçekleştirilmiştir.

Benzetim Çalışması Sonuçları

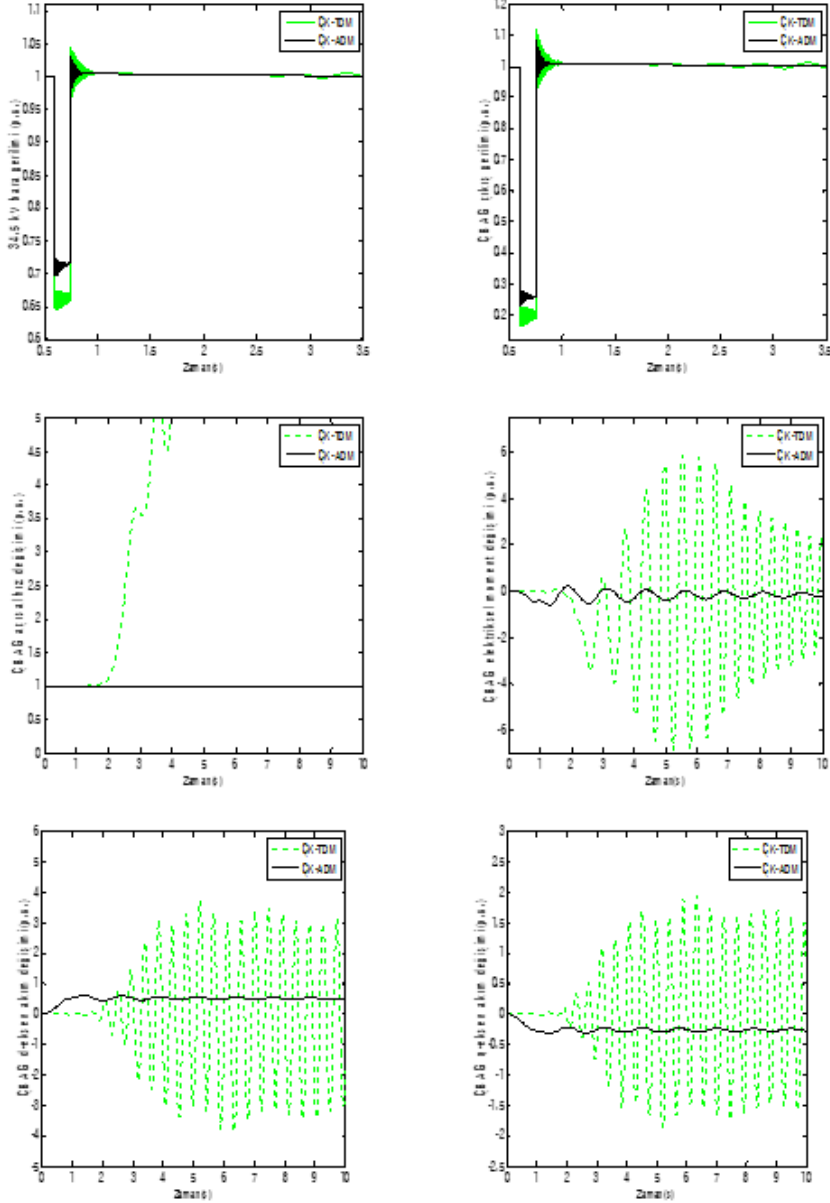
İlk analiz olarak ÇBAG’de uyarlanan ÇK modeli hem TDM hem de ADM üzerinde uygulanmıştır. Öncelikle 3 faz arıza analizinde karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Arıza süresi 0.6 saniye ile 0.75 saniyeler arasında belirlenmiştir. 3 faz arıza sonrasında ÇK-TDM ve ÇK-ADM karşılaştırmaları 34.5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, açısal hız, elektriksel moment ve d-q eksen stator gerilimlerinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 faz arızada ÇK-TDM ve ÇK-ADM karşılaştırması

3 faz arızasında 34.5 kV ve ÇBAG çıkış gerilimi incelendiğinde ÇK-TDM modelin kullanılmasında 34.5 kV bara gerilimi 0.53 p.u. seviyesine ÇBAG çıkış geriliminin 0.1 p.u. seviyesine düştüğü görülmektedir. ÇK-ADM'nin kullanılmasında 34.5 kV bara gerilimi 0.56 p.u. seviyesine ÇBAG çıkış geriliminin 0.28 p.u. seviyesine yükseldiği görülmüştür. ÇB-TDM'de açılmal hız yukarıya doğru salınım yaparken, ÇB-ADM'de sistemde salınımın oluşmadığı görülmektedir. ÇBAG elektriksel moment değişimlerinde ÇB-TDM'de salınımların -6.8 ile 5.8 p.u. arasında değiştiği görülürken, ÇB-ADM'de salınımların -0.2 ile 0.2 p.u. arasında değiştiği görülmüştür. ÇBAG d eksen stator akımı ÇB-TDM'de -4 ile 4 p.u. arasında, q eksen stator akımı -2 ile 2. p.u. arasında salınım yaptığı görülürken, ÇB-ADM'de d eksen stator akımı 0.3 ile 0.7 p.u. arasında, q eksen stator akımının -0.15 ile -0.35 p.u. arasında salınım yaptığı görülmüştür.

İkinci analiz ÇBAG'de geliştirilen ÇK-TDM ve ÇK-ADM dengesiz arıza çeşitlerinden 2 faz kısa devresinde gerçekleştirilmiştir. İlk analizdeki gibi arıza süresi 0.6 saniye ile 0.75 saniyeler arasındadır. 2 faz arızası sonucunda 34.5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, açılmal hız, elektriksel moment ve d-q eksen stator gerilimlerindeki değişimler Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 2 faz arızada ÇK-TDM ve ÇK-ADM karşılaştırması

0.6 ile 0.75 saniyeler arasındaki 2 faz arızada ÇK-TDM modelin kullanılması ile 34.5 kV bara geriliminin 0.665 p.u seviyesine, ÇBAG çıkış geriliminin 0.2 p.u. seviyesine düştüğü görülmüştür. ÇK-ADM'nin kullanılması ile 34.5 kV bara geriliminin 0.715 p.u seviyesine, ÇBAG çıkış geriliminin 0.27 p.u. seviyesine yükseldiği görülmüştür. 3 faz arızada olduğu gibi açılma hız

değişiminin yukarıya doğru salınımlı olarak çıktığı tespit edilirken, ÇK-ADM'de açışal hızda çok salınımın oluşmadığı tespit edilmiştir. Elektriksel moment ve d-q eksen stator akım değişimleri incelendiğinde ÇK-TDM'de elektriksel moment -6.65 ile 5.65 p.u., d eksen stator akımının -3.85 ile 3.85 p.u, q eksen stator akımının -1.925 ile 1.925 p.u. arasında değiştiği görülmüştür. ÇK-ADM'nin kullanılması ile salınımların elektriksel moment -0.192 ile 0.192 p.u., d eksen stator akımının 0.32 ile 068 p.u., q eksen stator akımının -0.12 ile -0.32 p.u. arasında değiştiği görülmüştür.

Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada rotorun iki paralel devre şeklinde matematiksel modeli oluşturulan ÇK modelin TDM ve ADM'ye uyarlanması ile geçici kararlılık analizi incelenmiştir. Geçici kararlılık analizinde 34. kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, ÇBAG açışal hız ve ÇBAG d-q eksen stator akımı parametreleri üzerindeki etkiler kıyaslanmıştır. Benzetim çalışmasının hesaplama kolaylığı ve çalışma performansını arttırmada tercih edilen ADM'nin TDM modele göre hem 3 faz arızasında hem de 2 faz arızasında daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. TDM'de ÇK kullanılması ile salınımların arttığı ve sistemin kararsız olduğu görülürken, ADM'de ÇK kullanılmasının salınımları bastırdığı ve sistemi daha kısa süre içerisinde kararlı hale getirdiği görülmüştür. Hem 3 faz hem de 2 faz arızada ÇK-TDM'de en çok etkilenen parametrenin açışal hız olduğu tespit edilirken, en az etkilenen parametrenin 34.5 kV bara gerilimi olduğu tespit edilmiştir. ÇK-ADM'de en çok etkilenen parametrenin salınım açısından elektriksel moment olurken, en az etkilenen parametrenin açışal hız olduğu bulunmuştur. Bu model ÇK-ADM'nin geliştirilmesi ile farklı düşük gerilim iyileştirme yeteneği stratejilerinde uygulanabilmesine ve yeni yaklaşımlar şeklinde ortaya çıkararak farklı test sistemlerine uygulanmasına zemin hazırlamaktadır.

Referanslar

- [1] Fernandez L. M., Jurado F., Saenz J. R., Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines, *Renewable Energy*, 2008, **33**, 129-140.
- [2] Kretschmann J., Wrede H., Mueller-Engelhardt S., Erlich, I., Enhanced reduced order model of wind turbines with DFIG for power system stability studies, *IEEE International Power and Energy Conference*, Putrajaya, Malaysia, 28-29 November, 2006.
- [3] Fernandez L.M., Garcia C. A., Saenz J. R., Jurado F., Equivalent models for wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**, 3, 691-704.
- [4] Gracia M. G., Comech M. P., Sallan J., Llombart A., Modelling wind farms for grid disturbance studies, *Renewable Energy*, 2008, **33**, 2109-2121.
- [5] Hector A., Painemal P., Sauer P. W., Reduced-order model of Type-C wind turbine generators, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 840-845.
- [6] Marcus V. A., Lopes J. A. R., Zürn H. H., Bezerra U. H., Almeida R. G., Influence of the variable speed wind generators in transient stability margin of conventional generators integrated in electrical grids, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2004, **19**, 692-701.
- [7] Erlich I., Kretschmann J., Fortmann J., Engelhardt S. M., Wrede H., Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies, *IEEE Transaction on Power Systems*, 2007, **22**, 909-919.
- [8] Döşoğlu, M. K. (2017). Nonlinear dynamic modeling for fault ride-through capability of DFIG-based wind farm. *Nonlinear Dynamics*, 89(4), 2683-2694.
- [9] Döşoğlu, M. K., & Arsoy, A. B. (2016). Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 414-421.
- [10] Kayikci M., Milanovic J. V., Assessing transient response of DFIG-based wind plants—The influence of model simplifications and parameters, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, **23**, 545-554.
- [11] Holdsworth L., Wu X.G., Ekanayake J.B., Jenkins N., Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2003, **150**, 343-352.
- [12] Hu, J., Huang, Y., Wang, D., Yuan, H., & Yuan, X. (2015). Modeling of grid-connected DFIG-based wind turbines for DC-link voltage stability analysis. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(4), 1325-1336.
- [13] Sørensen P., Hansen A. D., Lund T., Bindner H., Reduced models of doubly fed induction generator system for wind turbine simulations, *Wind Energy* 2006, **9**, 299-311.

- [14] Boukhezzer B., Houria S., Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**, 885-892
- [15] Painemal P., Hector A., Sauer P. W., Towards a wind farm reduced-order model, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 1688-1695.
- [16] Elkington K., Valerijs K., Mehrdad G., On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation, *Electric Power Systems Research*, 2008, **78**, 1477-1484.
- [17] Petersson A., Thiringer T., Harnefors L., Petru T., Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2005, **20**, 878-886.
- [18] Döşoğlu, M. K., & Arsoy, A. B. (2014). Modeling and simulation of static loads for wind power applications. *Neural Computing and Applications*, 25(5), 997-1006.]
- [19] Döşoğlu M. K., Basa Arsoy A., Tam ve Azaltılmış Derece Modelli Rüzgâr Santrallerinin Geçici Durum Davranışı, *Enerji Verimliliği Konferansı*, İzmit, Türkiye, 23-24 Mayıs, 2013., 212-216.
- [20] Döşoğlu, M. K., & Arsoy, A. B. (2013, November). Analysis of Reduced Order Model based on doubly-fed induction generators during different fault times. In *2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 215-219). IEEE.
- [21] Fernandez, L. M., Garcia, C. A. Jurado, F.: “Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation” *Energy*, 2008, 33 (9), pp. 1438-1452.
- [22] Krause P. C., *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill, 2th ed., New York, 2002.
- [23] Kundur P., *Power system stability and control*, Tata McGraw-Hill Education, New York, 1994.
- [24] Ekanayake J. B., Holdsworth L., Jenkins N., Comparison of 5th order and 3rd order machine models for double fed induction generators (DFIG) wind turbines, *Electric Power Systems Research*, 2003, **67**, 207-215.
- [25] Feijóo A., José C., Camilo C., A third order model for the doubly-fed induction machine, *Electric Power Systems Research*, 2000, **56**, 121-127.
- [26] J. Pedra, F. Corcoles, L. Monjo, S. Bogarra and A. Rolan, “On Fixed-Speed WT Generator Modeling for Rotor Speed Stability Studies,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 397-406, Feb. 2012.
- [27] J. Pedra, I. Candela and L. Sainz, “Modelling of squirrel-cage induction motors for electromagnetic transient programs,” *IET Electric Power Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 111-122, Mar. 2009.

Bölüm 9

Kalite Fonksiyon Göçerimi Yöntemi ve Bir Uygulama

Müfide Narlı, Hasret Çelik

GİRİŞ

Ürün ve hizmet üreten işletmeler rekabet gücü elde etmek veya rekabet gücünü sürdürmek için iç ve dış pazarda rakiplerine karşı avantaj sağlamak zorundadırlar. Yüksek rekabet gücü, işletmelerin ürettiği mal veya hizmetlerin müşteri istek ve ihtiyaçlarına cevap verebilecek kalite, fiyat ve hız bileşenleri bakımından avantajlı olmayı gerektirmektedir. Bu nedenle işletmelerin, müşteri istek ve ihtiyaçlarını belirlemek amacıyla müşteriye ulaşması ve müşteri isteklerini anlayıp buna uygun ürün veya hizmet üretmesi gerekmektedir. Ürün geliştirme ve hizmet iyileştirme süreçlerinde KFG yaygın olarak kullanılmaktadır.

KFG, toplam kalite yönetimi içinde müşteri memnuniyetini garanti altına almaya yarayan geliştirme ve iyileştirme hedefi olan bir kalite sistemidir (Zultner, 1993).

Müşteri memnuniyetini hedefleyen KFG ile, üretilecek ürünün gereklilikleri ortaya konulmaktadır. Müşteri memnuniyeti müşteri beklentisine uygun ürün üretimi gerçekleştirilerek sağlanır ve bunun sonucunda firmalar pazar payını arttırmayı hedefler.

Bugünlerde insan sağlığı ve hayatını tehdit eden ve tüm dünyayı etkileyen bir salgın hastalıkla mücadele sürmektedir. Covid-19 (Koronavirüs hastalığı), ilk defa Çin'in Vuhan Eyaleti'nde 2019 yılının aralık ayının sonlarına doğru solunum yolu belirtileri (ateş, öksürük, nefes darlığı) gösteren bir grup hastada görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda 13 Ocak 2020'de bu virüs tanımlanmıştır (URL-1).

Covid-19 salgını insan hayatını ciddi boyutta tehdit etmektedir. Solunum yoluyla bulaşan bu hastalıktan korunmak amacıyla insanlar günlük yaşamlarında maske kullanmak zorunda kalmaktadırlar. Aşılar Covid-19' a karşı bilinen korunma yöntemlerinden olup ancak yetersiz kalmakta ve diğer etkin korunma yöntemi maske kullanımını olarak bilinmektedir. Salgına karşı maskenin bu koruyucu etkisi nedeniyle doğru maske seçimi tüm kullanıcılar için büyük önem taşımaktadır. Bu durumda kullanıcılar piyasada yer alan pek çok farklı marka ve özellikteki maskeleri karşılaştırarak kullanacakları maskeye karar vermektedirler.

Bu gelişmelere bağlı olarak oluşan yoğun maske talebini karşılamak amacıyla firmalar bu ürünü üretmeye istekli olması bu alanda yoğun bir rekabet yaşanmasına neden olmaktadır. Firmaların rekabet gücünü elde etmek ve sürdürebilmek için müşteri istek ve ihtiyaçlarını doğru belirlemesi ve müşteri memnuniyetini sağlaması gerekmektedir. Bunun için öncelikle müşteri beklentilerinin belirlenip analiz edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla KFG yöntemi, maske ürün özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir uygun yöntemlerden biridir. Bu çalışmada maske ürününün iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla KFG yöntemi uygulanmıştır.

Bu çalışmada KFG yöntemi uygulamaya karar verildikten sonra bu konu ile ilgili bir literatür araştırması yapılmıştır. Bundan sonra bu yöntemin ayrıntılı olarak açıklandığı bir bölüm ve maske ürünü için bir KFG uygulama çalışması yapılarak elde edilen sonuçlar son bölümde değerlendirilmiştir.

KFG yöntemi Akao tarafından toplam kalite kontrolü kapsamında bir tasarım yöntemi olarak uygulanmaya başlanmıştır (Chan ve Wu, 2002). İlk defa Japonya'da, 1972 yılında Mitsubishi tarafından Kobe gemi tershanesinde, geniş gemi tasarımı için kullanılmıştır (King, 1989). KFG yöntemi Amerika'da 1984 yılında, Xerox, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, Ford Motor ve Amerikan Tedarikçi Enstitüsü tarafından da kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra bu yöntem yaygınlaşarak 3M, Baxter, Budd, Chrysler, General Motors, Hewlett-Packard, Kodak Eastman, Motorola gibi pek çok önemli şirket tarafından kullanılmış ve bu şirketler önemli faydalar elde etmiştir (Chan ve Wu, 2002).

KFG uygulamaları zamanla yaygınlaşarak otomobil, elektronik ve yazılım gibi endüstrilerde uygulanmıştır. Başlarda üretim sektöründe yaygın olarak kullanılan KFG yöntemi hizmet sektörü olan bankacılık, muhasebe, sağlık ve eğitimde uygulama alanı bulmuştur (Chan ve Wu, 2002).

KFG fonksiyonlarına göre sınıflandırıldığında ürün geliştirme, kalite yönetimi ve müşteri ihtiyaç analizi ana başlıkları altında incelenebilir. Bu çalışmamızda KFG'nin çıkış noktası ve en önemli amaçlarından biri olan müşteri ihtiyaç analizi alanında Lai (1999), Tan (2000), Shen (2000), Yang (2000) yaptığı gibi birçok çalışma bulunmaktadır.

Chan ve arkadaşları (2002) yılında KFG yöntemi ile ilgili çok detaylı bir literatür araştırması sunmuşlardır (Chan, 2002).

Sağlık sektöründe yapılan çalışmalar incelendiğinde ürün ve hizmetin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla KFG yönteminin kullanıldığı belirlenmiştir. Saleh (2015), tıbbi ekipmanların daha iyi yönetimi amacıyla KFG kullanarak ekipmanların koruyucu bakımlarının önceliklendirilmesine yönelik bir model geliştirmiştir (Saleh, 2015). Keshtkaran (2016), bir hastanedeki yanık ünitesi hizmetlerini iyileştirmek amacıyla KFG yöntemini kullanmıştır (Keshtkaran, 2016). Dehe (2017) yılında bir sağlık kurumunun altyapı tasarımını oluşturmak amacıyla KFG yöntemi kullanmıştır (Dehe, 2017). Doğan (2020) yılında, çocuk hastaların bir hastaneden beklentilerini belirlemek ve bu beklentilerini karşılayacak uygulanabilir çözümler bulmak amacıyla KFG yöntemini kullanmıştır. Buttigieg (2016), acil ünitelerinde kaliteli hizmet sunumu için hasta odaklı bir yaklaşım geliştirmek amacı ile bir çalışma yapmıştır (Buttigieg, 2016).

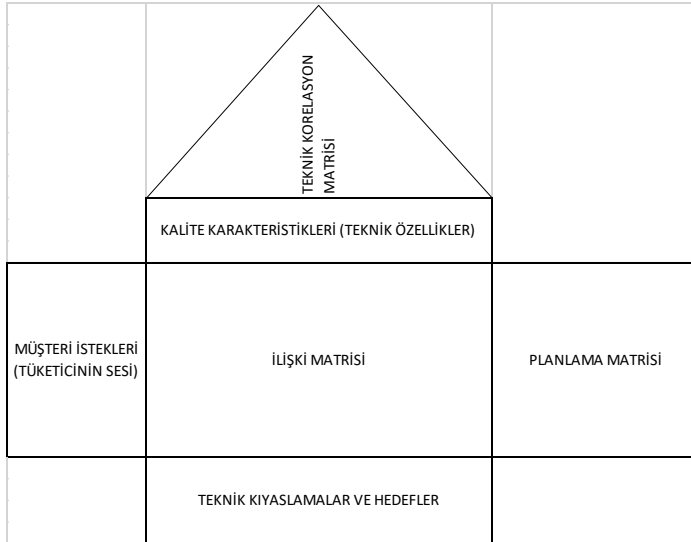
Yapılan literatür araştırmasında sağlık alanında pek çok KFG uygulaması olmasına rağmen pandemi sürecinin en önemli kontrol politikalarından olan maske ürününü konu alan bir KFG çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışmadaki amacımız maske üretimi yapan bir firmanın maske üretiminde öncü üreticilere karşı müşteri istek ve ihtiyaçlarını dikkate alarak rekabet üstünlüğü sağlayacak bir ürün üretmesini sağlamaktır. Bunun sonucunda mevcut müşteri memnuniyetinin artırılması ile beraber yeni müşteri taleplerinin oluşturulması ve bu talebin sürdürülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla maske ürünü için KFG yöntemi uygulanmıştır.

METOT

KFG'nin temel amacı, ürün geliştirme ve üretim aşamasında müşteri ihtiyaçlarının yani 'nelerin 'uygun teknik özelliklere 'nasıl' dönüştürüleceğine karar verilmesidir. Bu sürecin geliştirilmesinde müşteri için 'neyin' önemli olduğu, müşteri kriterlerinin 'nasıl' sağlanacağı ve bunlar arasında ilişki olup olmadığı ile varsa bu ilişkinin gücü tespit edilmelidir. Aslında sonuçta KFG müşteri tatmini için 'neyi' 'nasıl' ve 'ne kadar' kullanılacağına karar verildiği bir iyileştirme ve geliştirme süreci olup bir ekip tarafından yürütülür.

KFG yöntemi, "Kalite Evi (HOQ)" adı verilen matrisler sistemini içeren bir süreçtir (Mizuno, 1994). Şekil 1'de görüldüğü gibi kalite evi altı adet alt matristen oluşur (Şekil 1):

- 1) Müşteri istekleri (tüketicinin sesi) kısmının oluşturulması
- 2) Planlama matrisi ve analizi
- 3) Kalite karakteristiklerinin (teknik özellikler) belirlenmesi ve analizi
- 4) İlişki matrisi ve analizi
- 5) Teknik korelasyonların belirlenmesi ve analizi
- 6) Teknik kıyaslamalar ve hedeflerin belirlenmesi



Şekil 1. Kalite evi ve bölümleri

1) Müşteri istekleri (tüketicinin sesi) kısmının oluşturulması: Bu aşamada müşteri beklentileri ve bu müşteri beklentilerinin önem derecesi belirlenmektedir. Her müşteri beklentisinin önem derecesi 1 ile 10 arasında değerlendirilmektedir. Müşterinin en önem verdiği kritere 10, en az önem verdiği kritere ise 1 puan verilmektedir. Bu aşama müşteri isteklerinin 'ne' olduğunun belirlendiği aşama olup kalite evinin temel yapı taşını oluşturmaktadır. Burada elde ettiğimiz bilgiler 'müşterinin sesi (VOC)' olarak adlandırılmaktadır (Griffin, 1993). Bu aşama

tamamlandıktan sonra müşteri ile nasıl bağ kuracağı ve müşteri beklentilerinin tasarımı nasıl dahil edilmesi gerektiği, yani müşteri sesinin nasıl duyulacağını planlanması gerekmektedir (Goetsch and Stanley Davis, 2012).

2) Planlama matrisi ve analizi: Kalite evinin sağında bulunan planlama matrisinde, işletme kendi ve rakip ürünlerinin müşteri ihtiyaçlarını karşılama durumu değerlendirilir (Dinçel, 2011). işletme ve rakiplerin, ürününün mevcut durumunun müşteriler tarafından nasıl görüldüğünü ifade eder. Tüm müşteri beklentileri için firmanın ürünü rakipler ile kıyaslanarak işletmenin piyasada nerede olduğu belirlenmeye çalışılır. Bu kıyaslamadaki puanlama müşteri önem derecesi gibi 1 ile 10 arasında değil 1 ile 5 puan arasında değerlendirilir. Düşük puanlar belirlenen kriterde firmanın veya rakibin başarılı olmadığı, yüksek puanlar ise başarılı olduğunu göstermektedir. 1 en düşük puan olup 5 en yüksek puandır. Planlama matrisindeki ‘hedef’ sütununda KFG ekibi, müşteri ihtiyaçlarını giderme başarısı açısından işletmenin hangi seviyeye ulaşmayı amaçladığına karar vermektedir. Hedef, eldeki kaynakların sonsuz olmaması nedeniyle belirlenmelidir (Akbaba, 2005).

Hedeflerimizi belirledikten sonra ‘ilerleme oranı’ sütunu oluşturulmalıdır. İlerleme oranı, denklem 1’de görüldüğü gibi firma hedefinin firmanın bugün puanına bölünmesiyle hesaplanır. Bu sütun firmanın kriter için göstermesi gereken performansı ifade eder (Akbaba, 2005).

$$\text{Firma Hedefi} \div \text{Firma Bugün} = \text{İlerleme Oranı} \quad (1)$$

‘Satış noktası’ sütunu kriterin pazarlamayı ne kadar etkilediği ile ilgili puanlamanın yapıldığı sütundur. Kriterdeki ilerleme satış etkiler mi sorusunu baz alınarak cevaplandırılır. 1 ile 1,5 arası puanlanır. (1) puan satışın etkilenmediğine (1, 1,5] arası puanlar ise satış ne kadar etkilediğini göstermektedir (Goetsch, 2012).

‘Önem puanı’ sütunu denklem 2’de gösterildiği gibi müşteri önem derecesi, ilerleme oranı ve satış noktası puanının çarpımıyla bulunmaktadır. Önem puanı mutlak ağırlık olarak da adlandırılmaktadır.

$$\text{Müşteri Önem Derecesi} \times \text{İlerleme Oranı} \\ \times \text{Satış Noktası} = \text{Önem Derecesi} \quad (2)$$

‘Yüzde önem’ sütunu ise önem puanı sütununun normalize edilip 100 ile çarpılmasıyla bulunur. Bağlı ağırlık yüzdesi şeklinde de adlandırılabilir. Yüzde önem yüzdesi formülü denklem 3’ te verilmiştir.

$$(\text{Önem Derecesi} \div \text{Toplam Önem Puanı}) \times 100 \\ = \text{Önem Yüzdesi} \quad (3)$$

3) Kalite karakteristiklerinin (teknik özellikler) belirlenmesi ve analizi :

Bu aşama ürünün üretilmesi için gerekli olan mühendislik parametrelerinin belirlendiği aşamadır. Müşteri beklentilerinin uygulamaya dahil olabilmesi için ölçülebilir ifadelerle dönüştürülmesi gereklidir. Müşteri gereksinimleri bu kısımda işletme çabasına dönüştüğü yani, 'ne'lerin 'nasıl' sunulacağı ile ilgili bölümdür. Her bir müşteri beklentisi buradaki parametrelerden biriyle mutlaka eşleşmelidir.

4) İlişki Matrisi ve analizi: Belirlenmiş olan müşteri beklentileri 'ne'ler ile 'nasıl'lar arasındaki ilişkinin gösterildiği matristir. Müşteri beklentileri ve teknik karakteristikler arasındaki ilişki güçlü, zayıf, orta düzey olacak şekilde değerlendirilir. Müşteri beklentisi ve teknik karakteristik arasında güçlü veya zayıf bir ilişki varsa puan sistemi veya sembollerle gösterilir. İlişki dereceleri aşağıda tablo 1'de görüldüğü gibi rakam veya semboller ile ifade edilir. Amerikan puanlama sisteminde 9 puan güçlü, 3 puan orta ve 1 puan ise zayıf niteliği ifade etmektedir. Japon puanlama sisteminde ise, 5 güçlü, 3 orta 1 ise zayıf olarak değerlendirilmektedir. Matristeki bu ilgili kutunun boş olması durumunda o teknik özelliğin kriter ile ilişkili olmadığı şeklinde değerlendirilmelidir.

Tablo 1. Korelasyon Derecesi Sembol ve Anlamları

<i>İlişki Derecesi</i>	<i>Amerikan Puan Sistemi</i>	<i>Japon Puan Sistemi</i>	<i>Sembol</i>
<i>Güçlü</i>	9	5	●
<i>Orta</i>	3	3	○
<i>Zayıf</i>	1	1	▽

Teknik karakteristikler ve müşteri beklentileri arasındaki ilişkinin değerlendirilmesindeki temel amaç her bir teknik karakteristiğin müşteri beklentilerini karşılamadaki etkisini görmektir. Denklem 4'te teknik karakteristiğin beklenti için puanlandırılması gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} & \text{Yüzde Önem Değeri} \times \text{Korelasyon İlişki Kat Sayısı} \\ & = \text{Teknik Karakteristiğin Beklenti İçin Puanlandırılması} \end{aligned} \quad (4)$$

'Teknik önem derecesi' her teknik özellik için planlama matrisinde hesaplanan yüzde önem değerleri ile ilişki puanlarının çarpımlarının toplamı denklem 5' te görüldüğü gibi bulunur.

$$\begin{aligned} & \text{Tüm Teknik Karakteristik İçin Yapılan Puanlamaların Toplamı} \\ & = \text{Teknik Önem Derecesi} \end{aligned} \quad (5)$$

‘Normalize teknik önem derecesi’ ise teknik önem derecelerinin normalizasyonu ile bulunur. ‘Normalize teknik önem derecesi’ denklem 6’ da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} & \text{Her Bir Teknik Önem Derecesi} \\ & \div \text{Toplam Teknik Önem Dereceleri} \\ & = \text{Normalize Teknik Önem Derecesi} \end{aligned} \quad (6)$$

Teknik önem derecesinde diğerlerine göre yüksek olan karakteristikler, geliştirme sürecinde öncelik tanınması gereken teknik karakteristiklerdir. Bunun sebebi ise önem derecesinin yükselmesi ile müşterilerin bu kritere verdiği önem derecesinin yükselmesinin birbirine paralel olmasından kaynaklanır. Yüksek önem dereceli karakteristiklerin iyileştirmeleri müşteri beklentilerini karşılamaya yönelik bir adım olarak değerlendirilir.

5) Teknik korelasyonların belirlenmesi ve analizi: Mühendislik parametreleri arasındaki korelasyonunun belirlendiği kısımdır. Bazı parametreler arasında olumlu bazı parametreler arasında ise olumsuz korelasyon olabilmektedir. Bu korelasyonu gösteriminde teknik özelliklerin çatısına olumlu etkileşimler için “P veya +“, olumsuz etkileşimler için ise “N veya –“ olarak ifade edilir. Ancak teknik bir karakteristiği iyileştirirken bir diğer teknik karakteristiğin olumsuz etkilenebileceği hatırlanmalıdır. Bu aşamada yapılan matris kalite evinde çatı görüntüsü oluşturduğundan kalite evi olarak adlandırılmıştır.

6) Teknik kıyaslamalar ve hedeflerin belirlenmesi: Bu bölümde teknik karakteristiklerin ölçüm birimleri, olması gereken standart değerler, firmanın bugünü, rakiplerin durumu ve hedefler yer almaktadır.

UYGULAMA

Covid-19 pandemisi sebebiyle son yılların en çok aranan ve kullanılan ürünü olan tek kullanımlık cerrahi maske KFG yöntemi ile değerlendirilecektir. Firmamız olan A firması tek kullanımlık cerrahi maske üreten bir firmadır. En büyük iki rakibi ise aynı şekilde tek kullanımlık cerrahi maske üreten B ve C firmaları olarak kodlanmıştır. Çalışmanın uygulama adımları aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

- 1) Müşteri istekleri (tüketicinin sesi) kısmının oluşturulması:** Öncelikle tek kullanımlık cerrahi maskede olması gereken kriterler belirlenirken kullanıcılarla yapılan görüşmeler ve literatür araştırması yapılmıştır. Bu bilgileri düzenlerken Türk Standartları Enstitüsü Maske Standartları ve TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası, Genel Bilgilendirme Formundan faydalanılmıştır (URL-2), (URL-3). Bu şekilde belirlenen müşteri beklentileri listelenerek kullanıcılara sunulmuş ve müşteri beklentilerinin en çok aşağıdaki altı kriter üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür.

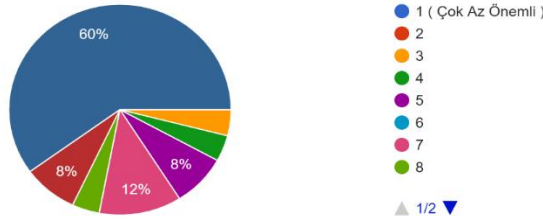
2)

- a) Koruyuculuk (URL-2)
- b) Fiyat (URL-4)
- c) Etiket ve Ambalajlama (URL-2)
- d) Estetik Görünümü (URL-2)
- e) Rahatlık (URL-2)
- f) Çevreci olması (URL-3)

Maske ürün belirlenen kriterleri ürünü üreten firma tarafından 25 kişilik bir ürün kullanıcı kitlesine yönelik bir değerlendirme formu olarak hazırlanmıştır. Günlük yaşamında uzun süreli ve düzenli olarak maske kullanan üniversite öğrencileri tarafından bu ilgili formlar doldurulmuştur. Maske kullanıcılarının belirlenen her kriter için 1 ile 10 arasında bir önem derecesine göre puanlama yapmaları istenmiştir. Aşağıda kriterlerden sadece ‘koruyuculuk’ kriteri için elde edilen yüzde grafiği şekil 2’de verilmiştir.

Hazırlanan formda maske kullanıcılarına her kriter için 1 ile 10 arasında puan verebileceği ‘x kriteri sizin için ne kadar önemlidir?’ şeklinde sorular yöneltilmiştir. Bütün kriterler için yapılan bu değerlendirmede her kriterin sorusu diğerinden bağımsız olarak cevaplandırılmakta ve birbirini etkilememektedir. Formu cevaplayanlar sadece kendi verdikleri puanları görmektedir bu sebeple kullanıcılar birbirini etkilememektedir.

Koruyuculuk (maskenin koruyuculuğu) kriteri sizin için ne kadar önemlidir?
25 yanıt



Şekil 2: Ankette Koruyuculuk Kriteri Puanlaması Yüzde Dağılım Grafiği

Maske kullanıcılarının cevapladığı ‘Maskenin koruyuculuğu sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusu ile ‘koruyuculuk’ kriteri için önem seviyesi belirlenmiştir. Potansiyel müşteri kitlemizin koruyuculuk kriterine verdiği cevaplar, 15 kişi 10 puan, 2 kişi 9 puan, 1 kişi 8 puan, 3 kişi 7 puan, 2 kişi 5 puan, 1 kişi 4 puan ve 1 kişi 3 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalamasını alarak ‘koruyuculuk’ kriterinin müşteri önem derecesi 9 olarak bulunmuştur.

$$\frac{[(15 \times 10) + (2 \times 9) + (1 \times 8) + (3 \times 7) + (2 \times 5) + (1 \times 4) + (1 \times 3)]}{25} = \frac{214}{25} = 8,56 \cong 9$$

‘Fiyat’ kriteri için önem seviyesi belirlenirken kullanıcılara ‘Maske seçiminde fiyat kriteri sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusu yöneltilmiştir. Bu soruya 3 kişi 10 puan, 5

kişi 8 puan, 7 kişi 7 puan, 3 kişi 6 puan, 5 kişi 5 puan ve 2 kişi 3 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalaması alınarak, fiyat kriterinin önem derecesi 7 olarak bulunmuştur.

$$[(3 \times 10) + (5 \times 8) + (7 \times 7) + (3 \times 6) + (5 \times 5) + (2 \times 3)] / 25 = 168 / 25 = 6,72 \cong 7$$

‘Maskenin etiket ve ambalajlanması sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusu ile ‘etiket ve ambalajlama’ kriteri için önem seviyesi belirlenmiştir. Bu soruya, 7 kişi 10 puan, 1 kişi 9 puan, 5 kişi 8 puan, 5 kişi 7 puan, 1 kişi 6 puan, 3 kişi 5 puan ve 3 kişi 2 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalamasını alındığında bu kriterin müşteri önem derecesi 7 olarak bulunmuştur.

$$[(7 \times 10) + (1 \times 9) + (5 \times 8) + (5 \times 7) + (1 \times 6) + (3 \times 5) + (3 \times 2)] / 25 = 181 / 25 = 7,24 \cong 7$$

‘Maskenin estetik görünümü sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusu ile ‘estetik görünüm’ kriteri için önem seviyesi belirlenmiştir. 2 kişi 10 puan, 8 kişi 9 puan, 2 kişi 7 puan, 3 kişi 6 puan, 1 kişi 5 puan, 1 kişi 4 puan, 3 kişi 3 puan, 1 kişi 2 puan ve 4 kişi 1 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalamasını aldığımızda bu kriterimizin önem derecesi 6 bulunmuştur.

$$[(2 \times 10) + (8 \times 9) + (2 \times 7) + (3 \times 6) + (1 \times 5) + (1 \times 4) + (3 \times 3) + (1 \times 2) + (4 \times 1)] / 25 = 148 / 25 = 5,92 \cong 6$$

‘Maskenin rahatlığı sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusuna 14 kişi 10 puan, 5 kişi 9 puan, 3 kişi 8 puan, 1 kişi 7 puan, 1 kişi 6 puan ve 1 kişi 3 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalamasını alınarak rahatlık kriterinin önem derecesi 9 olarak bulunmuştur.

$$[(14 \times 10) + (5 \times 9) + (3 \times 8) + (1 \times 7) + (1 \times 6) + (1 \times 3)] / 25 = 225 / 25 = 9$$

‘Maskenin çevreci olması sizin için ne kadar önemlidir?’ sorusuna, 9 kişi 10 puan, 1 kişi 9 puan, 5 kişi 8 puan, 2 kişi 7 puan, 4 kişi 6 puan, 2 kişi 5 puan, 1 kişi 3 puan ve 1 kişi 1 puan vermiştir. Bu değerlerin ortalamasını alınarak çevreci olma kriterinin önem derecesi 8 olarak bulunmuştur.

Yukarıda belirlenen elde edilen sonuçlar tablo 2’de verilmiştir. Bu veriler müşterinin sesi olarak adlandırılır. Belirlenen kriterler burada ürün, satış ve diğer beklentileri olarak genel bir çerçevede sınıflandırılmıştır.

Tablo 2. Müşteri Beklentileri ve önem seviyeleri

Sınıf	Müşteri Beklentileri	Önem Seviyesi
Ürün	Koruyuculuk	9
	Estetik Görünüm	6
	Rahatlık	9
Diğer	Etiket ve Ambalaj	7
	Çevreci Olması	8
Satış	Fiyat	7

1) **Planlama matrisi ve analizi:** Maske üretimi için A firması ve rakipleri ifade eden B ve C firmaları için yapılan değerlendirmeler ve müşteri beklentileri açısından hedef değerler, ilerleme oranı, satış noktası değerleri tablo 3’de verilmiştir. Denklem (2)-(3) dikkate alınarak her bir müşteri beklentisinin yüzde önem derecesi hesaplanmış ve tablo 3’de verilmiştir. Örneğin ‘koruyuculuk’ kriteri için;

- İlerleme Oranı Denklem (1) ile; $5 \div 4 = 1.25$
- Önem Derecesi Denklem (2) ile; $1,25 \times 1,40 \times 9 = 15,75$ ve
- Önem Yüzdesi Denklem (3) ile; $(15,75 / 74,04) \times 100 = 21$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Planlama Matrisi ve Normalizasyonu

	MÜŞTERİ beklentileri	ÖNEM DÜZEYLERİ	FİRMABUGÜN	RAKİP B	RAKİP C	FİRMA HEDEFLER	İLERLEME ORANI	SATIŞ NOKTASI	ÖNEM PUANI	YÜZDE ÖNEM
ÜRÜN	Koruyuculuk	9	4	3	2	5	1,25	1,4	15,75	21
	Estetik Görünüm	6	3	4	3	4	1,33	1	7,98	11
	Rahatlık	9	3	5	4	4	1,33	1,5	17,95	24
DİĞER	Etiket ve Ambalaj	7	5	2	5	5	1,00	1	7	9
	Çevreci Olması	8	3	4	5	4	1,33	1,2	12,76	17
SATIŞ	Fiyat	7	2	3	2	3	1,50	1,2	12,6	17
TOPLAM									74,04	100

3) Kalite karakteristiklerinin (teknik özellikler) belirlenmesi ve analizi:

Bu adımda müşteri beklentilerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli teknik özellikler belirlenmiştir. Maske ürünün KFG uygulamasında ‘TİP 1 tek kullanımlık cerrahi maske’ ile ilgili olan EN 14683 standardı da dikkate alınmıştır. EN 14683 standardı Avrupa standardı olup, tıbbi yüz maske özellikleri ve test yöntemlerinin açıklandığı asgari bir standarttır. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından TS EN 14683+AC ‘Tıbbi yüz maskeleri’ başlığı ile yayınlanan

standartlar, bu çalışmamızda teknik özellikler kısmında dikkate alınmıştır (URL-2).

Buna göre ‘mikrobiyal temizlik’ kriteri maske kumaşındaki toplam canlı organizma sayısının gram başına düşen miktarını ifade etmektedir. Standart oran ≤ 30 cfu/g’ dur. Bu oranın düşük olması maskedeki mikrobiyal temizlik seviyesini arttırmaktadır.

‘ ≥ 95 filtreleme oranı’ kriteri, ‘TİP 1 cerrahi maske’lerin en az %95 oranında olmalıdır. Bu oranın artması koruyuculuğu arttırmaktadır. ‘Burun sarma çubuğu sertliği’ kriteri ‘koruyuculuk’, ‘rahatlık’, ‘solunabilirlik’ gibi birçok kriteri etkilemektedir. ‘Burun sarma çubuğu’nun içindeki paslanmaz çelik levhanın/telin belli bir kalınlıkta olması gerekmektedir. Bu değer yaklaşık 0,7 mm’dir (URL-2).

‘Penetrasyon direnci’ ise, sentetik kan vb. sıvıların geçirgenliğinin ölçüldüğü teknik bir kriterdir. Cerrahi maskelerde en az 80 mm/Hg olmalıdır. Bu sayının artması direncin artması anlamına gelmektedir. Bu durum daha da iyi bir kalite sağlar. ‘Nefes alabilirlik’ (hava geçirgenliği), yani ‘diferansiyel basınç’ kriteri soluk alma zorluğunu ölçen bir kriterdir. Diferansiyel basınç; belirli hava akışı, sıcaklık ve nem şartlarında, maskenin iki tarafındaki basınçın farkını belirlemek suretiyle ölçülen, maskenin hava geçirgenliği ile ilgili bir kriteridir (URL-2). 40 Pa/cm² olması ise kaliteyi iyileştiren bir durumdur. Makul seviyeleri bu seviyelerde olduğu için bu değeri çok düşürmemek gerekmektedir. Bu değerinin optimum seviyesinin dışına çıkması diğer kalite karakteristiklerini de olumsuz etkileyebilmektedir (URL-2).

‘Yüze oturabilirlik’, maskenin burun deliklerini kapatacak şekilde burun üstünden çene altına kadar boşluksuz kapatması durumudur. Maskenin yanlış takılması maske kalitesinden bağımsız olarak koruyuculuk sağlamamaktadır.

‘Kulak lastiği direnci’, maskenin ‘koruyuculuk’, ‘yüze oturma’, ‘rahatlık’ gibi birçok kriter ile ilgilidir. Lastik direnci, lastikli kumaşlarda denye ile ifade edilir. Denyenin yükselmesi maske duruşunun sıkılığını arttıracaktır. Görünür ambalaj ve etiketleme mevzuatı, zorunlu bir mevzuat olup EN 15223-1 ve EN 1041 standartlarına göre yapılmalıdır (URL-2).

‘PP Non-Woven 3 katlı kumaş kullanımı’, tek kullanımlık cerrahi maskelerde olması gereken bir gerekliliktir. Kumaşın farklı çeşitleri maskede iç, orta ve dış katmanı oluşturur. Orta katman asıl filtrelemeyi sağlayan kumaştır. En az 3 kat olmak üzere iç katı 10 gr/m², orta katı 30 gr/m², dış katmanı ise 15 gr/m² olmalıdır. Ağırlıkların artması gr başına gelen bakteri miktarını düşüreceğinden makul seviyelerde arttırmak iyileştirmeyi sağlayabilecektir (URL-2).

3) İlişki matrisi ve analizi: Her müşteri kriteri ile teknik karakteristikler arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. ‘Mikrobiyal temizlik’ kriteri ‘koruyuculuk’ için yüksek önem derecesi arz etmektedir. Bu kriter, maskelerin bakteriler ile bulaşın olması ve çöp olarak değerlendirildiğinde ‘çevre’ kriteri için orta önem derecesi olarak değerlendirilmiştir. ‘Filtreleme oranı’ kriteri ‘koruyuculuk’ için çok önemlidir. Bunun sebebi filtrasyonsuz bir koruyuculuğun sağlanamacağı durumundandır. ‘Burun sarma çubuğu sertliği’, ‘koruyuculuk’ ve ‘rahatlık’

kriterleriyle doğrudan güçlü bir ilişki içerisindedir. Aynı zamanda maskenin görünüşünü etkileyebileceğinden ‘estetik görünüm’ kriteri ile ilişkisi zayıf olarak değerlendirilebilir. ‘Penetrasyon direnci’ ‘koruyuculuk’ için çok önemli olup başka bir kriterle ilişkisi bulunmamaktadır. ‘Nefes alınabilirlik’ kriteri ‘koruyuculuk’ ve ‘rahatlık’ kriterleriyle güçlü bir ilişki içerisindedir. ‘Yüze oturabilirlik’ kriteri ‘koruyuculuk’ ve ‘rahatlık’ kriterleriyle güçlü bir ilişki içerisindedir. Maskenin ‘estetik görünümünü etkileyebileceğinden bu kriterle zayıf bir ilişki içerisindedir. ‘Kulak lastiği direnci’ kriteri ‘koruyuculuk’ ve ‘rahatlık’ kriterleriyle güçlü bir ilişki içerisindedir. Maskenin ‘estetik görünümü’ etkileyebileceğinden bu kriterle zayıf bir ilişki içerisindedir. ‘Görünür ambalaj ve etiketleme mevzuatı’, ‘etiket ve ambalajlama’ ile güçlü, ‘estetik görünüm’ ile zayıf bir ilişki içerisindedir. ‘PP Non-woven 3 katlı kumaş’ parametresi ‘koruyuculuk’, bu kumaşın geri dönüştürülebilir olmasından dolayı ‘çevre’ ve ‘fiyat’ kriteri ile güçlü bir ilişki içerisindedir.

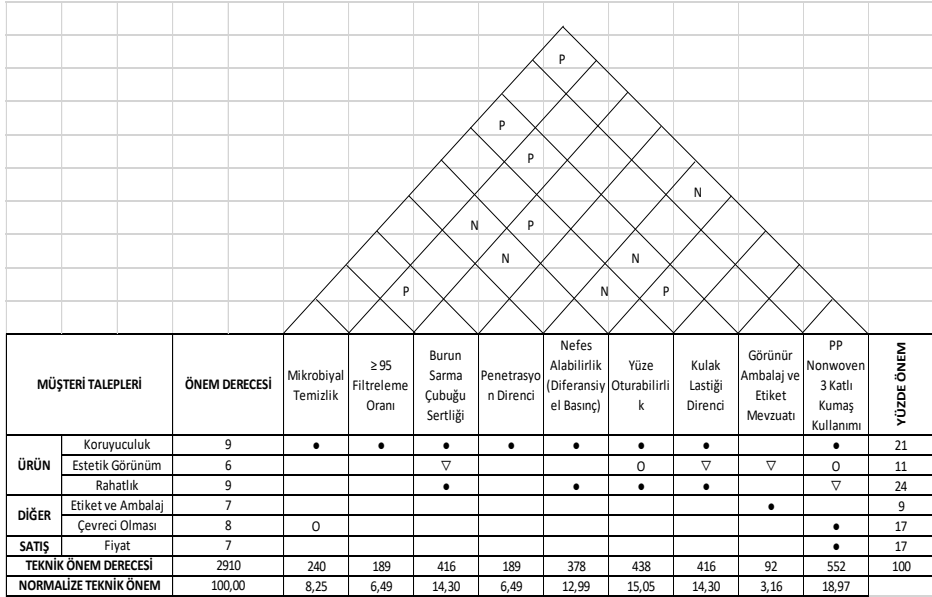
Tablo 1’ te verilen korelasyon sembolleri dikkate alınarak teknik parametreler ile müşteri beklentileri ilişkisi tablo 4’de verilmiştir. Ayrıca tablo 5’te bunlara ek olarak denklem (5) ile belirlenen ‘teknik önem derecesi’ ve denklem (6) ile belirlenen ‘normalize teknik önem’ vardır. Örneğin, ‘Burun sarma çubuğu sertliği’ işlemi için $(21 \times 9) + (11 \times 1) + (24 \times 9) = 416$ şeklinde hesaplanmıştır. Aynı işlemler tüm teknik özellikler için yapılmıştır. Her bir teknik özelliğin ‘Normalize Teknik Önem Derecesi’ de denklem 6 ile elde edilmiştir.

Tablo 4. İlişki Matrisi

MÜŞTERİ beklentileri	ÖNEM DERECESESİ	Mikrobiyal Temizlik		Burun Sarma Çubuğu Sertliği		Penetrasyon Direnci		Nefes Alabilirlik (Diferansiyel Racımr)		Yüze Oturabilirlik		Kulak Lastiği Direnci		Görünür Ambalaj ve Etiket Mevzuatı		PP Nonwoven3 Katlı Kumaş Kullanımı		YÜZDE ÖNEM
		≥ 95 Filtreleme																
ÜRÜN	Koruyucu	9	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	21
	Estetik Görünüm	6			▽					0	▽	▽	▽	▽	0	0	0	11
	Rahatlık	9			•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	24
DİĞER	Etiket ve Ambalaj	7												•				9
	Çevreci Olması	8	0														•	17
SATIŞ	Fiyat	7															•	17
TEKNİK ÖNEM DERECESESİ		2910	240	189	416	189	378	438	416	92	552	100						
NORMALİZE TEKNİK ÖNEM		100,0	8,25	6,49	14,30	6,49	12,99	15,05	14,30	3,16	18,97							

İlişki matrisi oluşturulduktan sonra boş kalan satırlar taranmalıdır. Her bir müşteri beklentisi çatının altındaki kalite karakteristiklerinden en az biriyle eşleştirilmelidir. Eğer eşleştirme işlemi gerçekleştirilemiyorsa eşleştirilmeyen müşteri isteklerini karşılayacak yeni bir teknik özellik eklenmeli veya ilişkilendirilemiyorsa matristen çıkarılmalıdır.

5) Teknik korelasyonların belirlenmesi ve analizi: Çatı korelasyonunda belli ilişkileri ifade etmek için korelasyon sembolleri, (+/-) veya (P/N) harfleri kullanılarak gösterilmektedir. Birbirini olumlu etkileyen teknik özellikler için (+) veya (P), birbirini olumsuz etkileyen özellikler için (-) veya (N) kullanılarak geliştirilen korelasyon matrisi' şekil 2'de maske üretiminin teknik özellikleri için oluşturulmuştur.



Şekil 2. Korelasyon Matrisi

‘Mikrobiyal temizlik’ ve ‘3 katlı kumaş kullanımı’ arasında pozitif ilişki olduğu ‘mikrobiyal temizlik’ oranının kumaş ağırlığı arttıkça iyileşen bir denkleme sahip olmasından kaynaklanmaktadır. ‘Kumaşın 3 katlı olması’ ağırlığı arttıracak, ağırlığı arttıkça da ‘mikrobiyal temizlik’ seviyesi yükselecektir. Bu sebeple aralarında pozitif bir ilişki olduğu söylenebilir.

‘Filtreleme oranı’ ile ‘burun sarma çubuğu’ arasında pozitif ilişki olmasının sebebi ‘burun sarma çubuğu’ işlevini optimum bir şekilde yerine getirmesi maske içine daha az hava girmesini sağlayacak ve böylece maske içindeki filtreleyici kumaş görevini daha iyi yerine getirecektir.

Firmanın örnek matrisinde ‘nefes alabilirlik’ ve ‘≥ 95 filtreleme’ oranını ele aldığımızda ‘nefes alabilirlik’ kaliteli bir maskenin diferansiyel basınç oranıyla ölçülebilen önemli bir üretim standardıdır. ‘Nefes alabilirlik’ artması ilişkili olduğu ‘diferansiyel basınç’ düşürmektedir. ‘Diferansiyel basınç’ değerinin düşmesi ile ‘filtreleme oranı’ arasında negatif bir ilişki vardır. Bunun sebebi maskenin daha az hava geçirmesinden kaynaklanmaktadır. Yani ‘nefes alabilirliğin’ artması ‘filtreleme oranı’ nı düşürmektedir. Bu sebeple çatı matrisinde bu olumsuz ilişkiyi ortaya koyan (N) harfi ile ifade edilmiştir.

‘Filtreleme oranı’ ile ‘kulak lastiği direnci’ arasında olumlu ilişkinin olmasının sebebi lastiğin optimum seviyelerde denye sayısına sahip olmasıyla boşluk bırakmayarak içeriye daha az havanın girmesine neden olmasıdır. Bu durum da ‘filtreleme oranı’ nı arttıracaktır.

‘Nefes alabilirlik’ ‘burun sarma çubuğu sertliği’ ile ters korelasyon içindedir. Çünkü ‘burun sarma çubuk sertliği’ arttıkça ‘nefes alabilirlik’ zorlaşacaktır. Bununla birlikte ‘burun sarma çubuğunun sertliği’ burunun tam şeklini alması

sebebiyle ‘yüze oturabilirlik’ arttırdığından bu iki özellik arasında olumlu bir ilişki vardır. Yüze iyice oturan maskelerin ‘filtreleme oranı’ daha yüksek olur.

‘Nefes alabilirlik’, ‘kulak lastiği direnci’, ‘yüze oturabilirlik’, ‘3 katlı kumaş kullanımı’, ‘filtreleme oranı’ ve ‘burun sarma çubuğu sertliği’ ile zıt ilişkide olmasının sebebi ise bu teknik detayların iyileştirilmesi ile nefes almanın daha zorlu bir hale gelmesinden kaynaklanır. Bu teknik detayların genel amacı daha boşluksuz ve daha iyi filtreli bir maske oluşturmak olup ancak bu durum bir yandan da soluk almayı güçleştirmektedir.

‘Yüze oturabilirlik’ ile ‘filtreleme’ arasında pozitif bir ilişki vardır. Yüze oturan maskeler daha iyi filtreleme yapmaktadır.

‘Görünür ambalaj ve etiket mevzuatı’ kriterinin diğer mühendislik parametreleri ile olumlu veya olumsuz bir ilişki bulunmadığından bu parametrenin çatı kısmı boş kalmıştır.

6) Teknik kıyaslamalar ve hedeflerin belirlenmesi: Bu kısımda mühendislik parametrelerinin rakip B ve C firmasında ve kendi firmamızdaki etkileri incelenir. Bunun dışında firmanın bugünü ve hedefleri kısmı da yer almaktadır. İlişki matrisinin oluşturulması ve analizinde bölümünde açıklanan teknik parametrelerin hangi seviyede olması gerektiğinden yola çıkarak firma iyileştirme ve geliştirme için hedefler belirlenir. Daha sonra rakiplerin ürünlerinin ne durumda olduğu belirlenir.

Firmamızın ‘mikrobiyal temizlik’ teknik parametresine baktığımızda B firmasıyla aynı C firmasından ise daha iyi durumda olduğu görülmektedir. Firmamız daha iyi bir kaliteyi hedeflediği için bunu 25 cfu/g altına düşürmeyi hedeflemiştir.

‘Penetrasyon direnci’ sıvı partikül geçirgenliği olup bu konuda B firması bizden daha iyi rakip C ise daha kötü olduğu belirlenmiştir. ‘Penetrasyon direncinin’ artması koruma bariyerini iyileştireceğinden firma hedefini 95’e çıkarmıştır.

‘Kulak lastiği direnci’ için belirlenen 70 standart değer ile firmanın bugünü uyusmaktadır. Firma bu değeri optimum değer olarak düşündüğü için bu konuda herhangi bir değişim yapmamıştır. Çünkü bu direncin yükselmesi rahatsızlık verecek, azalması ise ‘yüze oturabilirliği’ olumsuz etkileyecektir. Şekil 3’te kalite evine işlenen bu teknik kıyaslamalar görülmektedir. Şekil 3’te gösterilen kalite evi sonucu yöneticilerle değerlendirilerek maske ürünü iyileştirilmesi sağlanacaktır.

MÜŞTERİ İHTİYAÇLARI	ÖNEM DÜZEYİ	Müşteriye Tercihli Özellik	2,55 Fiyat Oranı	Burun Sama Güçlüğü Oranı	Parasetamol Oranı	Alüminyum Oranı	Yüksek Kalite Oranı	Görünüm Oranı	P	FİRMA BUGÜN	RAKİP B	RAKİP C	FİRMA HEDEFLER	İLERLEME ORANI	SATIŞ NOKTASI	ÖNEM PUANI	YÜZDE ÖNEM
Konforluk	9	•	•	•	•	•	•	•	•	4	3	2	5	1,5	1,4	55,5	21
Erişilebilirlik	5		•	•	•	•	•	•	•	3	4	3	4	1,33	1	7,88	11
Renk	9			•			•			3	5	4	4	1,5	1,5	17,56	20
Erişilebilirlik	7									5	2	5	5	1,00	1	7	9
SATIS Fiyat	8	0								3	4	5	4	1,33	1,2	12,76	17
HEMEN ÖLÇÜMLERİ	7									•	2	3	2	1,50	1,2	12,6	17
HEMEN ÖLÇÜMLERİ	2910	240	105	45	105	375	450	45	90	550					104	100	
HEMEN ÖLÇÜMLERİ	1000	8,25	6,49	14,30	6,49	12,99	15,05	14,30	31,6								
ÖLÇÜMLERİ		d/4g	PM	mm	mm/1g	Pv/m ²	g/cm ²	Deniz	g/m ²								
STANDART ÖLÇÜMLERİ		4,30	2,95	0,7	80	<40	Ver/Yok	75	Ver	55							
FİRMA ÖLÇÜMLERİ		4,30	2,95	0,6	80	42	Ver	75	Ver	55							
RAKİP B		4,30	2,95	0,8	80	36	Ver	65	Ver	50							
RAKİP C		4,30	2,95	0,7	75	30	Ver	70	Ver	50							
FİRMA HEDEFLERİ		4,25	2,96	0,7	55	29	Ver	70	Ver	50							

Şekil 3. Tek Kullanımlık Cerrahi Maske Kalite Evi

SONUÇ

Türkiye ve dünya pazarında yüksek rekabet koşullarında hayatta kalmaya çalışan işletmeler başarılı olmak için müşterilerin gereksinim duydukları ihtiyaçları tespit etmeli ve müşteriye bekletmeden sunmalıdır. Müşteri iyi anlaşılır, beklentiler doğru belirlenir ve bu veriler doğru süreç ve zaman ile hayata geçirilirse müşteri beklentileri karşılanarak firmanın rekabet gücünün artması beklenmektedir.

Müşteri beklentilerini karşılarken kalite düzeyini sürekli iyileştirmek rekabet edebilmekte oldukça önemlidir. Bu nedenle müşteri beklentilerine uygun üretilebilmesi için öncelikle beklentilerin doğru tanımlanması ve her bir beklentinin önem seviyesinin ortaya konulması gerekmektedir. Beklentilerin ortaya konulmasından sonra bu beklentilerin nasıl gerçekleştirileceği, gerekli olan mühendislik kriterleri, mühendislik kriterlerinin karşılanma gücü ve

rakiplerin mevcut durumu gibi analizlerin yapılması gerekmektedir. KFG yaklaşımı bu adımları gerçekleştiren bir metodoloji olup otomotiv, beyaz eşya gibi pek çok sektörle beraber sağlık hizmetlerinde ve ürünlerinde de uygulanmaktadır.

Bu çalışmada da Covid-19 pandemisi ile hayatımızda büyük yer edinen maske üretimi KFG ile incelenmiştir. Beklenmedik bir şekilde ortaya çıkan Covid-19'a karşı alınabilecek en etkili ve pratik yöntemin maske kullanımı olması ve virüsün varyant değiştirmesi nedeniyle maske kullanıcısı maske temin etmeden önce pek çok kriter açısından maskeleri incelemektedir. Bu incelemeler KFG yaklaşımında müşterinin sesi kısmını oluşturmuş ve bu çalışmada koruyuculuk, estetik görünüm, rahatlık, etiket ve ambalaj, çevreci olma, fiyat olmak üzere 6 başlıkta toplanmıştır. 25 kişilik öğrenci anketi ile her bir kriterin önem seviyeleri elde edilmiştir. Anket sonuçlarına göre '9' önem seviyesi ile maske seçiminde en önemli kriterler 'koruyuculuk' ve 'rahatlık' belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü adımında teknik gereklilikler tanımlanmış olup bu gereklilikler ve hedef değerler belirlenirken standartlardan faydalanılmıştır. Teknik kriterlerin birbiri ile ilişkileri de belirlenmiştir. Ayrıca iki rakip firma ile analizler yapılarak müşteri beklentilerinden koruyuculuk açısından rakip firmaların önünde; çevreci olma konusunda ise gerisinde olduğu belirlenmiştir.

Teknik özellik açısından ise ≥ 95 filtreleme ve burun sarma çubuğu sertliği teknik özelliğinde standartın ve rakiplerin gerisinde olduğu söylenebilir.

Gelecek çalışmalarda örneklem sayısı arttırılabilir ve daha geniş kitleler ile analiz yapılabilir. Ayrıca teknik özellikler için optimum parametre değeri belirlemesi yapılabilir. Bu gerçekleştirilirken de matematiksel modelleme yaklaşımından faydalanılabilir.

KAYNAKÇA

- 1) Zultner, R.E. (1993), "TQM for Technical Teams", Communications of the ACM, 36(10): 79 – 91.
- 2) Chan, L. K. and WU, M. L. (2002). Quality Function Deployment: A Literature Review. European Journal of Operational Research(143), 463–497.
- 3) KİNG, B., (1989), Better Designs in Half the Time: Implementing QFD Quality Function Deployment in America, 3. Baskı, GOAL/QPC, Methuen
- 4) Lai, Y.J., Chang, S.I., 1999. An integrated group decision-making approach to quality function deployment. IIE Transactions 31 (6), 553–567
- 5) Tan, K.C., Shen, X.X., 2000. Integrating Kanos model in the planning matrix of quality function deployment. Total Quality Management 11 (8), 1141–1151.;
- 6) Shen, X.X., Tan, K.C., Xie, M., 2000a. An integrated approach to innovative product development using Kanos model and QFD. European Journal of Innovation Management 3 (2), 91–99.;
- 7) Yang, Y.N., Parsaei, H.R., Leep, H.R., Chuengsatiansup, K., 2000. Evaluating robotic safety using quality function deployment. International Journal of Manufacturing Technology and Management 1 (2/3), 241–256).
- 8) Saleh, N., Sharawi, A. A., Elwahed, M. A., Petti, A., Puppato, D., & Balestra, G. (2015). Preventive maintenance prioritization index of medical equipment using quality function deployment. IEEE J. Biomedical and Health Informatics,19(3):1029-1035.
- 9) Keshtkaran, A., Hashemi, N., Kharazmi, E., & Abbasi, M. (2016). Applying Quality Function Deployment Model in burn unit service improvement. Journal of Burn Care & Research, 37(5):e440-e452
- 10) Dehe, B., & Bamford, D. (2017). Quality Function Deployment and operational design decisions—a healthcare infrastructure development case study. Production Planning & Control, 28(14):1177-1192.
- 11) Doğan, N. Ö., & Akbal, H. (2020). Identification and Evaluation of the Ways of Meeting Patients' Expectations from a Hospital: An AHP-Weighted QFD Case Study In A Pediatric Hospital. Istanbul Business Research, 49(2):224-247
- 12) Buttigieg, S. C., Dey, P. K., & Cassar, M. R. (2016). Combined quality function deployment and logical framework analysis to improve quality of emergency care in Malta. International Journal of Health Care Quality Assurance, 29(2):123-140.
- 13) Mizuno, N. (1994). Epilogue: Interview with Shigeru Mizuno. İçinde S. Mizuno ve Y. Akao (Editörler), QFD: The Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment (ss. 353-358). Tokyo: Asian Productivity Organization.
- 14) Griffin, A. ve Hauser, J.R. (1993) "The Voice Of The Customer", Marketing Science, 12(1):1-27.
- 15) David L Goetsch and Stanley Davis, Quality management for Organizational Excellence, (USA: Pearson Education Inc., 2013), h. 82.

- 16) Dinçel, K., & Yenen, V. Z. (2011). Ürün Pazarlamasında Kalite Fonsiyon Göçerimi (KFG) Ve Uygulanabilirliği.
- 17) Akbaba, A. (2005). The quality function deployment (QFD) approach in customer focused service production: an application study for hospitality industry. *Anatolia: Turizm Araştırma Dergisi*, 1(1), 59-81.
- URL-1) T.C. Sağlık Bakanlığı, Covid-19 Bilgilendirme Platformu, 2021.
- URL-2) <https://www.tse.org.tr/>
- URL-3) KIRMAN, C. (2020), TMMOB Tekstil Mühendisleri Odası, Genel Bilgilendirme Formu
- URL-4) <https://ticaret.gov.tr>

Bölüm 10

TS 647 ve Avrupa Ahşap Yapı Standardı Eurocode 5'in Örneklerle Karşılaştırılması

Özlem ÇALIŞKAN¹
Murat YÜNCÜLER²

1 Dr. Öğr. Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bilecik, ozlem.caliskan@bilecik.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5272-9552

2 İnşaat Yüksek Mühendisi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Yapı İşleri Teknik Daire Başkanlığı, Bilecik, murat.yunculer@bilecik.edu.tr, ORCID 0000-0002-7384-8825

1. GİRİŞ

Ahşap, insanlar tarafından kullanılan en eski yapı malzemelerinden biridir. 20. yüzyılda rutubete dayanıklı yapay reçine tutkalının bulunmasıyla günümüz koşullarında statik ve mukavemet hesaplarının ihtiyaç duyacağı her türlü kesit ve uzunlukta ahşap yapı elemanlarının üretilmesi sağlanmıştır. Ahşap yapılarda kullanılan birleşim araçlarının da aynı şekilde modern teknolojiye göre araştırılıp, yönetmeliklerde yer almaları ile ahşap yapı üretimi yaygınlaşmıştır. Sağlam, nitelikli ve denetlenebilir ahşap yapılar üretebilmek için belli kurallar, yönetmelikler ve standartlar gereklidir.

Bu çalışma kapsamında 1979 yılında yayımlanan ve halen yürürlükte olan “Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (TS 647)” [1] ile Avrupa Ahşap Yapı Standardı Eurocode 5 karşılaştırılmıştır. Eurocode 5’in bu çalışmada kullanılan karşılığı "TS-EN 1995-1-1; Ahşap Yapıların Tasarımı Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Binalar İçin Kurallar" olarak adlandırılan Türk Standardı Avrupa Normu’dur [2].

Ahşap yapı elemanları boyutlandırılmasında TS 647’de “Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım (Allowable Stress Design-ASD)” Yöntemi kullanılmaktadır. Eurocode 5’te ise güvenilirlik yöntemine göre bir kısmi faktör ile sınır durum kavramı esas alınır. Standartta Taşıma Gücü Sınır Durumu (Ultimate Limit State- ULS) ve Kullanılabilirlik Sınır Durumu (Serviceability Limit State-SLS) kavramlarına göre ahşap yapı elemanları boyutlandırılır. Taşıma Gücü Sınır Durumunu aşan yapının tamamı veya bir bölümü geçer, Kullanılabilirlik Sınır Durumunu aşan yapı ise projeden beklenen performans açısından yapıyı elverişsiz hale getirir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde TS 647 ve Eurocode 5 ile ilgili birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. TS 647’yi baz alarak ahşabın su muhtevası, elastisite modülü, ısı etkisi, rötre etkisi, ahşap kusurları (budaklar, lif eksikliği, enkesit düzensizliği, çatlaklar, lif kıvrıklığı), lif doğrultusu, rutubet, öz ağırlığı gibi özelliklerinden bahsedilmiştir [3-6]. Bir binanın sismik performansını değerlendirmişler, yanıcı olan ahşabın yangına maruz kaldığı durumlar için ısı analizi ve ahşap çerçeveli perde duvarların histeretik tepkilerini deneysel olarak araştırmışlar, çıkan sonuçları Eurocode 5 ile karşılaştırmışlardır [7-9]. Ahşap yapı elemanlarını Eurocode 5’i kullanarak incelemişlerdir [6, 8-10]. TS 647 ve Eurocode 5’in karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [11-14].

Türkiye’de bulunan tarihi ahşap yapılar ve camiler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Örnek olarak Hüseyin Avni Paşa Konağı, Ahi Evran Camiisi, Nur-i Osmaniye Camii, Yanıkoğlu Camii ve Ahmet Ratıp Paşa Köşkü verilebilir. Yapılan çalışmalarda yapıların tarihçelerinden bahsetmişler, malzeme özelliklerini, taşıyıcı sisteme ve yapı elemanlarına yapılan müdahaleleri,

yenileme çalışmalarını incelemişler, güçlendirme teknikleri hakkında öneriler sunmuşlar, sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizlerini yapmışlar, deprem davranışı hakkında bilgi vermişlerdir [15-20]. Ahşap makas ve ahşap çerçeve sistemlerin SAP 2000 programı kullanılarak analiz edildiği ve deneysel sonuçlarıyla karşılaştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [4, 14, 17, 19, 21- 24].

Prefabrik yapıların inşasında ana taşıyıcı elemanları olarak kullanılan çapraz çerçeveli ahşap paneller için çözümlenmeleri yapmışlar, yatay kuvvet etkisi karşısında mukavemeti yüksek olan ahşap yapıların deprem ve diğer yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. SAP 2000 programı ile ahşap bir yapının modellemesini yapmışlar, farklı çatı sistemlerini karşılaştırmışlar, farklı tasarım durumlarını kullanarak üç katlı ahşap çerçeveli panel binanın yatay kuvvetler altında davranışını incelemişler, yapının sismik hasarının azaltılmasına yönelik eğimli ahşap çatıları değerlendirmişler, dinamik davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır [7, 9, 25-31].

Dünyadaki gelişmiş ülkelere baktığımızda betonarme ve çelik yapıların genel anlamda barınma ihtiyacını karşılamak için kullanılmadığı daha çok iş merkezleri ve alışveriş merkezleri olarak kullanıldığı görülürken, ahşap yapılar ise daha çok barınma ihtiyacını karşılamıştır. Anadolu geleneği olan ahşap yapılar bir asır öncesine kadar hemen her yerde kullanılırken özellikle bakımının düzgün yapılamaması ve gün geçtikçe ülkemizdeki kereste ihtiyacının ormanlardan karşılanmasından kaynaklı orman azlığı ve genç nüfus artışının fazla olması sebebiyle çok katlı bina yapımına eğilimin olması gibi sebepler ahşap yapıya olan ilgiyi azaltmıştır.

Ahşap yapı malzemesi dünyada yaygın olarak kullanılmasına rağmen ülkemizde kullanımı diğer yapı sistemleri ile karşılaştırıldığında çok düşük düzeyde kalmıştır. Ülkemizde ahşabın yapılarda taşıyıcı iskelet olarak kullanımı, 1940'lı yıllardan itibaren yapı ve inşaat sektöründe çimento, taş ve çelik malzemelerin tercih edilmesiyle beraber belirgin bir düşüş yaşamıştır. Ahşap, bina yapı sistemleri içinde özellikle İsveç, Norveç, Finlandiya, Kanada ve ABD'nin kuzey eyaletleri ile Japonya, Yeni Zelanda ve Avustralya'da Türkiye'ye göre çok daha fazla kullanılmaktadır. Deprem riski altında bulunan Kanada'da konutların ve eğitim binalarının %90'ı, Japonya'da %42'si ve ABD'nin deprem kuşağında yer alan bölgelerinde ise konutların %92'si ahşap taşıyıcı sistemli yapılardır [32]. Türkiye'de ise bu durum tamamen farklılık göstermekte ve gelişmiş ülkelere nazaran ahşap konut oranı %5'i geçememektedir. Özellikle 1999 depremi sonrasında betonarme yapılardaki oluşan hasarlar ve yıkılmalar göz önüne alındığında, ahşabın önemi artmaya başlamış ve ülkemizde de birincil barınma ihtiyacı olmasa da gün geçtikçe kullanımı artmaya başlamıştır. [26]. Ahşap yapım teknikleri teknolojiye bağlı

olarak sürekli gelişmekte olup; sürekli güncellenen yönetmelik ve standartlar ile kullanım ömrü ve kalitesi arttırılmaktadır.

Bu çalışmada TS 647 ve Eurocode 5'e göre boyutlandırmada esas alınacak yükler, ahşap malzeme sınıfları, tasarım esasları, ahşap yapı elemanlarının boyutlandırılması ve birleşim elemanları incelenmiştir. Her iki yönetmeliğe göre hesap esasları incelenmiş ve örnek problemlerle karşılaştırma yapılmıştır.

2. TEMEL İLKELER VE KURALLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

2.1. Boyutlandırmada Esas Alınan Yükler

Yapı elemanlarının boyutlandırılması için yüklerin hesap değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. TS 647 yük hesapları için, Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri Türk Standardı (TS 498)'i, Eurocode 5 ise Eurocode 1: Yapı Etkileri Bölüm 1-1: Genel Etkiler, Yoğunluklar, Zati Ağırlık ve Yapılara Etkiyen Yükler Avrupa Standardı (EN 1991)'in ilgili bölümlerini dikkate almaktadır.

2.1.1. TS 647'ye Göre Hesaplarda Alınacak Yükler

TS 647'ye göre bir ahşap yapıda, dayanım ve stabilite hesap ve tahkiklerinin yapılmasında esas yükler ve ilave yükler olmak üzere iki yük çeşidi göz önünde bulundurulur.

- Esas yükler: Sabit yükler (taşıyıcı sistemin ve diğer yapı bileşenlerinin öz ağırlıkları), hareketli yükler (insan, eşya vb.), kar yükleri ve makinelerin kütle yükleri.

- İlave yükler: Rüzgâr, deprem, hareketli vinçlerin (kren) kaldırma ve fren yükleridir.

Dayanım ve stabilite tahkiki hesaplarında iki yükleme durumu göz önünde bulundurulur.

- Esas yüklerin etki ettiği yükleme durumu (EY): Bu yükleme durumu, esas yüklerin toplamının en elverişsiz durumda etki etmesi halidir.

- Esas ve ilave yüklerin birlikte etki ettiği yükleme durumu (EİY): Bu yükleme durumu esas ve ilave yüklerin toplamının, en elverişsiz durumda etki etmesi halidir. Bir yapı elemanına kendi ağırlığının dışında, sadece ilave yüklerin etki etmesi halinde, bu yüklerin en büyüğü esas yük olarak kabul edilir.

Proje tasarımı yapılırken yük kombinasyonları yapılır. Daha büyük kesitler ve daha fazla elemanı gerektiren en elverişsiz yükleme durumu geçerli yükleme durumu olarak kabul edilir ve hesaplar bu yükleme durumu esas alınarak yapılır.

TS 647’de yük hesaplamalarında TS 498’de verilenlere ve belirtilenlere uyulmalıdır denilmektedir. Toplam sabit, hareketli, kar ve rüzgâr yükleri TS 498’de verilen tablolardan bulunmaktadır [1].

2.1.2.Eurocode 5’e Göre Hesaplarda Alınacak Yükler ve Çevresel Etkiler

Eurocode 5’te yük hesapları ve çevresel etkiler için EN 1991’in ilgili bölümleri dikkate alınmıştır. Eurocode 5’e göre ahşap yapı tasarımında hesap ve tahkiklerin yapılmasında,

- EN 1991-1-1 Yoğunluklar, zati ağırlık ve yapılara etki eden yükler
- EN 1991-1-3 Kar yükleri
- EN 1991-1-4 Rüzgâr etkileri
- EN 1991-1-5 Isıl etkiler
- EN 1991-1-6 Uygulama esnasındaki etkiler
- EN 1991-1-7 Kazara oluşan etkiler standartları dikkate alınmalıdır.

Ayrıca tahkikler yapılırken Eurocode: Yapısal Tasarım Esasları (EN 1990:2002)’de belirtilen yük sınıfları dikkate alınmalıdır. EN 1990:2002’ye göre yükler etki ettiği süreye göre sınıflandırılır.

- Kalıcı yükler (G): Taşıyıcı sistemin ve diğer yapı bileşenlerinin kendi ağırlıkları, sabit teçhizatlar
- Değişken yükler (Q): Yapının kendi ağırlığı haricinde etkileyen insan, eşya yükü, rüzgâr yükü, kar yükü
- Kazara oluşan yükler (A): Patlamalar, araçların çarpma etkisi

Yük süresi ve rutubet içeriği ahşabın ve ahşap esaslı malzemelerin dayanım ve rijitlik özelliklerini etkilemektedir. Mekanik direnç ve kullanılabilirlik için tasarımda dikkate alınmalıdır. Ahşaptaki rutubet içeriği değişimlerinin tesirleri ile oluşan etkiler dikkate alınmalıdır.

Yük-süre sınıfları, yapı ömrünün belirli bir zaman aralığında etkileyen sabit yükün tesiri ile ifade edilir. Değişken bir etki için uygun sınıf, yükün zamanla tipik değişiminin bir hesabı esas alınarak belirlenmelidir. Yük etki süresi arttıkça ahşap ve ahşap esaslı elemanlarda dayanımda azalma olur. Bu etkiyi tasarımda dikkate alabilmek için yük etki sınıfları tanımlanmıştır [33].

Nem içeriği arttıkça ahşap ve ahşap esaslı elemanlarda dayanımda azalma olur. Bu etkiyi tasarımda dikkate alabilmek için malzemeler bir kullanım sınıfına atanmıştır. Kullanım sınıf sisteminde esas olarak dayanım değerlerinin belirlenmesi hedeflenir ve tanımlanmış çevre şartları altında şekil değiştirmelerin hesaplanması amaçlanır. Eurocode 5’te üç adet kullanım sınıfı tanımlanmıştır.

- Kullanım sınıfı 1: Malzemelerde 20°C sıcaklığa karşılık gelen bir rutubet içeriği ve yılda sadece birkaç haftada havadaki %65'i aşan bağıl nem ile ifade edilir. Çoğu yumuşak ahşap için kullanım sınıfı 1'de ortalama rutubet içeriği %12'yi aşmaz.

- Kullanım sınıfı 2: Malzemelerde 20°C sıcaklığa karşılık gelen bir rutubet içeriği ve yılda sadece birkaç haftada %85'i aşan bir havadaki ortam bağıl nem ile ifade edilir. Çoğu yumuşak ahşap için kullanım sınıfı 2'de ortalama rutubet içeriği %20'yi geçemez.

- Kullanım sınıfı 3: Kullanım sınıfı 2'dekinden daha büyük rutubet içeriğine neden olan iklim şartları ile tarif edilir.

-

2.2. Ahşabın Mekanik Özellikleri ve Sınıflandırılması

Ahşap, heterojen ve anizotrop (fiziksel ve mekanik özellikleri yüklenme doğrultusuna bağlı olarak değişen) bir yapı malzemesidir. Ahşabın mekanik özellikleri her ağaç türüne, aynı türün farklı iklimlerde yetişenlerinde hatta aynı ağaç gövdesinin değişik seviyelerde bulunan kısımlarında bile değişiklik gösterebilmektedir.

Mekanik özellikler malzemenin iç bünye yapısı ve rutubetine bağlı olarak değişmektedir. Mukavemet değerlerini en çok etkileyen faktörler lif doğrultusu, rutubet, özgül ağırlık ve yıllık halkalardır.

Ahşapta mukavemet değerlerinin çok fazla değişiklik göstermesi sebebiyle, ahşap inşaat malzemesinin emniyet gerilmeleri hesaplanırken, diğer inşaat malzemelerine göre çok daha büyük emniyet katsayıları göz önünde tutulur [34].

2.2.1. TS 647'ye Göre Ahşabın Sınıflandırılması

Türkiye'de, TS 647 "Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları" standardına göre ahşap, iğne yapraklı ağaç sınıfları, meşe ve kayın olmak üzere iki gruba ayrılır. Bünyesindeki kusurları göz önüne alarak iğne yapraklı ağaçlardan çam 3 sınıfa ayrılır. Sınıf numarası büyüdükçe budak, lif eğikliği, en kesit düzensizliği, çatlaklar gibi ahşap kusurlarının fazlaştığı ve emniyet gerilmelerinin düştüğü kabul edilir. Ahşap malzeme elastisite ve kayma modülleri, ahşap türüne göre değişmelerine karşın, kalite sınıflarından etkilenmez.

2.2.2. Eurocode 5'e Göre Ahşabın Sınıflandırılması

Eurocode 5'e göre ahşap malzeme, mekanik değerleri göz önüne alınarak "Yapı Kerestesi-Mukavemet Sınıfları" (Structural Timber-Strength Classes, EN 338) Standardı'nda belirtildiği şekilde sınıflandırılır. EN 338'e göre ahşap malzeme mekanik değerlerine göre 2 grup ve 20 sınıfa ayrılır.

Ahşap mekanik özelliklerine göre sınıflandırılırken ölçülen kriterler; eğilme dayanımı, liflere paralel çekme, liflere dik çekme, liflere paralel basınç, liflere dik basınç, makaslama, liflere paralel elastisite modülü, liflere dik elastisite modülü, makaslama modülü ve yoğunluktur. Bu kriterler ahşabın elastisite modülü, kopma modülü ve özgül ağırlığına bağlıdır. Ahşap sınıfları belirlenirken, ahşaba fiziksel zarar vermeyen akustik-ultrasonik uygulamalar, lokal yoğunluk ölçümü ve nem ölçümü gibi yöntemler kullanılır [11].

EN 338'de belirtilen iki grup C ve D olarak adlandırılır. C grubu, sıkça kullanılan çam, köknar, ladin, sedir gibi ağaçların bulunduğu yumuşak ağaç grubudur. İsimlendirme yapılırken C'den sonra gelen rakam, ahşabın karakteristik eğilme dayanımını ifade eder. D grubu içerisinde merbau, balau, teak gibi sert ağaçları içeren Güneydoğu Asya, Afrika, Avustralya gibi ülkelerde yetişen tropikal ağaçları barındırır.

2.3. Ahşap Yapı Elemanlarının Tasarım Esasları

Ahşap yapı elemanları boyutlandırılmasında TS 647'de "Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım (ASD)" yöntemi kullanılmaktadır. Eurocode 5'te güvenilirlik yönetimine göre bir kısmi faktör yöntemi ile sınır durum kavramı esas alınır. Standartta Taşıma Gücü Sınır Durumu (ULS) ve Kullanılabilirlik Sınır Durumu (SLS) kavramlarına göre tasarım kuralları sunulmuştur.

2.3.1. TS 647'ye Göre Tasarım Esasları

TS 647'de dayanım hesaplarında gerekli en kesit boyutlarının verilmesinden başka; elemanların, eklerin, birleşimlerin hesap sonucu bulunan en büyük gerilme değerleri ile emniyet gerilmeleri ayrı ayrı gösterilerek karşılaştırılmalıdır denilmektedir.

TS 647'de yapı elemanlarının boyutlandırılması "Emniyet Gerilmelerine Göre Tasarım Yöntemine" göre yapılmaktadır. Emniyet gerilmeleri yönteminde yapı elemanına tesir eden karakteristik yükler altında yapı elemanında oluşan gerilmelerin, o yapı elemanına ait emniyet gerilmelerinden küçük olması istenmektedir.

2.3.2. Eurocode 5'e Göre Tasarım Esasları

Eurocode'larda temel prensip olarak "güvenirlik yönetimi" esas alınır. EN 1990'da güvenilirlik, bir yapı veya taşıyıcı elemanın, tasarım ömrü de dâhil olmak üzere tasarımında dikkate alınan belirtilmiş gerekleri karşılayabilme yeterliliği şeklinde tanımlanır. Güvenirlik, çoğunlukla olasılık terimleriyle ifade edilir ve bir yapının güvenlik, kullanılabilirlik ve dayanıklılığını kapsar.

Yapısal tasarım ile ilgili niceliklerin (malzeme özellikleri, etkiler, geometri vb.) rastgele doğası göz önünde alındığında yapısal güvenilirlik değerlendirmesi deterministik yöntemle yapılamaz, bir olasılık analizi gerekir. Güvenirlik yönetiminde tahkik yapılırken olasılık hesapları kullanılır. Seviye III, seviye II ve seviye I olmak üzere üç adet güvenilirlik yöntemi vardır. Seviye III ve seviye II yöntemlerini istatistiki verilerin yetersiz olmasından dolayı genellikle pratik tasarımda uygulamak zordur. Seviye I yöntemi "kısmi faktör" yöntemi olarak adlandırılır. Bu yöntem, yapının gerekli güvenilirliğini, problem değişkenlerinin karakteristik değerlerini güvenlik elemanı kullanarak sağlayan bir dizi uyum esasına dayanır. Bunlar etki, malzeme ve geometrideki belirsizlikleri kapsayan kısmi faktörler ile temsil edilmektedir [33].

Ahşabın dayanım ve rijitlik özellikleri belirlenirken yük süresi, rutubet içeriği ve dış etkenler dikkate alınmalıdır. Pratikte kullanılan malzemenin dayanım ve rijitlik özellikleri ile test ortamında küçük boyutlu numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu bulunan dayanım ve rijitlik özellikleri arasında fark vardır. Pratikte kullanılan yapı malzemelerinin dayanım ve rijitlik özelliklerini gösteren değerler, standartlarda verilen malzeme özelliklerinin karakteristik değerlerinden daha düşüktür. Bu yüzden kısmi faktör yönteminde, malzemenin karakteristik değerleri kısmi faktöre bölünerek ve bir düzeltme faktörü ile çarpılarak tasarım değerine dönüştürülür. Böylelikle malzeme özelliklerini etkileyen belirsizlikler, kısmi faktörler ve düzeltme unsurları uygulanarak karakteristik değerler tasarım değerlerine dönüştürülerek dikkate alınmış olur.

Sınır durum tasarım (LSD) prensibine göre güvenlik tahkikinin amacı hasar olasılığının sabit bir değer altında kalmasını sağlamaktır. Bir yapı için tehlikeli olan her durum "sınır durum" olarak adlandırılır. Yapı bu sınır duruma eriştikten sonra artık işlevlerini yerine getiremez duruma gelir. Sınır durumları belirlenirken malzeme özellikleri (dayanım, rijitlik), malzemelerin zamana bağlı farklı davranışları (yük süresi, sünme), farklı iklim koşulları (sıcaklık, nem değişimleri) ve farklı tasarım durumları dikkate alınmalıdır. İki tip sınır durumu vardır;

- Taşıma gücü sınır durumu (ULS)
- Kullanılabilirlik sınır durumu (SLS)

Taşıma gücü sınır durumunu aşma, yapının tamamının veya bir bölümünün göçmesine neden olur. Kullanılabilirlik sınır durumunu aşma ise projenin gereksinimleri açısından yapıyı elverişsiz hale getirir. Görünümünü, dayanıklılığını veya işlevselliğini olumsuz etkileyen hasarlar oluşturur.

2.4. Taşıma Gücü Sınır Durumu

Taşıma gücü sınır durumu, yapı elemanlarının taşıyıcı özelliklerini yitirerek göçmeleri durumunda ulaşacakları taşıma kapasitelerinin yapı güvenliği açısından değerlendirilmesi sınır durumudur [35].

Taşıma gücü sınır durumu EN 1990:2002'ye göre [36];

- İnsanların güvenliği ve/veya
- Yapının güvenliği ile ilgilenen bir sınır durumu olarak tanımlanmıştır.

Kısaca taşıma gücü sınır durumu; belirli katsayılarla arttırılmış tasarım yükü ile hesaplanan etki değerlerinin, belirli faktörler ile azaltılmış tasarım dayanımlarından küçük olmasıdır.

Yapı tasarlanırken yapının maruz kalacağı yükler belirli katsayılar ile çarpılarak yapının maruz kalacağı kabul edilen tasarım yükleri bulunur. Malzeme dayanımları belli faktörler kullanılarak azaltılır ve tasarım dayanımları elde edilmiş olur. Çeşitli etkilerden dolayı tasarım dayanımlarının düşük, yapının maruz kalacağı kuvvetlerin fazla etki etmesi durumu düşünülerek hesap yapılır. Bu hesaba göre yapı ve her yapı elemanı hesaplanan tasarım yüküne karşı hesaplanan tasarım dayanımı ile kıyaslanır ve yapının bu koşullarda dayanıklı olması hedeflenir.

Eurocode 5'e göre ahşap yapılarda etkiler ve etkilerin kombinasyonları için Yapısal Tasarım Esasları Standardı (Basis of Structural Design, EN1990:2002) kullanılır. Taşıma gücü sınır durumuna göre üç adet etki kombinasyonu vardır.

- Değişken etkinin kombinasyon değeri ($\psi_0 Q_k$): Etkilerin kombinasyonuna bağlı olarak tesirlerin meydana gelme olasılığının aşıldığı, münferit etki karakteristik değeri ile yaklaşık aynı olacak şekilde seçilen, istatistiki değerlendirme esas alınarak da belirlenebilen bir değerdir. Bu değer $\psi_0 \leq 1$ kombinasyon faktörü ile çarpılarak karakteristik değer belirlenmiş bölümü olarak ifade edilebilir. ψ_0 kombinasyon faktörü taşıma gücü sınır durumu ve kullanılabilirlik sınır durumu için temel kombinasyon değeridir.

- Değişken etkinin tekrar değeri ($\psi_1 Q_k$): Referans dönem içerisinde, sadece küçük bir kısmı oluşturan toplam süre boyunca aşılması veya aşılma sıklığının verilen bir değerde sınırlanması için belirlenen, istatistiki değerlendirmenin de esas alınabildiği değerdir. Bu değer $\psi_1 \leq 1$ kombinasyon faktörü ile çarpılarak karakteristik değer belirlenmiş bölümü olarak ifade edilebilir. ψ_1 kombinasyon faktörü kazara oluşan etkileri içeren taşıma gücü sınır durumu ve kullanılabilirlik sınır durumu için geçerlidir.

- Değişken etkinin yarı sabit değeri ($\psi_2 Q_k$): Referans dönem içerisinde büyük kısmı oluşturan toplam süre boyunca aşılması için belirlenen değerdir. Bu değer $\psi_2 \leq 1$ kombinasyon faktörü ile çarpılarak karakteristik değer belirlenmiş bölümü olarak ifade edilebilir. ψ_2 kombinasyon faktörü kazara

oluşan etkileri içeren taşıma gücü sınır durumu, kullanılabilirlik sınır durumu, uzun süreli etkiler ve deprem etkilerinde kullanılır.

2.5.Kullanılabilirlik Sınır Durumu

Yapının öngörülen servis yükleri altında kullanılabilir kalması, bu yükler altında aşırı titreşim, deformasyon ve çatlama göstermemesi ve yapı güvenliğinin sağlanması için yapı elemanlarından her birinde kullanım yükleri altında oluşacak şekil değiştirme, yer değiştirme ve çatlama için tanımlanan sınır durumuna kullanılabilirlik sınır durumu denir [35].

Eurocode 5'e göre bir yapının etkilerinin (eksenel ve kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve birleşim yeri kayması gibi) tesirinden ve rutubetten ortaya çıkan şekil değiştirme, yüzey malzemelerine, tavanlara, döşemelere, bölmelere ve yüzey işlemlerine hasar verme ihtimaline ve işlevsel ihtiyaçların yanı sıra herhangi görünüş gereklerine bağlı olarak, uygun sınırlar içerisinde kalmalıdır. Bu sınırlar kullanılabilirlik sınır durumu olarak tarif edilmektedir.

Eurocode 5'te kullanılabilirlik sınır durumunda şekil değiştirme kavramı bulunmaktadır.

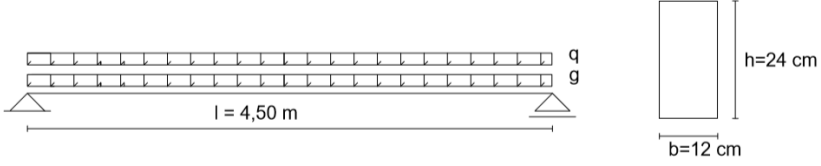
- Anlık şekil değiştirme (u_{inst}): Etkilerin karakteristik kombinasyonu için uygun elastisite modülleri, kesme modülleri ve kayma modüllerinin ortalama değerleri kullanılarak hesaplanır.
- Nihai şekil değiştirme (u_{fin}): Etkilerin yarı-kalıcı kombinasyonu için hesaplanmalıdır.

3. KARŞILAŞTIRMALI ÖRNEKLER

TS 647 ve Eurocode 5'in prensiplerini daha iyi anlamak ve farklılıkları görmek için ahşap yapı elemanları kiriş, kolon ve birleşim elemanı çivi tahkiki ile ilgili sayısal örnekler yapılmış ve tablolar üzerinde sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Örnek: Kiriş Tahkiki

Şekil 1'de ölçüleri, yükü ve kesiti verilen basit ahşap kirişin TS647 ve Eurocode 5'e göre tahkikleri yapılmış ve sonuçlar Tablo 1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 1- Kiriş tahkiki

$$g = 1.75 \text{ kN/m}$$

$$q = 2.80 \text{ kN/m}$$

C24 masif ahşap (EN 338)

1. Sınıf çam (TS 647)

$$l = 4.50 \text{ m}$$

$$b = 12 \text{ cm}$$

$$h = 24 \text{ cm}$$

TS 647'ye göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme: 1. Sınıf çam.
- Eğilme emniyet gerilmesi, $\sigma_{em} = 130 \text{ kgf/cm}^2$
- Makaslama emniyet gerilmesi, $\tau_{em} = 9 \text{ kgf/cm}^2$
- Elastisite modülü (liflere paralel), $E_{//} = 100000 \text{ kgf/cm}^2$
- Kuvvetlerin etkisi, $g+q=175+280=455 \text{ kgf/m}$

Eurocode 5'e göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme EN 338'e göre C24, masif ahşap
- Yük süre sınıfı: Orta dönemli
- Kullanım sınıfı: 2
- Karakteristik eğilme dayanımı $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$
- Karakteristik kayma dayanımı $f_{v,k} = 4 \text{ N/mm}^2$
- Ortalama elastisite modülü $E_{0,mean} = 11000 \text{ N/mm}^2$
- Malzeme özelliği için kısmi faktör $\gamma_M = 1.3$
- Yük süresinin ve rutubet içeriğinin tesirini dikkate alan

düzeltilme faktörü

$$k_{mod} = 0.80$$

- Binalar için kombinasyon faktörü $\psi_{2,1} = 0.3$
- Yapıya etkiyen yükler için kısmi faktörler elverişsiz yükleme

durumu için

$$\gamma_G = 1.35, \gamma_Q = 1.5$$

- Şekil değiştirme faktörü $k_{def} = 0.80$

Tablo 1- TS 647 ve Eurocode 5 kiriş tahkiki problem sonuçlarının karşılaştırılması

Örnek 1: Kiriş Tahkiki	TS 647	Eurocode 5
Toplam yük	$g+q=455 \text{ kgf/m}=4.46 \text{ kN/m}$	$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 6.56 \text{ kN/m}$
Eğilme momenti	$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} = 1151 \text{ kgfm} = 11.29 \text{ kNm}$	$M_{y,d} = \frac{E_d l^2}{8} = 16.61 \text{ kNm}$
Eğilme gerilmesi	$\sigma_e = \frac{M_{\max}}{W_x} = 99.98 \text{ kgf/cm}^2 = 9.80 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = 14.42 \text{ N/mm}^2$
Emniyet eğilme gerilmesi/ Tasarım eğilme dayanımı	$\sigma_{eem} = 130 \text{ kgf/cm}^2 = 12.75 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,y,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 14.77 \text{ N/mm}^2$
Kayma gerilmesi	$\tau = \frac{3}{2} \frac{Q_{\max}}{F} = 5.83 \text{ kgf/cm}^2 = 0.57 \text{ N/mm}^2$	$\tau_d = \frac{3V_d}{2bh} = 0.77 \text{ N/mm}^2$
Makaslama emniyet gerilmesi/ tasarım kayma dayanımı	$\tau_{em} = 9 \text{ kgf/cm}^2 = 0.88 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 2.46 \text{ N/mm}^2$
Sehim	$f = \frac{5}{48} \frac{M_{\max} l^2}{EI} = 1.76 \text{ cm}$	$w_{\text{inst}} = w_{\text{inst,g}} + w_{\text{inst,q}}$ $= \frac{5gl^4}{384E_{0,\text{mean}}I}$ $+ \frac{5ql^4}{384E_{0,\text{mean}}I}$ $= 1.59 \text{ cm}$ $w_{\text{fin}} = w_{\text{fin,g}} + w_{\text{fin,q}}$ $w_{\text{inst,g}}(1 + k_{\text{def}}) + w_{\text{inst,q}}(1 + \psi_{2,1} k_{\text{def}}) = 2.31 \text{ cm}$

Eurocode 5'te yükler, elverişsiz yükleme durumu için kısmi faktörlerle çarpılır. Eurocode 5 ile yapılan çözümde eğilme ve kayma gerilmesi değerleri TS 647'ye göre daha fazla çıkmıştır. Eurocode 5'te yükler kısmi faktörlerle çarpıldığı için daha güvende kalmıştır. Her iki yönetmeliğe göre de kirişin eğilmeye ve kesmeye karşı yeterli olduğu görülmüştür. Sehim kontrolü yapıldığında her iki yönetmeliğe göre sehim değerleri aşılmıştır. Eurocode 5'te anlık sehim ve nihai sehim kontrolleri yapılmış ve anlık sehim limiti aşılmıştır. Bundan dolayı kesit değerleri büyütülmeli ya da malzeme sınıfının değiştirilmesi (arttırılması) gerekmektedir. Kesit değeri büyütüldüğünde her iki yönetmeliğe göre sehim değerlerinin sağlandığı görülmüştür.

TS 647'e göre sehim hesabı;
Sehim (f) Denklem 1'de verilen formül ile hesaplanır.

$$f = \frac{5}{48} \frac{M_{\max} l^2}{EI} \leq \frac{1}{k} \quad (1)$$

Burada, f sehim, M_{\max} maksimum moment, E elastisite modülü, l eleman açıklığı, I atalet momenti, k sehim üst sınır değeridir.

TS 647' ye göre k sehim sınır değerleri;

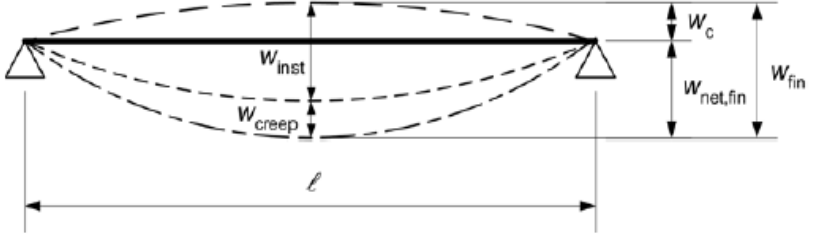
- Konut, büro ve işyerleri ile fabrika ve atölyelerde döşemelerin sabit ve hareketli yükler göz önüne alınarak hesaplanacak sehim değerleri döşeme kirişi açıklığının $\frac{1}{300}$ ' ünü aşmamalı.
- Aşıklar ve merteklerde sehim değerleri açıklığın $\frac{1}{200}$ ' ünü aşmamalı.
- Konsol kirişlerde sehim değerleri açıklığın $\frac{1}{50}$ ' sini aşmamalıdır.

Eurocode 5'e göre sehim hesabı; Kullanılabilirlik sınır durumuna göre bir yapının etkilerinin (eksenel ve kesme kuvvetleri, eğilme momentleri birleşim yeri kayması gibi) tesirinden ve rutubetten ortaya çıkan şekil değiştirme, yüzey malzemelerine tavanlara, döşemelere, bölmelere ve yüzey işlemlerine hasar verme ihtimaline ve işlevsel ihtiyaçların yanı sıra herhangi görünüş gereklerine bağlı olarak, uygun sınırlar içerisinde kalmalıdır. Bu sınırlardan bir tanesi sehimler için sınır değerleridir.

Bir kirişe uygulanan etkilerin kombinasyonundan kaynaklanan sehim bileşenleri Şekil 2'de görülmektedir. Mesnetler arası düz bir hattın altında kalan $W_{\text{net,fin}}$ net sehimi Denklem 2'deki gibi alınmalıdır.

$$W_{\text{net,fin}} = W_{\text{inst}} + W_{\text{creep}} - W_c = W_{\text{fin}} - W_c \quad (2)$$

Burada $w_{\text{net,fin}}$ net nihai sehim, w_{inst} anlık sehim, w_{creep} sünme sehimi, w_c ters sehim, w_{fin} nihai sehimdir.



Şekil 2. Şehimin bileşenleri (Eurocode 5)

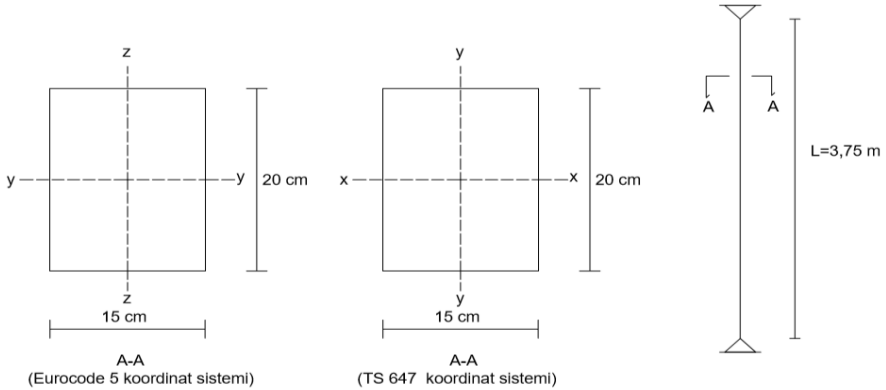
1 açıklığına sahip kirişler için sehminin sınır değerlerinin önerilen aralığı, şekil değiştirme seviyesinin kabul edilebilir olduğu varsayımına bağlı olarak Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Eurocode 5’te kirişlerin sehimi için sınır değerlere ait örnekler

	W_{inst}	$W_{net,fin}$	W_{fin}
İki mesnet üzerindeki kiriş	1/300 - 1/500	1/250 - 1/350	1/150 - 1/300
Konsol kiriş	1/150 - 1/250	1/125 - 1/175	1/75 - 1/150

Örnek: Kolon Tahkiki

Şekil 3’de ölçüleri, yükü ve kesiti verilen ahşap kolonun TS647 ve Eurocode 5’e göre tahkiklerinin yapılmış ve Tablo 3’te sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2- Kolon tahkiki

$g = 30 \text{ kN}$

C18 masif ahşap (EN 338)

$l = 3.75 \text{ m}$

$q = 50 \text{ kN}$

1. Sınıf çam (TS 647)

$b = 15 \text{ cm}$

$h = 20 \text{ cm}$

TS 647'ye göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme : 1. Sınıf çam
- Liflere paralel basınç emniyet gerilmesi $\sigma_{bem//} = 110 \text{ kgf/cm}^2$

Eurocode 5'e göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme EN 338'e göre C18, masif ahşap
- Yük süre sınıfı: Orta dönemli
- Kullanım sınıfı: 2
- Karakteristik basınç dayanımı (liflere paralel) $f_{c,0,k} = 18 \text{ N/mm}^2$
- % 5 Elastiste modülü (liflere paralel) $E_{0,05} = 6 \text{ kN/mm}^2$
- Malzeme özelliği için kısmi faktör $\gamma_M = 1.3$
- Yük süresinin ve rutubet içeriğinin tesirini dikkate alan düzeltme faktörü $k_{mod} = 0.80$
- Yapıya etkiyen yükler için kısmi faktörler elverişsiz yükleme durumu için $\gamma_G = 1.35$ $\gamma_Q = 1.5$
- Sistem dayanım faktörü $k_{sys} = 1$ (tekil kolon için)

Tablo 3- TS 647 ve Eurocode 5 kolon tahkiki problem sonuçlarının karşılaştırılması

Örnek 2: Kolon Tahkiki	TS 647	Eurocode 5
Toplam yük	$g+q = 8000 \text{ kgf} = 78.45 \text{ kN}$	$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k = 115.5 \text{ kN}$
Burkulma gerilmesi/ Tasarım basınç gerilmesi	$\sigma_\omega = \frac{\omega \times N}{F} = 65.06 \text{ kgf/cm}^2$ $= 6.38 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = 3.87 \text{ N/mm}^2$
Basınç emniyet gerilmesi/ Tasarım basınç dayanımı	$\sigma_{bem//} = 110 \text{ kgf/cm}^2$ $= 10.79 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} k_{sys} f_{c,0,k}}{\gamma_M}$ $= 11.08 \text{ N/mm}^2$

Eurocode 5'te yükler, elverişsiz yükleme durumu için kısmi faktörlerle çarpılmıştır. TS 647 kolondaki basınç gerilmesi değeri Eurocode 5'te bulunan değere göre daha fazla çıkmıştır. Her iki yönetmeliğe göre basınç emniyet değerleri aşılmamış ve kolon basınca karşı uygun çıkmıştır.

Basınç değerlerinin aşılmış aşılmadığı TS 647'de masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri tablosundan bulunabilir (Tablo 4).

Tablo 4. TS 647’de masif ahşap malzemenin emniyet gerilmeleri

Gerilme Türü	Notasyon	Ahşap Malzemenin Cins ve Sınıfına Göre Gerilme Değerleri (kgf/cm ²)			
		İğne Yapraklı Ağaç Sınıfları			Meşe ve Kayın
		I	II	III	
Eğilme	σ_{eem}	130	100	70	110
Liflere paralel çekme	$\sigma_{\text{cem//}}$	105	85	0	110
Liflere paralel basınç	$\sigma_{bem//}$	110	85	60	100
Liflere dik basınç	$\sigma_{bem\perp}$	20	20	20	30
Makaslama	τ_{em}	9	9	9	10

Eurocode 5’e göre basınç değerleri;

Herhangi bir yapı tasarlarken basınca çalışan elemanların yönetmeliklerdeki narinlik şartlarını sağlaması gerekmektedir. Narinlik Denklem 3’te verilen eşitlik ile bulunabilir.

$$\lambda = \frac{L_e}{i} \quad (3)$$

Burada λ narinlik, i atalet yarıçapı, L_e basınç çubuğunun etkin boyudur.

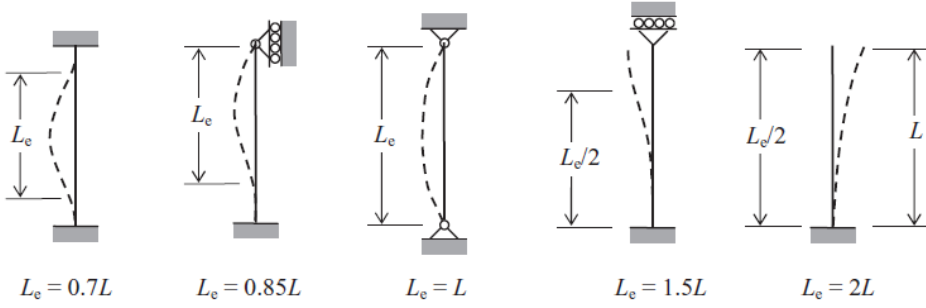
Narinlik y-y ve z-z eksenine göre değişiklik gösterir (Denklem 4-5).

$$\lambda_y = \frac{L_{e,y}}{i_y} = \frac{L_{e,y}}{h/\sqrt{12}} \quad (4)$$

$$\lambda_z = \frac{L_{e,z}}{i_z} = \frac{L_{e,z}}{h/\sqrt{12}} \quad (5)$$

Burada λ_y y eksenine göre eğilmeye karşılık gelen narinlik oranları (sehim z doğrultusunda), λ_z z eksenine göre eğilmeye karşılık gelen narinlik oranları (sehim y doğrultusunda) $L_{e,y}$ ve $L_{e,z}$ basınç çubuklarının y ve z eksenine göre etkin boyu, i_y ve i_z atalet yarıçaplarıdır.

İngiliz Yapısal Ahşap Standardı’nda (British Standard Structural Use of Timber, BS 5268-2:2002) etkin boy / gerçek boy (L_e/L) oranları verilmiştir. Şekil 4’te gösterildiği gibi iki ucu ankastre çubukta $L_e/L = 0.7$, iki ucu mafsallı çubukta $L_e/L = 1$, bir ucu ankastre bir ucu mafsallı çubukta $L_e/L = 0.85$, bir ucu ankastre bir ucu boştaki çubukta $L_e/L = 2$, bir ucu ankastre bir ucu hareketli mafsalda $L_e/L = 1.5$ olarak alınmıştır.



Şekil 4. Basınç çubuklarında etkin boy [37]

Eurocode 5'te basınç tahkiki yapılırken göreceli narinlik oranları kullanılır. Ayrıca kolon tahkiki yapılırken $E_{0,05}$ gibi karakteristik özellikler kullanılarak tahkik yapılmalıdır denilmektedir (Denklem 6-7).

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (7)$$

Burada, $\lambda_{rel,y}$ y eksenine göre eğilmeye karşılık gelen göreceli narinlik oranı, $\lambda_{rel,z}$ z eksenine göre eğilmeye karşılık gelen göreceli narinlik oranı, λ_y y eksenine göre eğilmeye karşılık gelen narinlik oranı, λ_z z eksenine göre eğilmeye karşılık gelen narinlik oranı, $f_{c,0,k}$ lif boyunca karakteristik basınç dayanımı, $E_{0,05}$ elastisite modülünün % 5'lik değeridir.

$\lambda_{rel,y}$ ve $\lambda_{rel,z} \leq 0.3$ ise liflere paralel doğrultuda basınç tahkiki için Denklem 8 ve 9'daki şart sağlanmalıdır.

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (8)$$

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \leq f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} k_{sys} f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (9)$$

Burada, $\sigma_{c,0,d}$ lif boyunca tasarım basınç gerilmesi, $f_{c,0,d}$ lif boyunca tasarım basınç dayanımı, N_d eksenel basınç kuvveti, A enkesit alanı, k_{mod} yük süresi ve rutubet içeriği için düzeltme faktörü, k_{sys} sistem dayanım faktörü, $f_{c,0,k}$ lif boyunca karakteristik basınç dayanımı, γ_M malzeme özellikleri için kısmi faktördür.

Birçok eş aralıklı benzer elemanların, bileşenlerin veya aşıp donanımların bir sürekli yük dağılım sistemi ile yanal olarak birleşmesi durumunda (lamine tabliye kaplamaları, döşemeler), eleman dayanım özellikleri bir k_{sys} sistem dayanım faktörü ile çarpılabilir. Sürekli yük dağılım sisteminin yükleri bir elemandan komşu elemanlara aktarımında yeterli olması durumunda k_{sys} faktörü 1.1 olarak alınır. Kolon tahkiki yapılırken, kolon bileşenlerden oluşmamişsa tekil

kolon ise k_{sys} faktörü göz ardı edilir. Kirişlerde tahkik yapılırken kirişler arasında yük aktarımının olmadığı durumlarda ve kirişin bileşenlerden oluşmadığı durumlarda k_{sys} faktörü kullanılmaz. k_{sys} sistem dayanım faktörü, masif ahşaptan veya tutkallı lamine elemandan yapılan lamine tabliye kaplamaları ve döşemeler için kullanılır.

$\lambda_{rel,y}$ ve $\lambda_{rel,z} > 0.3$ ise liflere paralel doğrultuda basınç tahkiki için Denklem 10 ve 11'deki şart sağlanmalıdır.

$$\lambda_{rel,y} > 0.3 \text{ ise } \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,y} f_{c,0,d} \quad (10)$$

$$\lambda_{rel,z} > 0.3 \text{ ise } \sigma_{c,0,d} \leq k_{c,z} f_{c,0,d} \quad (11)$$

Burada $\sigma_{c,0,d}$ lif boyunca tasarım basınç gerilmesi, $f_{c,0,d}$ lif boyunca tasarım basınç dayanımı, $k_{c,y}$ ve $k_{c,z}$ duraysızlık faktörüdür (Denklem 12-15).

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (12)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (13)$$

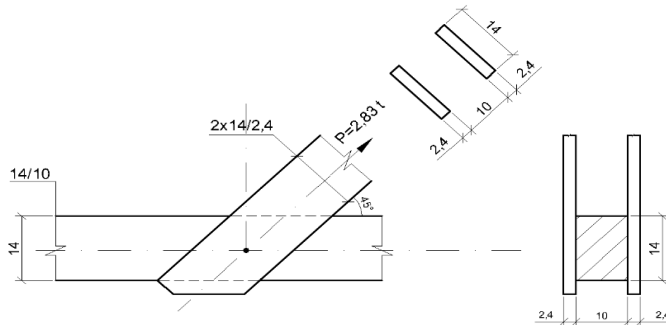
$$k_y = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0.3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (14)$$

$$k_z = 0.5 (1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0.3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (15)$$

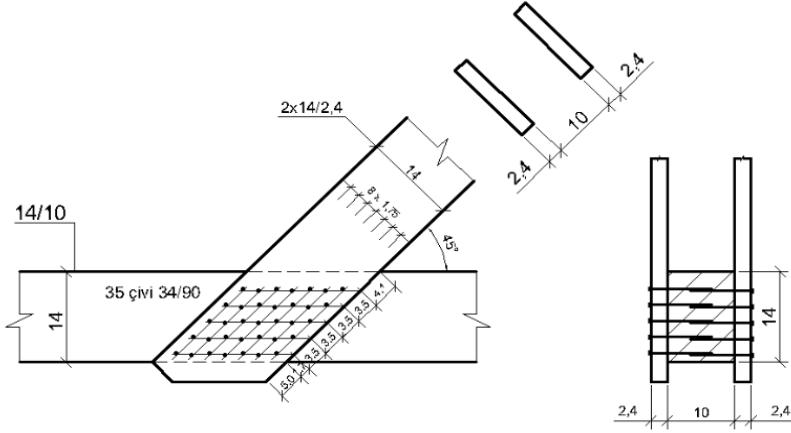
Burada $k_{c,y}$, $k_{c,z}$, k_y , k_z , duraysızlık faktörleri, $\lambda_{rel,y}$ y eksenine göre eğilmeye karşılık gelen göreceli narinlik oranı, $\lambda_{rel,z}$ z eksenine göre eğilmeye karşılık gelen göreceli narinlik oranı, β_c düzgünlük faktörüdür. β_c masif ahşap için 0.2 alınır.

Örnek: Birleşim Elemanı Çivi Tahkiki

Şekil 5'te ölçüleri, yükü ve kesiti verilen ahşap diyagonal, kafes kirişin alt başlığına çivi ile birleştirilecektir. Şekil 6'da TS 647'ye göre Şekil 7'de ise Eurocode 5'e göre çivili birleşim detay resimleri, Tablo 5'te TS 647 ve Eurocode 5'e göre problem sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

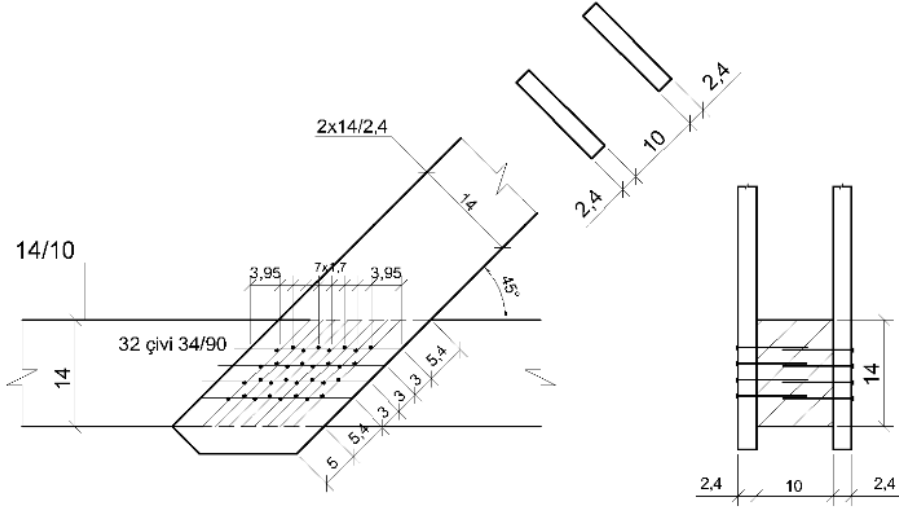


Şekil 5- Çivili birleşim tahkiki



Bütün ölçüler cm'dir.

Şekil 6- TS 647'ye göre çivili birleşim detay resmi



Bütün ölçüler cm'dir.

Şekil 7- Eurocode 5'e göre çivili birleşim detay resmi

TS 647'ye göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme : 2. Sınıf çam
- Liflere paralel çekme emniyet gerilmesi $\sigma_{çem//} = 110 \text{ kgf/cm}^2$

Eurocode 5'e göre karakteristik dayanım ve rijitlik özellikleri:

- Seçilen malzeme EN 338'e göre C22, masif ahşap
- Yük süre sınıfı: Orta dönemli

- Kullanım sınıfı: 2
- Karakteristik çekme dayanımı (liflere paralel) $f_{t,0,k} = 13 \text{ N/mm}^2$
- Karakteristik yoğunluk $\rho_k = 340 \text{ kg/m}^3$
- Malzeme özelliği için kısmi faktör birleşimler için $\gamma_M = 1.3$
- Yük süresinin ve rutubet içeriğinin tesirini dikkate alan düzeltme faktörü $k_{mod} = 0.80$
- Yapıya etkiyen yükler için kısmi faktörler elverişsiz yükleme durumu için $\gamma_G = 1.35$ $\gamma_Q = 1.5$
- Çivinin çekme dayanımı $f_u = 600 \text{ N/mm}^2$ (EN 14592'den)
- Uygulanan çekme kuvveti $F_{v,Ed} = 2830 \text{ kgf} = 27752.8 \text{ N}$

Geometrik özellikler:

- Kenar parça kalınlığı, $t_1 = 24 \text{ mm}$
- İçteki parçanın kalınlığı, $t_2 = 100 \text{ mm}$
- Parçaların genişliği, $h = 140 \text{ mm}$
- Çivi çapı, $d = 3.4 \text{ mm}$
- Çivi uzunluğu, $l = 90 \text{ mm}$
- $t_{pen} = l - t_1 = 90 - 24 = 66 \text{ mm}$

Tablo 5- TS 647 ve Eurocode 5 birleşim elemanı çivi tahkiki problem sonuçlarının karşılaştırılması

Örnek 3: Birleşim Elemanı	TS 647	Eurocode 5
Çivi Tahkiki		
Bir çivinin emniyetle taşıyabileceği yük	$P_{em}^1 = 43.13 \text{ kgf} = 422.96 \text{ N}$	$F_{v,Rd} = 489.58 \text{ N}$
Çivi sayısı	35 adet	32 adet
Çekme gerilmesi/ Tasarım çekme gerilmesi	$\sigma_1 = \frac{N}{F} = 50.74 \text{ kgf/cm}^2$ $= 4.98 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{t,0,d}}{A_{net}} = 4.13 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_2 = \frac{N}{F} = 30.63 \text{ kgf/cm}^2$ $= 3 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{t,2,0,d} = \frac{N_{t,2,0,d}}{A_{net}} = 1.98 \text{ N/mm}^2$
Çekme emniyet gerilmesi/ Tasarım çekme dayanımı	$\sigma_{çem//} = 85 \text{ kgf/cm}^2$ $= 8.34 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} f_{t,0,k}}{\gamma_M}$ $= 8 \text{ N/mm}^2$

Eurocode 5'e göre bir çivinin emniyetle taşıyabileceği yük değeri TS 647'ye göre daha fazla çıkmıştır. Bu yüzden birleşimde kullanılacak çivi sayısı Eurocode 5'te TS 647'ye göre daha az bulunmuştur. Her iki yönetmeliğe göre çivili birleşimlerin çekmeye karşı uygun olduğu tespit edilmiştir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME

Türkiye’de ahşap yapı yönetmeliği olarak 1979 yılında yayımlanan ve yürürlükte olan TS 647 Ahşap Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları kullanılmaktadır. Ayrıca Genel Teknik Şartname, imar yönetmelikleri ve deprem yönetmeliklerinde de ahşap yapılar ile ilgili bilgiler verilmiştir. Türkiye’de ahşap yapıların tasarım ve uygulamasına yönelik kurallar yönetmeliklerde yüzeysel ve sınırlayıcı olarak aktarılmış ve çağın teknolojik gelişmelerinin gerisinde kalmıştır. Fakat 18 Mart 2018 tarihinde yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) ile birlikte deprem etkisi altındaki ahşap yapıların panellerden oluşabileceği kabul edilerek tasarım olarak Eurocode 5 (Design of Timber Structures) esas alınmıştır. Böylelikle Eurocode 5 ülkemizde resmi olarak ilk defa bu yönetmeliğin kapsamında yer almıştır. Ahşap yapı hesaplamaları için bu bir başlangıç olsa da yeterli değildir. TBDY 2018’de sadece ahşap panel sistemlerin deprem etkisi altındaki hesap kuralları anlatılmıştır. Ahşap yapıların tasarım ve hesap kurallarının detaylı bir şekilde öğrenilebilmesi ve uygulanabilmesi için TS 647’nin yenilenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada TS 647 ve Eurocode 5’te boyutlandırmada esas alınan yükler, ahşap malzemenin mekanik özellikleri ve sınıflandırılması, tasarım esasları yönünden karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ve incelenen örnekler sonucunda genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Boyutlandırmada esas alınan yükler karşılaştırıldığında Eurocode 5’te yük süresi etkisinin tasarımda dikkate alınması gerektiği, yük etki süresi arttıkça ahşap ve ahşap esaslı elemanların dayanımında azalma olacağı belirtilmiştir. Bu etkiyi dikkate alabilmek için yük-etki sınıfları tanımlanmıştır. Eurocode 5’te çevre şartları ve nem etkisinin tasarımda dikkate alınması gerektiği, nem içeriği arttıkça ahşap ve ahşap esaslı elemanların dayanımında azalma olacağı belirtilmiştir. Bu etkiyi tasarımda dikkate alabilmek için malzemeler kullanım sınıfına ayrılmıştır. Bu yönleriyle Eurocode 5, TS 647’ye göre daha kapsamlıdır.

Ahşap malzemenin mekanik özelliklerine göre sınıflandırma yapılırken TS 647’de bünyesindeki kusurlara göre iğne yapraklı ağaçlardan çam 3 sınıfa ayrılır. Sınıf numarası büyüdükçe hataların fazlalaştığı ve emniyet gerilmelerinin düştüğü kabul edilir. Eurocode 5’te kullanılan ahşap malzemeler EN 338 (Yapı Kerestesi – Mukavemet Sınıfları) standardına göre C ve D olmak üzere 2 grup ve 20 sınıfa ayrılır. Eurocode 5’te kullanılan ahşap sınıfları TS 647’ye göre daha detaylıdır. TS 647 ve Eurocode 5 arasında hesaplarla karşılaştırma yapılırken en büyük sıkıntı her iki yönetmelikteki ağaç sınıflandırmasındaki farklılıktan kaynaklanmıştır. TS 647’deki ağaç muadillerinin Eurocode 5’te hangi sınıfa denk geldiği belirlenememiştir. Bu sebeple yönetmelikler arasında farklılık gösteren

bir ahşap malzeme her iki yönetmelikle de aynı malzeme tipi varsayılarak hesap yapıldığı takdirde farklı sonuçlar elde edilmesi muhtemeldir.

Eurocode 5'e göre ahşap, ahşaba fiziksel zarar vermeyen hassas ölçümler ve yöntemler sonucunda detaylı bir şekilde sınıflandırılmıştır. TS 647'de ise sadece ahşabın bünyesindeki kusurlara göre sınıflandırma yapılmıştır. Günümüz koşullarında nitelikli ahşap yapılar üretebilmek için TS 647'deki sınıflandırma yetersiz kalmıştır. TS 647'de güncel sınıflandırma yöntemleri kullanılarak ve Türkiye'deki ağaç türleri araştırılarak daha detaylı bir sınıflandırma yapılması ülkemiz koşulları da düşünüldüğünde ahşabın yeteri kadar ve doğru şekilde kullanılarak israfın önlenmesine katkı sağlayabilir. Ahşap sınıflandırmasındaki hassasiyet ahşabın etkin, verimli kullanılmasını sağlar. Doğru ahşap malzemenin seçilmesi ile daha ekonomik ahşap yapılar üretilir.

Tasarım esasları yönünden karşılaştırma yapıldığında TS 647'de emniyet gerilmelerine göre tasarım yöntemi kullanılmıştır. Eurocode 5'te ise güvenilirlik yöntemine göre bir kısmi faktör yöntemi ile sınır durum kavramı esas alınmıştır. Eurocode 5'te taşıma gücü sınır durumu ve kullanılabilirlik sınır durumu kavramlarına göre ahşap yapı elemanları boyutlandırılmıştır. Eurocode 5'te pratikte kullanılan yapı malzemelerinin dayanım ve rijitlik özelliklerinin, standartlarda verilen karakteristik değerlerden daha düşük olduğu kabul edilmiştir. Malzemenin karakteristik değerleri kısmi faktöre bölünerek ve düzeltme faktörü ile çarpılarak tasarım değerine dönüştürülür. Bundan dolayı yapı güvenliği açısından TS 647'deki emniyet gerilmelerine göre tasarım yönteminin, taşıma gücü yöntemiyle değiştirilmesi gerekmektedir.

TS 647'de sadece masif ahşap ve kontrplaklar üzerine çalışılmasına rağmen Eurocode 5'te tutkallı lamine ahşap, soyma tabakalı lamine kereste gibi günümüzde kullanılan yapısal ahşap ürünler ile mekanik bağlantı elemanlarıyla birleştirilen ahşap esaslı levhalardan oluşan binaların tasarımına da yer verilmiştir. TS 647'nin çağımız gelişmelerini yakalayacak şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR

İncelenen örnekler ve TS 647- Eurocode 5'in karşılaştırılması neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Ahşap ve ahşap esaslı elemanların dayanımı hesaplanırken çevre şartları ve nem etkisinin tasarımda dikkate alınması gerekmektedir. Eurocode 5'te bu etkileri dikkate alacak şekilde yük etki sınıfları tanımlı iken TS 647'de böyle bir sınıflandırma bulunmamaktadır.

- Mekanik özelliklerine göre sınıflandırma yapıldığında TS 647 ahşabı 3 sınıfa ayırırken Eurocode 5, 2 grup ve 20 sınıfa ayırmaktadır. Eurocode 5'teki sınıflandırma ahşaba fiziksel zarar vermeyen hassas ölçümler ve yöntemler sonucunda detaylı bir şekilde yapılırken TS 647'de ahşabın bünyesindeki kusurlara göre sınıflandırılmıştır. Günümüz koşullarında Türkiye'de nitelikli ahşap yapılar üretebilmek için TS 647'deki sınıflandırmanın değiştirilmesi gerekmektedir.

- Eurocode 5, güvenilirlik yöntemine göre tasarım yöntemini kullanırken TS 647 emniyet gerilmelerine göre tasarım yöntemini kullanmaktadır. TS 647'deki emniyet gerilmelerine göre tasarım yönteminin taşıma gücü yöntemiyle değiştirilmesi gerekmektedir.

- TS 647'nin günümüzde kullanılan yapısal ahşap ürünler ile mekanik bağlantı elemanlarıyla birleştirilen ahşap esaslı levhalardan oluşan binaların tasarımına yer verecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

- Türkiye'de bulunan ağaç türleri araştırılarak deha detaylı bir sınıflandırma yapılması ve TS 647'nin güncellenmesi gerekmektedir. Eurocode 5'te bulunan sınıflandırma Türkiye'deki mevcut durumu yansıtmamaktadır.

Semboller

A	Mesafe, Aralık
b	Genişlik
d	Birleşim Elemanı Çapı
E_d	Elastisite Modülünün Tasarım Değeri
E_{mean}	Elastisite Modülünün Ortalama Değeri
$E_{mean,fin}$	Elastisite Modülünün Nihai Ortalama Değeri
$E_{0.05}$	Elastisite Modülünün % 5'lik Değeri
f	Sehim
$f_{c,0,d}$	Lif Boyunca Tasarım Basınç Dayanımı
$f_{c,0,k}$	Lif Boyunca Karakteristik Basınç Dayanımı
$f_{t,0,d}$	Lif Boyunca Tasarım Çekme Dayanımı
$f_{t,0,k}$	Lif Boyunca Karakteristik Çekme Dayanımı
$f_{c,90,d}$	Liflere Dik Doğrultuda Tasarım Basınç Dayanımı
$f_{c,90,k}$	Liflere Dik Doğrultuda Karakteristik Basınç Dayanımı
$f_{m,k}$	Karakteristik Eğilme Dayanımı
$f_{m,y,d}$	y Asal Eksenine Göre Tasarım Eğilme Dayanımı
$f_{m,z,d}$	z Asal Eksenine Göre Tasarım Eğilme Dayanımı
$f_{u,k}$	Karakteristik Çekme Dayanımı
$f_{v,d}$	Tasarım Kayma Dayanımı
$f_{v,k}$	Karakteristik Kayma Dayanımı
$F_{ax,Rk}$	Bağlantı Elemanının Karakteristik Geri Çekme Kapasitesi
$F_{v,Ed}$	Bağlantı Elemanının Birim Kesme Düzlemindeki Tasarım Kesme Kuvveti
$F_{v,Rd}$	Bağlantı Elemanı Başına Tasarım Yük Taşıma Kapasitesi
$F_{v,Rk}$	Bağlantı Elemanının Karakteristik Yük Taşıma Kapasitesi
G_d	Kesme Modülünün Tasarım Değeri
G_k	Kalıcı Etkinin Karakteristik Değeri
G_{mean}	Kesme Modülünün Ortalama Değeri
h	Yükseklik
i	Atalet Yarıçapı
I	Atalet Momenti
k	Sehim Üst Sınır Değeri
$k_{c,y}$ ve $k_{c,z}$	Duraysızlık Faktörü
k_m	Eğilme Gerilmelerinin Tekrar Dağıtımını Dikkate Alan Faktör
k_{mod}	Yük Süresi ve Rutubet İçeriğinin Tesirini Dikkate Alan Bir Düzeltme Faktörü
k_{def}	Şekil Değiştirme Faktörü
k_h	Yükseklik Faktörü
k_{svs}	Sistem Dayanım Faktörü
l	Açıklık, Temas Uzunluğu
L_e	Basınç Çubuğunun Etkin Boyu
n	Birleşim Elemanı Sayısı
N	Birleşim Elemanı Taşıma Gücü
R_d	Bir Yük Taşıma Kapasitesinin Tasarım Değeri
R_k	Yük Taşıma Kapasitesinin Karakteristik Değeri
s	Çakma Derinliği

S_k	Burkulma Boyu
w_{inst}	Anlık Sehim
w_{fin}	Nihai Sehim
W	Mukavemet Momenti
X_d	Dayanım Özelliğinin Tasarım Değeri
X_k	Dayanım Özelliğinin Karakteristik Değeri
γ_M	Malzeme Özelliği İçin Kısmi Faktör
γ_M	Malzeme Özelliği İçin Kısmi Faktör
$\psi_0 Q_k$	Değişken Etkinin Kombinasyon Değeri
$\psi_1 Q_k$	Değişken Etkinin Tekrar Değeri
$\psi_2 Q_k$	Değişken Etkinin Yarı Sabit Değeri
γ_G	Kalıcı Etki İçin Kısmi Faktör
γ_Q	Değişken Etki İçin Kısmi Faktör
Ψ	Binalar İçin Kombinasyon Faktörü Değeri
σ_{cem}	Çekme Emniyet Gerilmesi
σ_{cem}	Eğilme Emniyet Gerilmesi
$\sigma_{bem//}$	Liflere Paralel Basınç Emniyet Gerilmesi
$\sigma_{bem.}$	Liflere Dik Basınç Emniyet Gerilmesi
$\sigma_{cem//}$	Liflere Paralel Çekme Emniyet Gerilmesi
σ_ω	Burkulma Gerilmesi
$\sigma_{t,0,d}$	Lif Boyunca Tasarım Çekme Gerilmesi
$\sigma_{c,0,d}$	Lif Boyunca Tasarım Basınç Gerilmesi
$\sigma_{m,y,d}$	y Asal Eksenine Göre Tasarım Eğilme Gerilmesi
$\sigma_{m,z,d}$	z Asal Eksenine Göre Tasarım Eğilme Gerilmesi
$\sigma_{1,em}$	Ezilme Emniyet Gerilmesi
τ_{em}	Makaslama Emniyet Gerilmesi
τ_d	Tasarım Kayma Gerilmesi
ω	Burkulma Katsayısı
λ	Narinlik
$\lambda_{rel,v}$	y Eksenine Göre Eğilmeye Karşılık Gelen Göreceli Narinlik Oranı
$\lambda_{rel,z}$	z Eksenine Göre Eğilmeye Karşılık Gelen Göreceli Narinlik Oranı
γ_M	Malzeme Özellikleri İçin Kısmi Faktör
β_c	Düzensizlik Faktörü
ρ_k	Karakteristik Yoğunluk
ψ_2	Değişken Etkinin Yarı-Kalıcı Değeri İçin Faktör
ψ_0	Değişken Etkilerin Kombinasyon Değeri İçin Faktör

KAYNAKLAR

- [1] TS 647 Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1979.
- [2] TS EN 1995-1-1 Ahşap Yapıların Tasarımı- Bölüm 1-1: Genel- Genel Kurallar ve Binalar için Kurallar (Eurocode 5), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
- [3] Demirhan, E., Ahşap iskeletli kağır yapıların deprem etkileri karşısındaki davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [4] Kaplan, B., Geleneksel Osmanlı mimarisine sahip ahşap yapıların deprem kuvvetleri altında incelenmesi ve güçlendirme teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [5] Uzun, S., Tarihi ahşap yapı taşıyıcı sistemlerinin incelenmesi ve Boğaziçi örneği Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [6] Can, Ö., Tokgöz, H., Ahşap çatı makaslarının düğüm noktalarında ön ahşap uzunluğunun deneysel yöntemle tayini, New World Science Academy. 1306:3111, 3, 4, 2008.
- [7] Porcu, M.C., Bosu, C.B., Gavric, I., Non linear dynamic analysis to assess the seismic performance of cross-laminated timber structures, Journal of Building Engineering, 19:480-493, 2018.
- [8] Thi, V.D., Khelifa, M., Oudjene, M., Ganaoui, M.E., & Rogaume, Y., Finite Element Analysis of Heat Transfer Through Timber Elements Exposed to Fire, Engineering Structures, 143:11-21, 2017.
- [9] Anıl, Ö., Togay, A., İşleyen, K.Ü., Söğütü, C., Döngel, N., Hysteretic behavior of timber framed shear wall with openings, Construction and Building Materials. 116:203-115, 2016.
- [10] Santos, C.L., De Jesus, A.M.P., Morais, J.J.L., Lousada, J.L.P.C., Quasi-Static Mechanical Behaviour of a Double-Shear Single Dowel Wood Connection, Construction and Building Materials. 18:727-735, 2009.
- [11] Esen, O., Türkiye’de uygulanan ahşap çatı sistemlerinin Avrupa’da uygulanan ahşap çatı sistemleriyle karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [12] Saydamer, A., Türkiye’deki geleneksel ahşap yapılarda kullanılan taşıyıcı sistemlerin irdelenmesi ve Bursa örneği, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2014.
- [13] Yüncüler, M., TS 647 ve Avrupa Ahşap Yapı Standardı Eurocode 5’in Örneklerle Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2019.

- [14] Meriç, E., Ahşap bir yapının TS 647 ve Eurocode 5'e göre analizi ve karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2019.
- [15] Erakan, A., Tarihi ahşap sütunlu camilerin sonlu elemanlar analizi ile taşıyıcı sistem performansının belirlenmesi, SDU International Technologic Science, 14-54, 2010.
- [16] Dabanlı, Ö., Nur-u osmaniye camii'nin deprem perdormansının belirlenmesi ve koruma önerileri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [17] Çelik, A., Birdal, F., Ahşap taşıyıcı sistemli tarihi camilerin güçlendirilmesine yönelik bir durum çalışması. Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, 2-4 Kasım, Trabzon, 289-298, 2017.
- [18] Badur, A., Çamlıca Kız Lisesi/Ahmet Ratıp Paşa Köşkü yapı detaylarının koruma ve restorasyonu üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [19] Karaman, Ö. Y., Zeren, M. T., Geleneksel türk konutunda kullanılan ve kağır sistemi destekleyen ahşap yapısal elemanların önemi ve bozulma nedenleri, DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 2, 75-87, 2010.
- [20] Parisi, M.A., Piazza, M., Seismic behavior and retrofitting of joints in traditional timber roof structures, Soil Dynamics and Eartquake Enginnering, 22:1183-1191, 2002.
- [21] Hiraoğlu, H. H., Ahşap ve çelik makas sistemlerin malzeme ve sistem özelliklerinin incelenmesi, bir örnek yapı üzerinde değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [22] Uzunoğlu, M. M., Emiroğlu, M., Kap, T., Yuca, Y. Ahşap iskelet sistemlerin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs, Karabük, 2009.
- [23] Akan, A. E., Tarihi ahşap sütunlu camilerin sonlu elemanlar analizi ile taşıyıcı sistem performansının belirlenmesi, SDU International Technologic Science, 2, 1, 41-54, 2010.
- [24] Gürel, Y., Çok katlı ahşap yapıların deprem yükü altında performanslarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
- [25] Premrov, M., Dobrila, P., Bedenik, B.S., Approximate analytical solutions for diagonal reinforced timber-framed walls with fibre-plaster coating material. Construction and Building Materials, 18:727-735, 2004.

- [26] Ohanesyan, D. S., Ahşap platform çerçeve yapıların yatay kuvvetler karşısındaki davranışları ve alınması gereken önlemler. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [27] Maxineasa, S.G., Etuc, I.S., Taranu, N., Florenta, I., Environmental Performances of Different Timber Structures for Pitched Roofs, *Journal of Cleaner Production*, 175:164-175, 2018.
- [28] Vogrinec, K., Premrov, M., Influence of the Design Approach on the Behaviour of Timber-Frame panel Buildings Under Horizontal Forces, *Engineering Structures*, 175:1-12, 2018.
- [29] Klasson, A., Crocetti, R., Bjömsson, I., Hansson, E.F., Design for lateral stability of slender timber beams considering slip in the lateral bracing system. *Structures*, 16:157-163, 2018.
- [30] Gattesco, N., Ingrid, B., Numerical study on the reduction of the seismic vulnerability of historical buildings with wide timber roofs, *Structural Integrity Procedia*, 11:298-305, 2018.
- [31] Çalık, İ., Tarihi camii ve minarelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesi ve restorasyon etkilerinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2017.
- [32] Akça, C., Akarca, H., Erdoğan, E., ve Demirel, A., Yapı ahşabı ve ahşap yapı sektörü. Ulusal Ahşap Birliği, İstanbul, 2013.
- [33] Üstündağ, C., TS EN 1995-1-1 ahşap yapıların tasarımı bölüm 1-1: genel kurallar ve bina kuralları, İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi Ahşap Yapıların Tasarımı (Eurocode 5) Tanıtım Semineri, Eskişehir, 2014.
- [34] Odabaşı, Y. Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım A.Ş., İstanbul, 463, 1997.
- [35] TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Hesap Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [36] EN 1990, Eurocode – Basis of Structural Design. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [37] Porteus, J. ve Kermani, A., Structural Timber Design to Eurocode 5. Blackwell Publishing, United Kingdom, 542, 2007.

Bölüm 11

Soğutucu Akışkan Seçimlerinde Dikkat Edilmesi Gereken Parametreler ve Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Yeni Nesil Soğutucu Akışkanlar

Hande UFAT¹

¹ Öğretim Görevlisi Dr., Bursa Uludağ Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Elektrik ve Enerji Bölümü İklimlendirme ve Soğutma Teknolojileri Programı, 0000-0001-8350-245X, handet@uludag.edu.tr

GİRİŞ

Soğutmanın tarihi, Çinlilerin donan göllerdeki buz kalıplarını depolayarak saklamasıyla başlamış, Romalıların küplerdeki suyu toprağa gömerek serinletmeye çalışmalarıyla devam etmiştir. 1834'te Jacop Perkins'in buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma çevrimini bulmasıyla soğutma sistemleri ve buna bağlı olarak da soğutucu akışkanlar hayatımıza girmiştir. Günümüzde soğutma; buzdolapları, klimalar, merkezi iklimlendirme sistemleri, soğuk hava depoları, araç klimaları gibi birçok yerde hayatımızın vazgeçilmez birer parçası olmuşlardır. Sadece ısıtma, soğutma ve havalandırma (HVAC) sistemlerinin 2025 yılına kadar pazar payının 241,8 milyar dolar olacağı öngörülmektedir (Savitha vd., 2021)

Soğutma ve iklimlendirme sistemlerinin bu kadar yoğun olarak kullanılması, çok büyük miktarlarda soğutucu akışkan kullanımını da getirmiştir. Soğutucu akışkanlar da soğutma sistemleriyle birlikte gelişmekte ve değişmektedir. 1830'lardan itibaren neredeyse 100 yıl boyunca soğutma işlemi sağlayan her tür soğutucu akışkan kullanılmıştır. İlk önceleri su, amonyak, hava ve karbondioksit gibi doğal soğutucu akışkanların yanında propan, izobütan, klorometan gibi akışkanlar kullanılmıştır. Ancak 1930'larda meydana gelen kazalardan dolayı soğutucu akışkanlarda güvenlik sorgulanmaya başlanmıştır. Kimya endüstrisindeki gelişmelerle 1930'da R12'nin bulunmasıyla kloroflorokarbon (CFC) soğutucu akışkanlarının kullanımı başlamıştır. 1935'te R22'nin bulunmasıyla da Hidrokloroflorokarbon (HCFC) soğutucu akışkanları soğutma endüstrisine girmiştir. (Demirci vd., 2020:6) Ancak bu soğutucu akışkanlar kaza riskini en düşük seviyelere getirirken, ozon tabakasına büyük zararlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple 1990'ların başından itibaren soğutucu akışkanlarda "Ozon tabakası inceltme potansiyeli" (ODP: Ozone Depletion Potential) denilen bir kavram üzerinde durulmuş ve bu değerın sıfır olması istenmiştir. 1989'da ozon tabakasına zararı olmayan hidroflorokarbon (HFC) kökenli R134a ve R123 soğutucu akışkanları bulunmuştur (Demirci vd., 2020:6). Özellikle R134a iklimlendirme ve soğutma sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonrasında yapılan çalışmalarda da ozon tabakasına zarar vermeyen bu akışkanların, küresel ısınmaya olumsuz yönde katkıları olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte soğutucu akışkanlarda "Küresel ısınma potansiyeli" (GWP: Global Warming Potential) kavramı ortaya çıkmıştır (Araz vd., 2013). ODP, bir maddenin ozon tabakasına zarar verme potansiyelini gösterir ve ODP=1 olan R11 molekülünü referans alır. Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) ise sera gazı nedeniyle dünyaya ısınma etkisinin göstergesi olup GWP değeri 1 olan karbondioksit (CO₂) referans alınarak bulunur (Yılmaz ve Tosun, 2014:30).

1987'de imzalanan Montreal ve Kopenhag protokolleri kapsamında 96 yılında CFC soğutucu akışkanların üretimi yasaklanmıştır. Geri dönüştürülmüş veya temizlenmiş CFC kullanımı da 2001 de kaldırılmıştır (Onat vd., 2004:7). F-Gaz yönetmeliğine göre de HCFC soğutucu akışkanları için 2010 yılına kadar kademeli kaldırılması kararlaştırılmıştır. GWP değerinin yüksek olmasından dolayı R134a akışkanı için de farklı alternatif arayışlarına girilmiştir. Özellikle

2006'da yürürlüğe giren Avrupa Birliği Mobil İklimlendirme Yönergesine göre yeni üretilen araçlarda R134a kullanımının yasaklanmasına karar verilmiştir. GWP değeri 150'ini üzerinde olan soğutucu akışkanların kullanımına izin verilmemektedir (Araz vd., 2013). GWP değeri 1430 (Fang vd., 2017:77) olan R134a için de sadece mobil klimalarda değil iklimlendirme sistemlerinde de kullanımının yasaklanacağı aşikardır. Çıkan yönetmeliklere ve protokollere bakıldığında bazı akışkanlar yasaklanmışken bazıları için geçiş süreci devam etmektedir. Tablo 1'de akışkanların kullanım dışı kaldığı veya kalacağı zamanlar görülmektedir.

Tablo 1-Kullanılan soğutma sistemleri ve GWP Değerlerine Göre Soğutucu Akışkanların Kullanımın Bırakılacağı Tarihler (Atmaca vd., 2018)

Uygulama Yeri	GWP Değerine göre HFC'ler	Yasaklanma Tarihi
Mobil klimalarda	≥ 150	01.01.2017
Ev tipi buzdolapları ve dondurucular	≥ 150	01.01.2015
Ticari buzdolapları ve soğutucular	≥ 2500	01.01. 2020
Ticari buzdolapları ve soğutucular	≥ 150	01.01.2022
Taşınabilir klimalar	≥ 150	01.01. 2020
3 kg'dan az florlu sera gazı içeren tekli split klima sistemlerinde	≥ 750	01.01.2025
40 kW ve üzerinde kapasitesi olan ticari çoklu merkezi soğutma sistemleri	≥ 150	01.01.2022

Belirtilen bu sebeplerden dolayı yeni soğutucu akışkan arayışlarına girilmiştir. Doğal soğutucu akışkanların üzerinde tekrar durulmaya başlamakla birlikte, ODP değeri sıfır ve GWP değeri çok düşük olan Hidrofloro-Olefins (HFO) grubu soğutucu akışkanlar değerlendirilmektedir. Bunlardan en çok kullanılanları R134a yerine en iyi alternatifler olarak gösterilen R1234yf ve R1234ze(E)'dir. Özellikle mevcut sistem üzerinde çok az değişiklik yaparak kullanılabilir olmaları bu akışkanları ön plana çıkarmaktadır. Bunların yanında sadece ODP ve GWP değerlerinin düşük olması akışkanın kullanılabilir olduğu anlamına gelmez. Alternatif soğutucu akışkan seçiminde göz önüne alınması gereken parametreler; temin edilebilirliği, yanma özelliği, termodinamik ve fiziksel özellikleri, maliyet, zehirleyicilik, malzemeye ve yağlarla uyumu olarak söylenebilir.(Demirci vd., 2020:6)

SOĞUTUCU AKIŞKANLARIN SINIFLANDIRILMASI

Birinci nesil soğutucu akışkanlar

Buhar sıkıştırılmalı mekanik soğutma çevriminin bulunup geliştirilmeye başlandığı dönemler olan 1830 ile 1930 arasındaki zaman diliminde, soğutucu olarak amonyak, karbondioksit, kükürt dioksit, eterler, hidrokarbonlar ve hava gibi doğal akışkanlar kullanıldı. Bunlar birinci nesil soğutucu akışkanlar olarak sınıflandırıldı. Birinci nesil soğutucu akışkan seçimi yapılırken, kullanılabilirliğine ve ne işe yaradığına bakılırdı (Arora vd., 2018:115; Araz vd., 2013).

İkinci nesil soğutucu akışkanlar

1930'da, ikinci nesil soğutucu akışkanlar olarak sınıflandırılan CFC'ler ve HCFC'ler ile daha güvenli bir soğutucu akışkan sınıfı kullanılmaya başlandı. Bu soğutucu akışkanların üretiminde odaklanılan nokta, azaltılmış toksik özellikler ve yanıcılıktı. Kararlı olması, yanmaz olması, toksik olmaması ve malzemelere uyum göstermesi gibi özelliklerinden dolayı, CFC'ler ve HCFC'ler, özellikle gelişmiş ülkelerde büyük miktarlarda üretilmekte ve tüketilmektedir. Bu sınıftaki bazı soğutucular amonyak, hidrokarbonlar (HC'ler), H₂O vb. idi. Ozon tabakasına zarar verdikleri tespit edildiklerinden dolayı bu soğutucu akışkanlar, 1987'de imzalanan Montreal Protokolü ile kademeli olarak kaldırılmıştır (Arora vd., 2018:115; Araz vd., 2013).

Üçüncü nesil soğutucu akışkanlar

Montreal Protokolü ile ilk olarak, HCFC'lerin sahip olduğu ODP değeri nedeniyle CFC'lerden HCFC'lere geçişin sağlanması amaçlandı. Sonrasında soğutma sistemlerinin ihtiyaçlarını karşılamak için bazı HFC'ler ve bunların türevleri veya karışımları kullanılmaya başlanmıştır. Bu soğutucu sınıfı ise üçüncü nesil soğutucu akışkanlar olarak kabul edilmiştir.

1994 yılında, Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçevesi Sözleşmesi (UNFCCC) ve Kyoto protokolü kapsamında, sera gazı emisyonlarını kontrol etmek için farklı soğutucu akışkan arayışlarına girilmiştir. HCFC'ler ve HFC'lerin toplam küresel ısınma üzerine etkisi yaklaşık %2 civarlarında olduğu görülmektedir ve bu sebeple bu soğutucu akışkanlar 2030 yılına kadar kademeli olarak kullanımdan kaldırılacaktır (Arora vd., 2018:115).

Dördüncü nesil soğutucu akışkanlar

2010 yılı itibarıyla kullanımına başlanan akışkanlardır ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Dördüncü nesil soğutucu akışkanlar, düşük GWP değerine sahip sahip florlu propen (propilen) izomerlerini içerirler. Şu anda en çok dikkat çeken ve üzerinde durulanlar yeni bir florokarbon soğutucu sınıfıdır olan HFO'lardır. GWP değerleri oldukça düşüktür ve birçok yer HFC'lerin yerini alabilecek özelliktedirler. Bu grubun en çok dikkat çeken temsilcileri R1234yf ve R1234ze(E)'dir (Arora vd., 2018:115).

UYGUN SOĞUTUCU AKIŞKAN SEÇİMİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN KRİTERLER

Soğutucu akışkan seçiminde dikkat edilmesi gereken pek çok parametre vardır. Soğutucu akışkanın termodinamik ve termofiziksel (termal iletkenlik, viskozite, yoğunluk, buhar basıncı) özellikleri, farklı yoğuşma sıcaklıklarında soğutma çevriminin teorik ısıtma ve soğutma kapasiteleri, aşırı ısıtma/alt soğutmanın COP üzerindeki etkisi, çıkış sıcaklığı değerleri, soğutma sistemindeki malzemelerle uyumu, sızıntı eğilimi, yanıcılık, toksisite, çevresel performans ve maliyet gibi özelliklerdir.

Soğutucunun özellikleri, soğutucunun çalışma sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Hiçbir soğutucu akışkan tüm kriterleri bir arada sağlayamayacaktır. Mutlaka bazı kriterlerden ödün vermek gerekecektir (Savitha vd., 2021).

Termodinamik özellikler

Soğutucu akışkanın termodinamik özellikleri, çevrimlerin verimini etkiler. Termodinamik özellikler esas olarak normal kaynama noktası, kritik sıcaklık, molekül ağırlığı ve molekülün yapısına bağlıdır. Normal kaynama sıcaklığı, doğrudan çalışma basıncıyla ilgilidir. Soğutucu akışkanın kritik sıcaklığı soğutma çevriminin COP değerini etkiler. Yüksek kritik sıcaklığa sahip olan soğutucu akışkan daha yüksek COP değeri elde edilmesini sağlar ancak düşük buhar basıncına sahip olduğundan hacimsel kapasiteyi azaltır. Bu, yüksek COP ve yüksek hacimsel verimlilik arasındaki dengeyi içerir (Savitha vd., 2021).

Termofiziksel özellikler

Soğutma çevrimindeki kondenser ve evaporatörün verimliliği soğutucu akışkanın termofiziksel özelliklerinden etkilenir. Termofiziksel özellikler; yoğunluk, viskozite, kinematik viskozite, termal iletkenlik, yüzey gerilimi ve diğer özellikleri içerir. Sıvı viskozitesi, soğutucu akışkanın bir başka taşıma özelliğidir, düşük viskozite daha az sürtünmeyi gösterir ve sistem daha az enerji kullanır.

Kritik noktası yüksek olan soğutucu akışkan düşük buhar basıncına, daha küçük kompresör kızgınlığına ve daha küçük flaş gaz kayıplarına sahip olacak ve daha yüksek COP üretecektir (Savitha vd., 2021).

Kimyasal ve fizikokimyasal özellikler

Soğutucu akışkanın diğer önemli özelliklerinden biri, sistemin yağlama yağı ve yapısal malzemesi ile etkileşimidir. Soğutucu akışkanın kimyasal kararlılığı, yanıcılık, patlayıcılık ve bozunma sıcaklığı ile karakterize edilir. Yağlama yağının varlığı ayrıca soğutucunun termal kararlılığını da azaltacaktır. Mineral yağlar, sentetik yağlardan daha fazla bozulma etkisine sahiptir (Savitha vd., 2021).

Soğutucu akışkanın su içinde erimesi kolaysa makine içinde donma tehlikesi azalır, çünkü suya karışan akışkan ile donma noktası düşer. Aksi takdirde soğutma sisteminin atmosfer basıncı altında kalan bölümlerinden sisteme hava girer ve hava içindeki su buharı yoğuşur ve genleşme valfinden basıncı düşüktükten

sonra katılaşma meydana gelir. Bu katılaşma sonucunda sistemde tıkanmalar ve arızalar oluşabilir.

Soğutma sistemleri çalışırken çoğunlukla kompresör yağlama yağı sistem içerisine karışır. Eğer akışkan buharı yağın içinde çözünmüyorsa, akışkanla birlikte sürüklenir ve yoğuşturucu ile buharlaştırıcı yüzeylerinde yağ filmi oluşturur. Bu film ısı transferini azaltır ve ayrıca kompresörde yağ miktarının düşmesine neden olur. (Koyun vd., 2005:88)

Soğutucu akışkanın çevresel ve fizyolojik özellikleri

Atmosferde sera etkisine ve ozon tabakasının delinmesine katkıda bulunacak çok sayıda içerik vardır. Soğutucu akışkanlar, ozon tabakasının tahrip edilmesinin ana kaynaklarından biridir. Soğutucu akışkanlar yalnızca atmosfere salındıklarında çevreye zararlıdır ve mobil klimalar le büyük süpermarket soğutma sistemlerinin yıllık %30'a kadar sızdırabileceği bildirilmektedir (Savitha vd., 2021).

Ozon tabakası inceltme potansiyeli (ODP: Ozone Depletion Potential):

Soğutucu akışkanın ozon tabakası üzerindeki etkisini gösteren bir parametredir. Değeri ne kadar düşükse etkisi o kadar azdır. ODP değeri 1 olan R11 molekülü referans alınarak belirlenmiş bir değerdir. Yeni yönetmelik ve protokollerde bu değeri sıfır olan akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır.

Küresel ısınma potansiyeli (GWP): GWP, benzer miktarda CO₂ emisyonunun etkisiyle ilgili olarak bir sera gazı emisyonunu karşılaştıran bir endekstir. GWP değeri 1 olan CO₂ referans alınarak hesaplanır. GWP ne kadar düşük olursa, küresel ısınmaya katkısı o kadar az olur (Savitha vd., 2021).

Yaşam döngüsü iklim performansı (LCCP:Life cycle climate performance): Analiz, tüm kullanım ömrü boyunca ısı pompası tabanlı ısıtma sistemin çalışması nedeniyle oluşan sera gazları (GHG:greenhouse gases) emisyonlarını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Tüm kullanım ömrü boyunca hem doğrudan hem de dolaylı emisyonları hesaba kattığı için etkili bir yoldur.

LCCP=Toplam ömür boyunca oluşan direk emisyonlar + Toplam ömür boyunca oluşan indirek emisyonlar

$$LCCP = (GWP * L * n) + (E_a * \beta * n)$$

GWP, soğutucu akışkanın küresel ısınma potansiyeli; L, sistemdeki kg birminden yıllık kaçak oranı; n, yıl olarak sistemin ömrü; E_a, kWh biriminden yıllık enerji tüketimi; β, kg.kWh başına karbondioksit emisyon değeridir.

Soğutucu akışkan üretimi, nakliyesi ve ömrünün sona ermesinin çevresel etkisi doğrudan emisyon olarak kabul edilir. Ekipmandan kaynaklanan şarj kaybı, performansın bozulmasına ve enerjiyle ilgili emisyonlara yol açacaktır ki bunlar da dolaylı yani indirekt emisyonlardır (Savitha vd., 2021).

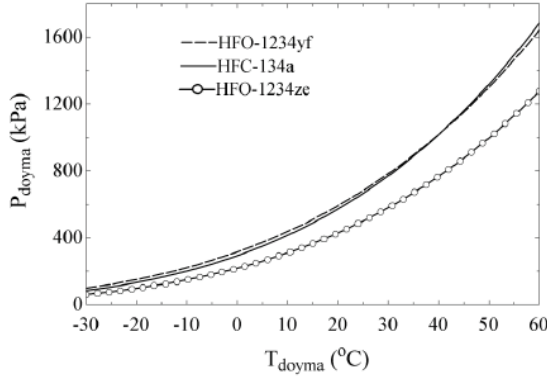
Toksosite ve yanıcılık

Soğutucu akışkan seçiminde yanıcılık ve toksisite önemli hususlardır. Soğutucu akışkanın sınıflandırılması; Alt Alev Alabilirlik Limiti (LFL), Yanma Isısı (HoC) ve Yanma Hızına göre yapılır. Soğutucu akışkan toksisite sınıflandırması, daha yüksek ve daha düşük toksisiteye sahip soğutucu akışkanlar arasındaki ayrım olarak 400 ppm seviyesinde bir sınıra sahiptir (Savitha vd., 2021).

YENİ NESİL SOĞUTUCU AKIŞKANLAR

R1234yf soğutucu akışkanı

R134a'nın GWP değerinin 1430 civarlarında olmasından dolayı yerine alternatif soğutucu akışkan arayışlarına girilmiştir. Mobil klima sistemlerinde kullanımı yasaklandığından dolayı öncelikli olarak bu sistemler için yeni bir alternatif gerekmiştir. R1234yf akışkanının mevcut sistemlere çok ufak bir değişiklikle uygulanabilmesi ve elde edilen verim değerlerinin R134a'ya çok yakın olması bu akışkanı ön plana çıkarmıştır. HFC-134a ile HFO-1234yf'nin doyma basınçları birbirlerine oldukça yakın iken, diğer bir HFO grubu akışkanı olan R1234ze(E)'nin uyumunun çok iyi olmadığı Şekil 1'de görülebilir. R1234ze(E)'nin doyma basıncı, aynı sıcaklıkta, incelenen diğer soğutucu akışkanlardan daha düşüktür. (Özgür 2013:28).



Şekil 1- HFC-134a, HFO-1234yf ve HFO-1234ze'nin doyma basınçları ile sıcaklığın değişimi (Özgür 2013:28)

Tablo 2- R1234yf ile R134a'nın bazı genel ve termodinamik özellikleri (Araz vd., 2013; Özgür 2013:28)

Soğutucu Akışkan	R1234yf	R134a
Kimyasal Formülü	CF ₃ CF=CH ₂ (C ₃ H ₂ F ₄)	CH ₂ FCF ₃
Molekül ağırlığı (g/mol)	114,04	102,03
Kaynama noktası (1atm)	-29 °C	-26 °C
Kritik Sıcaklık	95 °C	101,08 °C
Kritik Basınç	3382 kPa	4060,3 kPa
Ozon inceltme potansiyeli (ODP)	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	4	1430
Doğada yok olma süresi	12 gün	11 yıl
Yanıcılık	Düşük seviye yanıcı (ASHRAE A2L sınıfı)	Yanıcı değil (ASHRAE A1 sınıfı)
Isı iletim katsayısı(W/mK) (20 °C ve 1 atm. basınçta)	0,01003	0,01354
Yüzey gerilmesi (N/m) (20 °C için)	0,006736	0,008756
Zehirlenme etkisi (ATEL PPM)	101000	50000

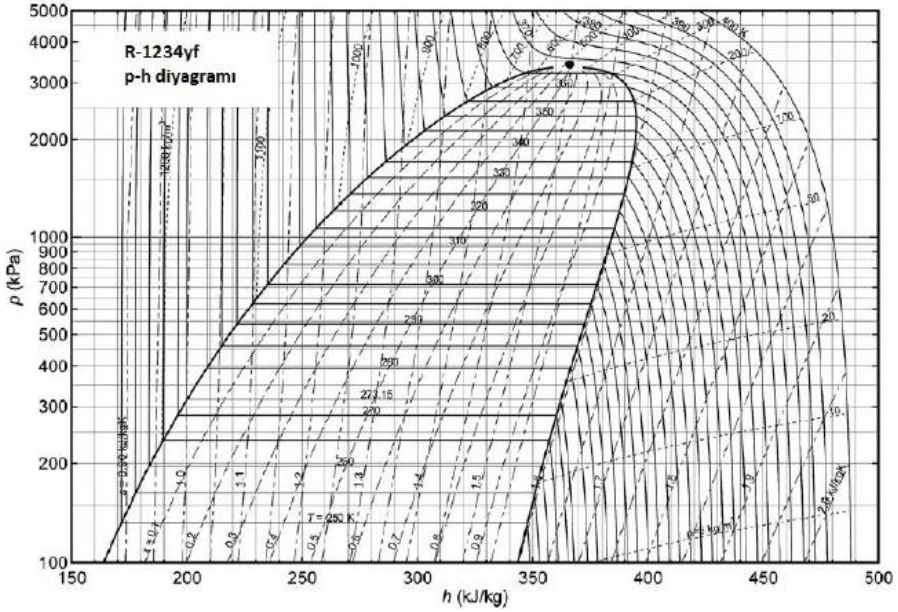
Tablo 2'den de görüleceği üzere ODP değeri her iki akışkanda sıfır olmakla birlikte, GWP değerinin R1234yf'de oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunların yanında doğada yok olma süresi de oldukça kısadır.

Soğutucu akışkanlarda dikkat edilmesi gereken diğer bir kriter zehirlenme etkisidir. İklimlendirme sistemlerinde herhangi bir kaçak olması durumunda ortama oldukça yüksek miktarlarda soğutucu akışkan gazı karışmaktadır. Bu gibi durumlarda zehirlenme etkisi oldukça önemlidir. Tablo 2'de verilen değerler akut toksite maruz kalma (ATEL: acute toxicity exposure limit) değerleridir. Bu değer, bir insanın sağlığını 30 dakikalık süre içerisinde etkilemeyecek maksimum değeri göstermektedir. Görüleceği üzere R1234yf'nin değeri R134a'dan çok daha iyidir.

R134a yanmaz soğutucu akışkan sınıfı içerisindeyken R1234yf'nin az yanıcı özellikte olması belirli bazı testlerin yapılmasını gerektirir. Yanma hızı ve alt yanma limitleri incelendiğinde R152a ve amonyak da dahil bir çok soğutucu akışkandan daha düşük değerlere sahiptir. Özellikle araç klimalarına alternatif olarak gösterildiğinden, araçlarda çarpışma anında veya bir sızıntı olduğunda meydana gelebilecek risk analizleri yapılmış ve riskler çok düşük bulunmuştur (Araz vd., 2013). Ancak R410a kullanan soğutma sistemlerinde ise düşük soğutma ve ısıtma kapasitesinden dolayı R1234yf kullanımı önerilmemektedir (Pabon vd., 2020:118).

Bunların yanında kullanılan soğutucu akışkanın, soğutma sistemlerinde kullanılan malzemelerle uyum içinde olması gerekmekte ve sistemde kullanılan yağlama yağıyla karışabilmelidir. R1234yf ile yapılan çalışmalarda özellikle mobil klimalarda herhangi bir problem olmadan çalışabildiği görülmüştür. Sistemde kullanılan yağlarla karışabilme aralığının R13a'dan daha iyi olduğu ve karışabilirlik bakımından da oldukça benzer olduğu görülmüştür (Koban 2010).

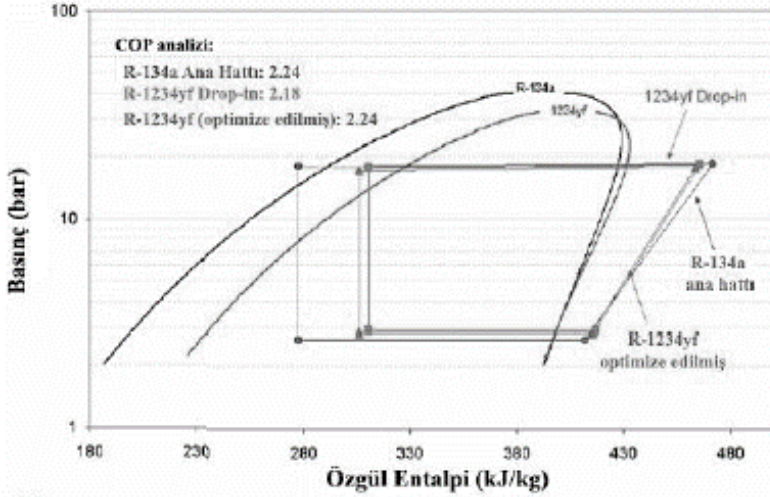
R1234yf'nin performansının değerlendirilebilmesi açısından lnP-h diyagramı da şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2- R1234 Soğutucu Akışkanı Basınç-Entalpi Diyagramı
(Akasaka, 2010:33)

Diyagramlardan faydalanarak akışkanların termodinamik özellikleri konusunda belirli bir fikir elde etmek mümkündür. Ancak belirli testlerin uygulanması gerekir. Mobil bir klima üzerinde önce sistemde herhangi bir değişiklik yapılmadan (drop-in), sonrasında sistemin yoğuşurucusu ve genleşme valfi üzerinde R1234yf'ye göre belli uyarlamalar yapıldıktan sonra ölçümler alınmıştır. R134a ile aynı soğutma kapasitelerine ulaşmak için belirli düzenlemeler yapılarak sistemin optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yine aynı şekilde COP değerinin de yakın olması için sistem üzerinde belirli uyarlamalar şarttır. Şekil 3'te bu çalışma sonucu elde edilen verilerle bir basınç-entalpi diyagramı oluşturularak drop-in ve optimize edilmiş sistem arasındaki fark gösterilmiştir (Araz vd., 2013).

Yapılan çalışmalarda enerji tüketimi açısından incelendiğinde R1234yf'nin R134a'ya çok yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Bu açıdan bakıldığında da R1234yf'nin oldukça iyi bir alternatif olduğu söylenebilir (Karber vd., 2012).



Şekil 3 – R134a Kullanan Bir Araç Klimasında R1234yf'nin Sistem Etkinliklerinin Karşılaştırılması (Monforte vd., 2008)

R1234ze(E) soğutucu akışkanı

R1234ze(E) soğutucu akışkanı, su ve hava soğutmalı chillerler, buzdolapları, ısı pompaları, CO₂ kullanan kaskad sistemler gibi farklı sıcaklık uygulamaları için R134a'ya alternatif olarak önerilen bir soğutucu akışkandır. R1234yf gibi oldukça iyi ODP ve GWP değerlerine sahiptir. Tablo 3'de R1234ze(E) için bazı genel ve termodinamik özellikler görülebilir. Daha çok R134a'ya alternatif gösterildiğinden dolayı bu iki akışkan arasındaki özellikler kıyaslanmıştır.

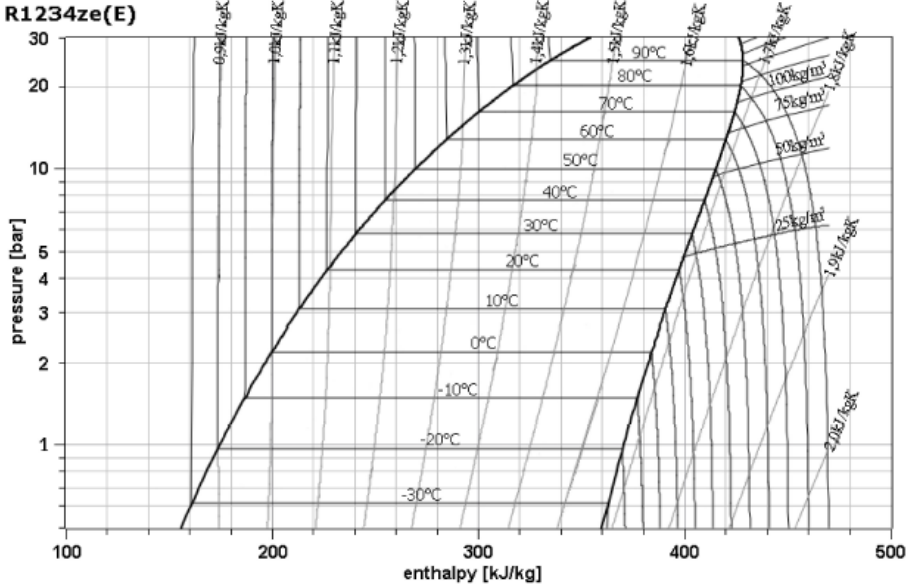
Tablo 3- R1234ze(E) ile R134a'nın bazı genel ve termodinamik özellikleri (Araz vd., 2013; Özgür 2013:28)

Soğutucu Akışkan	R1234ze(E)	R134a
Kimyasal Formülü	Trans, CHF=CHCF ₃ (1,3,3,3-tetrafluoropropene)	CH ₂ FCF ₃
Molekül ağırlığı (g/mol)	114,04	102,03
Kaynama noktası (1 atm)	-20°C	-26 °C
Kritik Sıcaklık	79°C	101,08 °C
Kritik Basınç	3632 kPa	4060,3 kPa
Ozon inceltme potansiyeli (ODP)	0	0
Küresel Isınma Potansiyeli (GWP)	6	1430
Doğada yok olma süresi	18 gün	11 yıl
Yanıcılık	Düşük seviye yanıcı (ASHRAE A2L sınıfı)	Yanıcı değil (ASHRAE A1 sınıfı)
Yüzey gerilmesi (N/m) (20 °C için)	0,009634	0,008756
Zehirlenme etkisi (ATEL PPM)	59000	50000

Diğer özelliklere bakıldığında R1234ze(E) de düşük seviye yanıcılık özelliklerine sahiptir. Yapılan çalışmalarda R1234yf'e göre biraz daha az yanıcılık özelliklerine sahiptir ve ısı pompası gibi sistemlerde normal çalışma koşulları altında herhangi bir risk bildirilmemiştir (Mota-Babiloni vd., 2016:95). Gerektiği yerlerde Amonyak gibi soğutucu akışkanlarla karıştırılarak saf soğutucu akışkanın yanıcılık özellikleri azaltılabilir. Şekil 1'de gösterildiği üzere doyma basıncı R134a'dan daha düşük olduğundan mevcut sisteme yapılacak uygulamalarda verim düşüklüğüne sebep olabilir. Bunların yanında yeni tasarlanan iklimlendirme sistemleri için kullanımının daha iyi olduğu söylenebilir.

Zehirlenme etkisine bakıldığında ATEL değerinin 59000ppm olduğu görülmekte ve bu değer ile ASHRAE'nin zehirlilik sınıflandırmasında A sınıfında (zehirleyici etkisi olmayan) olduğu görülmektedir.

Enerji tüketimlerine bakıldığında R1234ze(E)'nin R134a'dan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak R-1234ze'nin soğutma kapasitesi düşük olduğundan kompresörün çalışma süresi artar ve dolayısıyla defrost süresinin azalmasına yol açar (Karber vd., 2012). Yapılan başka çalışmalarda R410a yerine kullanıldığında ısıtma kapasitesinden az miktarda artış görülürken, soğutma kapasitesinde yüksek denilebilecek miktarda düşüşler görülmüştür. (Shigeru, 2010). Bu sebepten dolayı R410a kullanan mevcut bir sistemde R1234ze(E) kullanımı pek uygun olmayacaktır. Termodinamik özelliklerini görebilmek açısından R1234ze(E)'nin lnP-h diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4 – R1234ze(E) Soğutucu akışkanı basınç entalpi diyagramı (Życzkowski vd., 2020)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

HVAC sistemler, mobil klimalar, buzdolapları, soğuk hava depoları gibi uygulamaları düşündüğümüzde soğutucu akışkanların da bunlarla birlikte dünya çapında ne kadar büyük miktarlarda kullanılması gerektiğini anlayabiliriz. Bu sistemlerden olan kayıp ve kaçaklardan dolayı çok büyük miktarlar soğutucu akışkan atmosfere karışmaktadır. Soğutucu akışkanların ozon tabakasına ve küresel ısınmaya olumsuz etkilerinden dolayı yeni soğutucu akışkan arayışlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu etkileriyle birlikte soğutma sistemlerinin performansını da olumsuz etkilemeyen soğutucu akışkanların geliştirilmesi gerekecektir. Soğutma sistemlerinin, özellikle buhar sıkıştırımlı mekanik soğutma çevriminin bulunmasıyla kullanılan amonyak ve karbondioksit gibi doğal soğutucu akışkanların tekrar üzerinde durulmaya başlanmıştır. Başlangıçta güvenlik sebebiyle terkedilen bu soğutucu akışkanlar, bazı farklı soğutucu akışkanlarla karıştırılarak bu etkileri azaltılmaya çalışılmaktadır.

Son zamanlarda en çok tercih edilen HFO grubu soğutucu akışkanlardan olan R1234yf ve R1234ze(E) üzerinde durulmuştur. Bu akışkanlar çoğunlukla mevcut mobil klimalarda R134a yerine kullanılabilirdiğinde dolayı ön plana çıkmışlardır. Çalışma şartlarına göre buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimlerinde de belirli optimizasyonlar yaparak R134a yerine kullanılabilir. Farklı soğutucu akışkanlar kullanan sistemlerde sistemin çalışma koşullarının iyi incelenmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde ODP değeri sıfır ve GWP değeri çok düşük olan bu akışkanların düşük seviyede de olsa yanıcılık özellikleri mevcuttur. Mobil klimalarda yapılan testlerde ve normal şartlarda çalışan ısı pompası sistemlerinde çok büyük riskler bildirilmemiş olsa da sistem tasarımlarında bu yanıcılık özelliği göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanında yapılan çalışmalarda bahsedilen yeni soğutucu akışkanların, soğutma sisteminde bir miktar performans düşüşüne sebep olduğu görülmektedir.

Kullanımının daha çok fazla yaygınlaşmamasından dolayı bu soğutucu akışkanların şu an çok ekonomik olduğu söylenemez. Ancak araştırmalar devam edip kullanımı yaygınlaşmaya başladıkça maliyetinin düşeceği tahmin edilmektedir. Yeni soğutucu akışkanların araştırmaları ve kullanımının yaygınlaşması için gerekli desteklerin verilmesi gerekmektedir.

Bahsedildiği üzere soğutucu akışkan seçiminde ele alınması gereken çok fazla parametre vardır ve bunların hepsini bir arada sağlamak mümkün değildir. Kullanılan sistemin amacına ve yerine göre bazı kriterlerden fedakarlık etmek gerekecektir.

KAYNAKÇA

1. AKASAKA, R., TANAKA, K., HIGASHI, Y. (2010), Thermodynamic Property Modeling For 2, 3, 3, 3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), *International Journal of Refrigeration*, 33(1), 52-60.
2. ARAZ, M., GÜNGÖR, A., HEPBAŞLI A. (2013), Düşük Küresel Isınma Potansiyeline Sahip Soğutucu Akışkanların Soğutma Uygulamalarındaki Kullanımının Değerlendirilmesi. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (575-604), İzmir: 17-20 Nisan 2013.
3. ARORA, P., SESHADRI, G., TYAGI, A. K. (2018), Fourth-generation Refrigerant: HFO 1234yf. *Current science*, 115(8), 1497-1503.
4. ATMACA, A. U., EREK A., EKREN, O. (2018), Sabit Alanda ve Sabit Basıncıta Karışımli Ejektör Modellerinin Performans Değerlendirmesi, *Mühendis ve Makina*, 59(690), 89-118.
5. DEMİRCİ, E., ÖZKAYMAK, M., KOŞAN, M., AKKOÇ, A. E., AKTAŞ, M. (2020), Doğal Soğutucu Akışkan Kullanımında Son Gelişmeler, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 184-199.
6. FANG, Y., CROQUER, S., PONCET, S., AÏDOUN, Z., BARTOSIEWICZ, Y. (2017), Drop-In Replacement İn A R134 Ejektor Refrigeration Cycle By HFO Refrigerants, *International journal of refrigeration*, 77, 87-98.
7. International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology (211-222), Tokyo: 17 – 19 Şubat 2010.
8. KARBER, K. M., ABDELAZIZ, O., VINEYARD, E. A. (2012), Experimental Performance of R-1234yf and R-1234ze as Drop-in Replacements for R-134a in Domestic Refrigerators. In Proceedings of the International Refrigeration and Air Conditioning Conference (16-19), Indiana: 16 Temmuz 2012.
9. KOBAN, M. (2010), Automotive Material Investigation With Low GWP Refrigerant HFO-1234yf, *Vehicle thermal management system*.
10. KOYUN, T., KOYUN, A., ACAR, M. (2005), Soğutma Sistemlerinde Kullanılan Soğutucu Akışkanlar Ve Bu Akışkanların Ozon Tabakası Üzerine Etkileri, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 88, 46-53.
11. MONFORTE, R., ROSE, B., L'HUILLIER, J. M. (2008), Updated Situation About Alternate Refrigerant Evaluation, In SAE 2008 Alternate Refrigerant Systems Symposium (10-12), Scottsdale: 10-12 Haziran 2008.
12. MOTA-BABILONI, A., NAVARRO-ESBRÍ, J., MOLÉS, F., CERVERA, Á. B., PERÍS, B., VERDÚ, G. (2016), A Review Of Refrigerant R1234ze (E) Recent Investigations, *Applied Thermal Engineering*, 95, 211-222.

13. ONAT, A., İMAL, M., İNAN, A. T. (2004), Soğutucu Akışkanların Ozon Tabakası Üzerine Etkilerinin Araştırılması Ve Alternatif Soğutucu Akışkanlar, *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 32-38.
14. ÖZGÜR, A. (2013), Hfc-134a Ve Alternatifi Soğutkanların (Hfo-1234yf Ve Hfo-1234ze) Soğutma Çevrimi Performansı Açısından Karşılaştırması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3).
15. PABON, J. J., KHOSRAVI, A., BELMAN-FLORES, J. M., MACHADO, L., REVELLIN, R. (2020), Applications Of Refrigerant R1234yf In Heating, Air Conditioning And Refrigeration Systems: A Decade Of Researches, *International Journal of Refrigeration*, 118, 104-113.
16. SAVITHA, D. C., RANJITH, P. K., TALAWAR, B., RANA PRATAP REDDY, N. (2021), Refrigerants for Sustainable Environment–A Literature Review, *International Journal of Sustainable Energy*, 1-22.
17. SHİGERU, K., TAKADA N., MATSUO, Y., YOSHITAKE, D., FUKUDA, S. (2010), Possibility to Introduce HFO-1234ze(E) and its Mixture with HFC-32 as Low-GWP Alternatives for Heat Pump/Refrigeration Systems.
18. YILMAZ, F., TOSUN, C. (2014), Düşük Küresel Isınma Potansiyeline Sahip Hfo-1234ze Akışkanın Termodinamik Analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 30(5), 308-313.
19. ŻYCZKOWSKI, P., BOROWSKI, M., ŁUCZAK, R., KUCZERA, Z., PTASZYŃSKI, B. (2020), Functional Equations for Calculating the Properties of Low-GWP R1234ze (E) Refrigerant. *Energies*, 13(12), 3052.

Bölüm 12

Veri Zarflama Analizi¹

Kamil ÇELİK²
Cevriye GENCER³

1 Bu eser Kamil ÇELİK tarafından hazırlanan “Avrupa Birliği Ülkelerinin Bilişim Teknolojilerini Kullanma Etkinliklerinin Araştırılması: Bir Veri Zarflama Analizi Uygulaması” adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

2 Dr., Bartın Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü
kcelik@bartin.edu.tr ORCID:0000-0002-4530-1048

3 Prof. Dr., Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
ctemel@gazi.edu.tr ORCID:0000-0002-3373-8306

1. GİRİŞ

Günümüzde etkinlik ve verimlilik kavramları, yönetim anlayışının temellerini oluşturan kavramların başında gelmektedir. Bu kavramlarla performans ölçümü yapılırken birtakım zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklarla baş edebilmek için yeni analiz teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerden biri de Veri Zarflama Analizi (VZA)'dır. VZA, uygulaması kolay çok boyutlu matematiksel bir yöntemdir. Buna ek olarak VZA, aynı çıktıyı üretmek için aynı girdinin kullanıldığı homojen üreticilerin etkinliklerini araştırırken, her birinin en verimli birim veya birimlere göre durumunu karşılaştırabilmektedir. Bu sebepten ötürü VZA son zamanlarda etkinlik ölçümünde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kocakalay ve Işık, 2003).

VZA literatürde Data Envelopment Analyses (DEA) olarak yer almakta ve literatürde Decision Making Unit (DMU) olarak tanımlanan, Karar Verme Birimi (KVB) adı verilen kurum, kuruluş ya da birimlerin doğrusal programlama tekniklerine dayanarak, göreceli etkinliklerini ölçmede kullanılan bir yöntemdir. VZA ürettikleri mal ve hizmet açısından birbirine benzer ekonomik karar verme birimlerinin (KVB) göreceli etkinliklerinin ölçülmesi için geliştirilmiştir. VZA'da KVB'ler girdileri çıktılara dönüştüren işletme veya kuruluşlar olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma hastaneler, okullar, şehirler, okullar ve bankalar da girebilmektedir. VZA'nın en dikkat çekici özelliği bütün KVB'lerin etkinsizlik miktarını ve kaynaklarını tanımlayabilmesidir. Bu yöntem en verimli olan KVB'leri sunarken, verimli olmayan KVB'lerin de verimli olabilmeleri için hangi miktarda girdi azaltması/artırması veya çıktı azaltması/artırması yapması gerektiği bilgisini vermektedir.

VZA özellikle üniversiteler gibi kâr amacı gütmeyen kurumlarının etkinliğini ölçmek için daha uygundur. Çünkü böyle kurumların gelirleri ve karlılıkları gibi ölçütler etkinliklerini ölçmede tatmin edici değildir. Bunun iki ana nedeni, bu kurumların kâr amacı gütmemeleri ve gelirlerini bir ürün ya da servis satarak kazanmayı olmalarıdır.

VZA aynı girdileri kullanarak aynı çıktıları üreten kurumların etkinliğini ölçmede de kullanılmaktadır. VZA dışındaki etkinlik ölçme yöntemleri merkezi eğilim yaklaşımıyla üreticileri ortalama bir üreticiye göre değerlendirmektedir. Fakat VZA her KVB'yi yalnızca en etkin KVB'lere göre değerlendirmektedir (Charnes vd., 1994)

VZA yöneylem araştırması, yönetim bilimi ve ekonometri alanlarını sentezleyen bir araştırma yöntemidir. Bu yöntem sayesinde yönetimle alakalı bazı önemli ipuçları elde edilebilmektedir. Analiz ile alakalı akademik alanda ve endüstri alanında yapılan araştırma ve uygulamaların sayısı her geçen gün artmaktadır (Soba vd., 2012). Bu çalışmada son yıllarda etkinlik değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan ve matematiksel bir yöntem olan VZA'nın temel esaslarından ve uygulama aşamalarından detaylı olarak bahsedilmektedir.

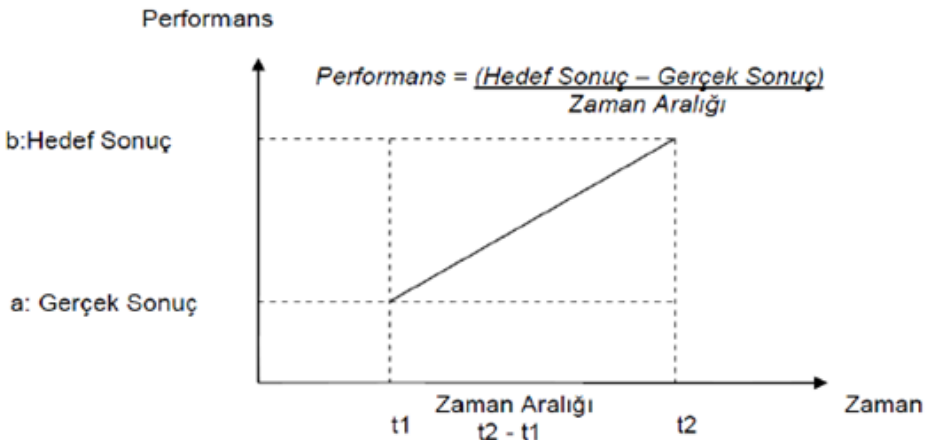
2. PERFORMANS, VERİMLİLİK, ETKİNLİK ve ETKİLİLİK KAVRAMLARI

2.1. Performans

“Eğer hakkında konuştuğunuz bir şeyi ölçebiliyor ve ölçtüğünüz şeyi de rakamlar kullanarak ifade edebiliyorsanız bu bahsedilen konu hakkında bir şeyler biliyorsunuz anlamına gelmektedir, eğer bunları yapamıyorsanız bahsi geçen şey hakkındaki bilginiz yetersiz ve çok da tatmin edici olmayan bir bilgi çeşididir demektir” (Neely vd., 2005). Performans ölçümü hakkında 1928 yılında söylenmiş bu söz performans ölçümünün o yıllarda dahi ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir (Saraç, 2009).

Performans kavramı etkinlik, etkililik ve verimlilik kavramları ile anılmaktadır. Performansın sözlük anlamı "başarım" kelimesiyle ifade edilmektedir. Yönetim biliminde ise performans, bir işi yapan bireyin ya da grubun amaçlanan hedefe yönelik neyi sağlayabileceğinin nicel (miktar) ve nitel (kalite) olarak ifade edilmesidir. Performans kavramının temeline inildiğinde ilk olarak 15. yüzyılda oyunlar ve sergiler için ortaya çıktığı görülmektedir. Günümüzde ise ilk anlamından çok farklı bir şekilde kullanıldığı ve her geçen gün daha farklı anlamlar ihtiva eden bir yelpazeye dönüştüğü görülmektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere performans sona ulaşıldığında bir çıkar elde edilmesi umulan etkinliğin, hedeflenen sonucundan gerçek sonucunun çıkarılmasıyla elde edilen sonucun zamana (zaman aralığı) bölünmesiyle elde edilmesi olarak da tanımlanmaktadır. Burada önemli olan değişkenler şunlardır (Ölçen, 2012):

- Bilinçli bir şekilde seçilmiş sayısal olarak ifade edilebilen bir etkinliğin belirlenmesi
- Belirlenen etkinlikten beklenen sonuçlar
- Etkinlik tamamlandığında elde edilen sonuçlar
- Etkinliğin tamamlanması için harcanan süre



Şekil1. Performans tanımının grafiksel ifade edilişi
(Ölçen, 2012; Kalkan, 2005)

İşletme açısından içsel kaynakların en etkin biçimde kullanılması değişen pazar koşullarına ayak uydurabilmek ve daha uzun süre yaşayabilmek için büyük önem arz etmektedir. Maliyeti en azlamak, kârı en çoklamak ve etkin üretim gibi yönetsel hedeflere ulaşmak için planlama ve kontrol alt sistemlerinin uyumlu olarak yürütülmesi gerekmektedir. Planlama ve kontrol alt sistemleri işletme kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Yöneticiler, işletmelerin çıktılarıyla girdileri arasındaki ilişkileri ele alan verimlilik düzeylerini, doğru olarak ölçebildikleri takdirde işletmelerinin etkin duruma geçmelerini sağlayabilirler (Özcan, 2005).

Bir kurumun amaçlarının gerçekleşebilmesi kuruma ait tüm bireylerin ve bölümlerin belirlenmiş hedefler doğrultusunda gösterecekleri performansa bağlıdır. Kurumun asıl amacı daima başarısını ve performansını artırmaya yöneliktir. Kurumların performansını ölçmek için kullanılan kriterler şunlardır: Karlılık, verimlilik, kalite, maliyet, gelişim ve yenilik, çalışan memnuniyeti ve müşteri memnuniyeti.

Bu kriterler performans ölçümünde ve değerlendirilmesinde en çok kullanılan kriterlerdir. Bu kriterlerin her birisi performans yönetim sisteminin ilk kademesi olan hedef seçme ve planlama sürecinde kullanılmaktadır (İpek, 2010).

2.2. Verimlilik

Verimliliğin çok farklı tanımları olmakla birlikte, bir verimlilik modeli tasarlanmasında en genel yaklaşım işletme, sektör ve ülkenin uzun, orta ve kısa dönemli kalkınma amaçlarına uygun, doğru girdi ve çıktı bileşenlerini belirlemektir. Genel bir tanım yapıldığında, verimlilik, bir üretim ya da hizmet sisteminin ürettiği çıktı ile bu çıktıyı elde etmek için kullanılan girdi arasındaki ilişkidir. Bu nedenle verimlilik, "çeşitli mal ve hizmetlerin üretimindeki kaynakların (emek, sermaye, arazi, malzeme, enerji, bilgi) etkin kullanımını" diye tanımlanmaktadır. Avrupa Verimlilik Komitesi (EPA) verimliliği şöyle tanımlamaktadır: "Verimlilik her üretim faktörünün etkin olarak kullanılma derecesidir. Verimlilik aslında bir düşünce tarzıdır ve asıl amacı var olanı daha da iyileştirmek için neler yapılması gerekir sorusunu araştırır. Her şeyin mutlaka daha iyisi yapılabilir inancına dayanır" (Özdemir, 2007). Anonim bir tanımlamaya göre ise verimlilik minimum giderle maksimum gelirin elde edilmesidir. Verimlilik tam manasıyla sağlandığında günümüzün ekonomik sorunları çözülecektir. Kalkınmış ve gelişmiş ülkeler incelendiğinde verimliliklerinin üst düzeyde olduğu görülmektedir.

Kronolojik bazı verimlilik tanımları şöyle ifade edilmektedir:

1883-Littre: Üretim yeteneği.

1990'lar-Early: Ürünler ve ürünlerin üretilmesinde faydalanan kaynaklar arasındaki ilişki.

1950-OEEC: Çıktıların üretim faktörlerine bölündüğünde elde edilen sonuç.

1955-Davis: Kullanılan üretim faktörlerinden elde edilen ürün miktarı değişimi.

1965-Kendrick ve Cramer: Kısmi, toplam verimlilik ve toplam faktör kavramlarıyla yapılan tanımlamalar.

1979-Sumanth: Toplam verimlilik, çıktının girdiye bölünmesiyle elde edilen sonuç.

1980-Kendrick ve diğerleri: İnsan dışı kaynaklarla temel işgücünün fiziksel birimlere çevrilerek çıktılarla karşılaştırılması.

1982-Bain: Çıktıların kendileriyle ilişkili girdilere oranıdır.

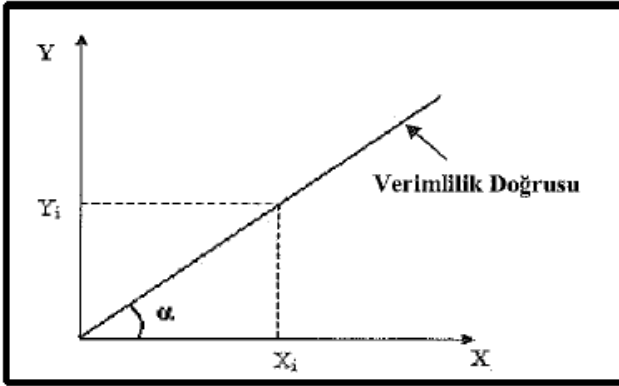
1986-Kopelman: Üretim sürecinde kullanılan girdilerin çıktılarla arasındaki ilişkidir (Köksal, 2001).

Verimlilik bir üretim sistemindeki girdilerin, çıktılarının, üretim sürecinde uygulanan yöntemlerin ve üretim kapasitesinin değişimlerinin çıktı/girdi ilişkisi düzeyinde göstergesi olmaktadır. Bu değişimler 3 şekilde olabilmektedir:

- Aynı girdiyi kullanarak daha çok çıktı elde etmek
- Daha az girdi kullanarak aynı çıktıyı elde etmek
- Girdide yapılacak artış oranından sonra çıktıda oluşacak artış oranının daha fazla olması

Matematiksel olarak verimlilik ölçümlerindeki bu değişiklikler şöyle ifade edilmektedir: $\text{Verimlilik} = \frac{\text{Çıktı}}{\text{Girdi}}$

Verimlilik, Şekil 2’de x doğrusu girdiyi, y doğrusu çıktıyı ifade etmek üzere verimlilik doğrusunun x eksenine yaptığı açının tanjantı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2. Verimlilik doğrusu (Erişir, 2013)

Bu matematiksel ifadeye göre verimlilik bir üretimden veya hizmet sürecinden elde edilen ürünlerin veya hizmetlerin yani çıktılarının, üretim için kullanılan kaynaklara yani girdilere oranlanmasıyla elde edilmektedir. Bu oranın hesaplanabilmesi için tüm girdi ve çıktılarının aynı zaman dilimindeki verileri temsil etmesi gerekmektedir (Bekar, 2006).

Birden fazla girdi ve çıktı olan durumlarda ise bu girdi ve çıktılarının tek bir paydada birleştirilecek şekilde ekonomik olarak anlamlandırılması gerekmektedir (Özcan, 2008). Bu da toplam verimlilik şeklinde

açıklanmaktadır. Toplam verimlilik formülüne göre a_i , x_i girdisinin ağırlığını, b_i de y_i çıktısının ağırlığını ifade etmek üzere şöyle ifade edilmektedir:

$$\text{Toplam Verimlilik} = \frac{\sum b_i * y_i}{\sum a_i * x_i}$$

Verimliliğin ölçülebilmesi için belli standartların sağlanması gerekmektedir. Fakat bu konuda hazır standartlar bulmak mümkün değildir. Her kurum kendi gelir ve giderlerini göz önünde bulundurarak farklı verimlilik standartları oluşturmaktadır (Çolak, 2010; Köse, 2010).

2.3. Etkinlik

Etkinlik (efficiency) en genel anlamıyla belirli bir çıktı miktarını en az girdiyle elde etmek olarak tanımlanmaktadır. Genellikle verimlilikle eş anlamlı kullanılsa da verimlilikten daha geniş bir anlam ihtiva etmektedir (Erişir, 2013). Etkinlikle alakalı bazı tanımlamalar şu şekildedir:

- Etkinlik bir firmanın sahip olduğu teknolojiyle elde edebileceği en fazla verimliliktir (Köksal, 2001; Karacaer, 1998).
- Elde edilen çıktının beklenen çıktıya oranıdır (Köksal, 2001; Sumanth, 1984).

Etkinlik farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Aşağıda çeşitli etkinlik türlerinin tanımları bulunmaktadır.

Teknik etkinlik: Üreticinin üretim olanakları kümesinde yer aldığı pozisyon olarak tanımlanmaktadır (Atan, 2005). 2 tür teknik etkinlik bulunmaktadır:

- *Girdiye yönelik teknik etkinlik:* Mevcut girdileri kullanarak en fazla çıktının elde edilmesidir.
- *Çıktıya yönelik teknik etkinlik:* Bir çıktı bileşimini en az girdi kullanarak üretilmesi başarısıdır (Köksal, 2001).

Ölçek etkinliği: Üretimde en uygun ölçeği bulabilme başarısıdır (Köksal, 2001). Ölçek etkinliğinde her KVB'nin tek başına sahip olduğu etkinliğin yerine toplam etkinlik söz konusudur. Başka bir tabirle en verimli olan ölçek büyüklüğüne yakın olma durumu olarak tanımlanmaktadır (İnan, 2000).

Ölçeğe göre getiri, uzun süreçte ölçek değiştiğinde girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılmaktadır. Uzun süreçte üretim faktörleri değişkenlik gösterdiği için girdilerin miktarı artırıldığında çıktının değişimine bağlı 3 durum oluşmaktadır:

- *Ölçeğe göre sabit getiri:* Tüm girdilerdeki artış oranı çıktılarda da aynı oranda artışa neden olan durumlarda ölçeğe göre sabit getiri (Constant Returns Scale, CRS)
- *Ölçeğe göre azalan getiri:* Tüm girdilerdeki artış oranı çıktılardaki artış oranından daha fazla olduğu durumlarda ölçeğe göre azalan getiri (Decreasing Returns to Scale, DRS)
- *Ölçeğe göre artan getiri:* Tüm girdilerdeki artış oranı çıktılarda daha fazla oranda artışa neden olduğu durumlarda ölçeğe göre artan getiri (Increasing Returns to Scale, IRS) geçerli olmaktadır.

Ölçeğe göre artan ve azalan getiri genellikle ölçeğe göre değişken getiri (Variable Returns to Scale, VRS) başlığı altında incelenmektedir.

Genellikle ölçeğin değişmesi (kullanılan miktarın artışı), firma üzerinde önce ölçeğe göre artan, sonra sabit getiri ve son olarak da azalan getiri olarak yansımaktadır. Bu üç durumda da üretim teknolojisi değişmemekte, yalnızca ölçek değişmektedir (Koopmans, 1977).

Tahsis etkinliği (Fiyat etkinliği): En az giderle en çok ürüne ulaşabilme veya aynı ürüne daha az giderle ulaşabilme başarısıdır. 2 türlü tahsis etkinliği bulunmaktadır:

- *Girdiye yönelik olarak tahsis etkinliği*: İşletmenin girdi fiyatlarını göz önünde bulundurarak en uygun girdi fiyatlarını seçme başarısıdır.
- *Çıktıya yönelik olarak tahsis etkinliği*: İşletmenin girdi fiyatlarını göz önünde bulundurarak en fazla çıktı miktarına ulaşma başarısıdır (Köksal, 2001).

2.3.1. Etkinliğin ölçülmesi

Bu bölümde oran analizi, parametrik yöntemler ve parametrik olmayan yöntemlerden kısaca bahsedilerek, aralarındaki farklara değinilecektir.

Oran analizi yöntemi

Oran analizi etkinlik ölçme yöntemleri arasında en basit ve en çok kullanılan yöntem olmuştur. Bu nedenle birçok analist tarafından her zaman kullanılan bir yöntem olmuştur. Oran analizi en çok kullanılan yöntem olmasına rağmen sadece tek girdili ve tek çıktılı durumlarda kullanılabilir olması ciddi bir dezavantaj olmuştur. Birçok kurumun etkinliklerini ölçmek için birden fazla girdi ve çıktı kullandığı düşünüldüğünde oran analizi ile bunu ölçmenin mümkün olmadığı görülmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde çok kullanışlı bir yöntem olmadığı görülmektedir (Arıç, 2011).

Sınır etkinliği yöntemleri

Sınır etkinliği yöntemi parametrik yöntemler ve parametrik olmayan yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Parametrik yöntemler:

Oran analizinin sakıncalarını azaltabilmek amacıyla parametrik yöntemlerden faydalanılmaktadır. Parametrik yöntemler etkinlik analizi için genellikle regresyon analizine başvurmaktadır. Basit ve çoklu kullanılan regresyon analizi etkinliklerin sebeplerine ve sonuçlarına dayanan matematiksel modellerdir (Arıç, 2011).

Parametrik yöntemler 3 gruba ayrılmaktadır.

Stokastik sınır yaklaşımı:

Stokastik sınır yaklaşımının (Stochastic Frontier Approach, SFA) temelleri Battese ve Corra (1977), Aigner, Lovell ve Schmidt (1977) ve Meeusen ve Van den Broek (1977) tarafından yazılmış makalelere dayanmaktadır. Bu yaklaşım girdiler ile çıktılar arasında fonksiyonel bir bağlantı olduğunu varsayarak etkin sınırı tahmin eder. Fonksiyonu belirledikten sonra ekonometrik tekniklerin

kullanılmasıyla fonksiyonun bilinmeyen parametrelerini hesaplar. Stokastik sınır yaklaşımı bazı kaynaklarda Ekonometrik sınır yaklaşımı (Econometric Frontier Approach, EFA) olarak geçmektedir. Yönteme stokastik denmesinin nedeni etkin sınırın birimden birime değişmesi ve rassal hata sebebiyle meydana gelen çıktının da rassal olmasıdır (Kale, 2009).

Dağılımdan bağımsız yaklaşım:

Dağılımdan Bağımsız Yaklaşım literatürde Distribution Free Approach (DFA) olarak geçmektedir. Berger bu yaklaşımı stokastik sınır yaklaşımının alternatifi olarak görmüştür. Stokastik sınır yaklaşımına benzer olarak sınır için bir fonksiyon biçimi önermektedir fakat etkinsizliği rassal hatadan farklı bir biçimde ayırmaktadır. Bu yaklaşımın stokastik sınır yaklaşımından farkı rassal hatanın dağılımı veya etkinsizliği ile ilgili güçlü öngörülerde bulunmaz. Bunun yerine rassal hataların ortalamalarının zaman geçtikçe 0 (sıfır) olacağını ve her birimin etkinliğinin zaman içerisinde durağan olduğunu ön görmektedir. Dağılımdan bağımsız yaklaşımın en önemli farklılıklarından birisi en yüksek ve en düşük birimi hesaba katmayarak uç değerlerin etkisini en aza indirmeyi amaçlamasıdır.

Stokastik Sınır Yaklaşımı ve Kalın Sınır Yaklaşımı gibi bu yaklaşım türü de etkinlik ölçümünde kullanılan bir yöntemdir. Bu yaklaşımın sıralaması ile Stokastik Sınır Yaklaşımı ve Kalın Sınır Yaklaşımının etkinlik sıralamalarında benzerlikler olması beklenir (Kale, 2009).

Kalın sınır yaklaşımı:

Kalın Sınır Yaklaşımı literatürde Thick Frontier Approach (TFA) olarak geçmektedir. Genellikle bankacılıkta kullanılan bu yöntem ilk olarak 1991 yılında Berger ve Humphrey tarafından bankacılık sektöründe kullanılmıştır (Allen ve Humphrey, 1991). Bu yaklaşım VZA'nın akisine olarak birimleri etkin sınırdaki birimlerle değil karşılaştırmaz. Bunun yerine ölçümü yapılan kümenin tamamıyla karşılaştırır (Kale, 2009).

Parametrik olmayan yöntemler:

Girdi ve çıktılarının niteliksel farklılıkları etkinlik analizini zor bir duruma getirmektedir. Günümüzde kullanılan birçok kaynak ve bunların sonucunda elde edilen birçok ürün ve girdiler ile çıktılarının birimlerinin farklı olması etkinliğin ölçülmesini daha da güç bir hale getirmektedir. En çok kullanılan parametrik olmayan etkinlik yöntemi Veri Zarflama Analizidir (Kale, 2009). VZA ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Parametrik ve parametrik olmayan yöntemlerin karşılaştırılması:

Günümüzde kullanılan çeşitli etkinlik ölçme yöntemleri vardır. Bu yöntemlerin kullanıcılara sağladığı çeşitli avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu farklılıkların bilinmesi sağlıklı bir analiz yapmak açısından önem arz etmektedir. Tablo 1'de bu yöntemler arasındaki farklılıklar gösterilmektedir.

YÖNTEM SINIFI			
Karşılaştırma Ölçütleri	Oran Analizi	Parametrelili Yöntemler	Parametresiz Yöntemler
Çözüm Tekniği	Oranlamalar	Regresyon	Matematik Programlama
İçerik	Tek Girdi / Tek Çıktı	Çok Girdi / Tek Çıktı	Çok Girdi / Çok Çıktı
Veri Temini	Basit	Basit	Detaylı
Uygulama	Kolay	Kolay	Kolay (Detaylı)
Performans Ölçümüne Uygunluk	Kısıtlı	Kısıtlı	Geniş

Tablo 1. Etkinlik ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması
(Besen, 1994; Tekin, 2011)

Tablo 1 incelendiğinde oran analizi ve parametrelili yöntemlerin parametresiz yöntemlere kıyasla basit olması uygulamalarının da basit olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca parametresiz yöntemlerin çok girdiyi çok çıktıya oranlaması da performans ölçümü için diğerlerine oranla daha uygun olduğunu göstermektedir. Bahsedilen 3 sınıfta değişik çözüm tekniği kullandığı görülmektedir. Bahsedilen etkinlik ölçme yöntemlerinden detaylı veri teminine ihtiyaç duyulan ve uygulaması da detaylı olmasına rağmen basit olduğu için genellikle etkinlik analizi yapılırken parametresiz yöntemler kullanılmaktadır (Besen, 1994; Tekin, 2011).

2.4. Etkililik

Etkililik kavramı etkinlik kavramıyla çok sık karıştırılan bir kavramdır. Etkililik çıktıyla ilgili etkinlik ise eldeki kaynakların kullanımıyla ilgili bir terimdir. Etkililik en iyi çıktıyı elde etmektir. Etkinlik ise doğru zamanda doğru işi yapmaktır.

Etkililik = Gerçekleşen Çıktı / Planlanan Çıktı

Etkinlik = Standart Değer / Planlanan Değer

3. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ (VZA)

VZA'nın temelleri ilk defa Farrell tarafından atılmıştır. Farrell 1957 yılında "The Measurement of Productive Efficiency" adlı bir makale yayınlamıştır (Farrell, 1957). Bu makalede firma etkinliğini teknik etkinlik ve tahsis etkinliği olmak üzere 2'ye ayırmıştır. Bu makalede Farrell etkinliği gözlem birimlerinin etkin sınırdan uzaklığının ölçümüne dayandırmıştır. Çalışma her ne kadar çok girdili ve tek çıktılı olsa da etkinlik ölçümü için kurulan denklem sistemi, çok

çıkıtlı etkinliğin hesaplanmasına temel oluşturmuştur (Budak, 2010; Farrell, 1957).

Edwardo Rhodes'in Carnegie Mellon Üniversitesinde (şimdiki adı H. J. Heinz III School Of Public Policy and Management) yaptığı doktora çalışmasıyla başlamıştır. W. W. Cooper'ın danışmanlığı altında, Edwardo Rhodes dezavantajlı öğrenciler için (genellikle zenci ve İspanyol) Fedearal hükümet desteği ile ABD'deki devlet okullarında bir eğitim programı geliştiriyordu. Analize göre bir eğitim kurumuna katılanlar ve katılmayanlar arasındaki performans etkileri karşılaştırmaktaydı. Bu çalışmadan sonra ilk olarak ürettikleri mal ve hizmet bakımından birbirlerine benzer ekonomik karar verme birimlerinin görelî etkinliklerinin ölçülmesi amacıyla 1978'de Charnes, Cooper ve Rhodes European Journal of Operations Research'da ilk makalelerini yayınladılar (Akyol, 2009).

VZA ile ilgili yapılan bu ilk çalışmanın ardından birçok alanda uygulanmaya başlanmıştır. Fakat ilk zamanlar etkin olan KVB'ler belirlenebilmiş fakat etkin olmayan KVB'ler hakkında bir bilgi edinilememiştir. İlk defa 1993 yılında "süper etkinlik skoru" denilen ve etkin KVB'ler ile etkin olmayan KVB'ler arasında karşılaştırma yapılabilen bir yöntem geliştirilmiştir. Anderson ve Petersen tarafından geliştirilen bu yöntem, etkin KVB'lerin arasında sıralama yapmakla birlikte üretim sınırının şeklinin nasıl olacağını da göstermektedir (Akyol, 2009).

3.1. VZA'nın Temel Modelleri

Performans ölçüm yöntemlerinden parametrik olmayan bir yöntem olan VZA temelinde teknik etkinliğin ölçülmesini hedeflemekte ve matematiksel programlama tekniğini kullanmaktadır. Etkin olan KVB'lerden oluşan bir etkinlik sınırı belirleyerek, görelî olarak bu sınırdaki bulunmayan KVB'lerin bu sınıra olan uzaklıklarını gözeterek teknik etkinliğin ölçümünü yapmaktadır. VZA bir KVB'nin ağırlıklandırılmış çıktılarını ağırlıklandırılmış girdilerine oranlayarak matematiksel programlama yardımıyla etkinlik analizini gerçekleştirmektedir. VZA'nın temel modelleri CCR ve BCC modelleridir.

3.1.1. Charnes Cooper Rhodes (CCR) Modeli

1957 yılında Farrell'in yapmış olduğu etkinlik tanımından ilham alan Charnes, Cooper ve Rhodes ölçeğe göre sabit getiri varsayımına dayanan ilk VZA modelini tanımlayarak kendi isimleri olan Charnes, Cooper ve Rhodes'in baş harflerini kullanarak CCR modeli ismini verdikleri yöntemi geliştirmişleridir. Bu model Farrell'den 20 yıl sonra onun fikirlerinden ilham alınarak çoklu girdi ve çıktı üretim birimlerinin görelî etkinliklerini ölçen bir model olarak geliştirilmiştir (Köseoğlu, 2009; Cook ve Seiford, 2008).

Ölçeğe göre sabit getirinin olduğu durumlarda kullanılan bu yöntem teknik etkinlik ile ölçek etkinliğinin çarpımı olan toplam etkinlik skorunu vermektedir. Girdiye yönelik ve çıktıya yönelik olmak üzere iki çeşit CCR modeli bulunmaktadır (Cook ve Seiford, 2008)

Girdiye yönelik CCR modeli

Girdiye yönelik CCR modeli minimum girdi kullanarak aynı miktarda çıktı miktarını elde etmeyi araştıran CCR modelidir. Bu modelin dual ve primal şekilleri aşağıdaki gibidir.

Girdiye yönelik CCR primal modeli

$$\text{Min } Z_0 = \theta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}$$

$$\theta x_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- = 0$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Girdiye yönelik CCR Dual model

$$\text{Max } w_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Bu modellerde m girdi sayısını, s çıktı sayısını, n ise KVB sayısını göstermektedir. Dual modelde görüleceği üzere etkinliği hesaplanmak istenen KVB'nin çıktılarının ağırlıklı ortalamasının maksimum yapılması amaçlanmıştır. Kısıt olarak ise etkinliği hesaplanmak istenen KVB'nin çıktılarının ağırlıklı ortalamasının maksimum olması hedeflenmiştir. Böylece çıktının girdiye oranı her KVB için en fazla 1 olabilmektedir. Böylelikle bir KVB'nin ortalaması en fazla 1 olabilmektedir. Primal modelde geçen s^+ çıktılardaki azlıkları, s^- ise girdilerdeki fazlalığı ifade eden aylak değişkenlerdir. Girdi yönlü modellerde KVB_0 için eğer $s^+ = s^- = 0$ ve $\theta^* = 1$ oluyorsa bu KVB etkindir. Aksi takdirde KVB etkin değildir ve etkin olmayan KVB'lerin etkinlik değeri 1'den küçüktür (Akyol, 2009).

Çıktıya yönelik CCR modeli

Çıktıya yönelik CCR modeli girdi düzeyinde bir değişiklik yapmadan çıktı yönünde maksimum kazanç elde etmeyi amaçlayan CCR modelidir. Bu modelin dual ve primal şekilleri aşağıdaki gibidir.

Çıktıya yönelik CCR primal modeli

$$\text{Max } z_0 = \beta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = x_{i0}$$

$$\beta y_{r0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + s_r^+ = 0$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Çıktıya yönelik CCR dual modeli

$$\text{Min } w_0 = \sum_{i=1}^m v_i x_{i0}$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Bu modellerde m girdi sayısını, s çıktı sayısını, n ise KVB sayısını göstermektedir. Dual modelde görüleceği üzere etkinliği hesaplanmak istenen KVB'nin girdilerinin ağırlıklı ortalamasının minimum yapılması amaçlanmıştır. Kısıt olarak ise etkinliği hesaplanmak istenen KVB'nin çıktılarının ağırlıklı ortalamasının 1 olması sağlanmıştır. Diğer kısıtta ise çıktılarının ağırlıklı ortalama girdilerinkinden küçük olması hedeflenmiştir. Böylece çıktının girdiye oranı her KVB için en az 1 olabilmektedir. Böylelikle bir KVB'nin optimum çıktı ortalaması en az 1 olabilmektedir. Primal modelde geçen s^+ çıktılardaki azlıkları, s^- ise girdilerdeki fazlalığı ifade eden aylak değişkenlerdir. Çıktı yönlü modellerde KVP_0 için eğer $s^+ = s^- = 0$ ve $\beta^* = 1$ oluyorsa bu KVB

etkindir. Aksi takdirde KVB etkin değildir ve etkin olmayan KVB'lerin etkinlik değeri 1'den küçüktür (Akyol, 2009).

3.1.2. Banker, Charnes, Cooper (BCC) modeli

BCC modeli Banker, Charnes ve Cooper tarafından CCR modeline alternatif olarak 1984 yılında geliştirilmiştir. CCR modeli ölçeğe göre sabit getiri varsayımı üzerine kuruluyken, BCC modeli ölçeğe göre değişken varsayımı üzerine kurulmuştur.

CCR modelleri teknik etkinlik ile ölçek etkinliğinin çarpımı olan toplam etkinlik skorunu ölçeğe göre sabit getiri varsayımı altında vermektedir. BCC modeli ise teknik etkinlik skorunu ölçeğe göre değişken getiri varsayımı altında benzer ölçekteki birimleri birbirlerine göre kıyaslayarak ölçmektedir. Yani CCR modeline ölçeğe göre değişken getiri varsayımı ile konvekslik sınırı eklenerek BCC modeli oluşturulmuştur (Akyol, 2009).

Girdiye yönelik BCC modeli

Girdiye yönelik BCC modeli aynı çıktı miktarını elde edebilmek için minimum girdi miktarını amaçlayan BCC modelidir. Girdiye yönelik BCC modelinde, girdiye yönelik CCR modeline ek olarak

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

konvekslik kısıtı eklenmektedir. Girdiye yönelik BCC modelinin primal ve dual modelleri şu şekildedir.

Girdiye yönelik primal BCC modeli

$$\text{Min } z_0 = \theta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0}$$

$$\theta x_{i0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- = 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Girdiye yönelik dual BCC modeli

$$\text{Max } w_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + u_0$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + u_0 \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad u_0 \text{ serbest değişken}$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

BCC girdiye yönelik primal model incelendiğinde CCR girdiye yönelik primal modelle çok benzer olduğu ve tek farkın

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

olduğu görölmektedir. Benzer şekilde BCC girdiye yönelik dual model incelendiğinde CCR girdiye yönelik dual modelle çok benzer olduğu ve tek farkın çıktıların ağırlıklı ortalamasına u_0 serbest değişkenin eklenmiş olmasıdır. Bu değişiklikler ölçęe göre değişken getiriye sağlamak için etkinlik sınırının yapısını değiştirmektedir. CCR modellerde orjinden geçmesi gereken etkinlik doğrusu, BCC modellerde orjinden geçmeyebilir. Modeldeki diğer değişkenler CCR modellerde olduğu gibidir (Akyol, 2009).

Çıktıya yönelik BCC modeli

Çıktıya yönelik modellerin genel özelliği olan aynı düzeyde girdiyi kullanarak en fazla çıktıyı elde etme prensini çıktıya yönelik BCC modeli için de geçerlidir. Fakat girdiye yönelik BCC modelde geçerli olan ölçęe göre değişken getiri varsayımı bu modelde de geçerlidir. Çıktıya yönelik BCC modeli çıktıya yönelik CCR modeliyle benzerlik göstermektedir. Bu iki model arasındaki tek fark BCC modelinde CCR modeline ek olarak konvekslik kısıtının eklenmiş olmasıdır. Çıktıya yönelik BCC modelinin primal ve dual modelleri şu şekildedir.

Çıktıya yönelik primal BCC modeli

$$\text{Max } z_0 = \beta$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- = x_{i0}$$

$$\beta y_{r0} - \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} + s_r^+ = 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Çıktıya yönelik dual BCC modeli

$$\text{Min } w_0 = \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} + v_0$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{r0} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + v_0 \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad v_0 \text{ serbest de\u0131\u015fen}$$

$$r = 1, \dots, s \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Çıktıya yönelik BCC primal model incelendi\u011finde çıktıya yönelik CCR modelle \u00e7ok benzer oldu\u011fu ve tek farkın

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

e\u015itli\u011fi oldu\u011fu g\u00f6r\u00fclmektedir. Çıktıya yönelik BCC dual model incelendi\u011finde ise benzer \u015fekilde çıktıya yönelik CCR modeller \u00e7ok benzer oldu\u011fu ve tek farkın v_0 serbest de\u011fi\u015feninin kullanılıyor olmasıdır. Bu de\u011fi\u015fiklikler \u00f6l\u00e7e\u011fe g\u00f6re de\u011fi\u015fen getiriye sa\u011flamak i\u00e7in etkinlik sınırının yapısını de\u011fi\u015ftirmektedir. CCR modellerde orjinden ge\u00e7mesi gereken etkinlik

doğrusu, BCC modellerde orjinden geçemeyebilir. Modeldeki diğer değişkenler CCR modellerde olduğu gibidir (Akyol, 2009).

3.2. VZA'nın Uygulama Aşamaları

Bu bölümde VZA'nın uygulama aşamaları sırasıyla ele alınmaktadır.

3.2.1. KVB'lerin seçilmesi

Benzer girdiler kullanarak benzer çıktılar üreten, yani üretimleri birbirleriyle homojen yapıda olan girdileri çıktılara dönüştüren birimlere Karar Verme Birimi (KVB) denilmektedir. Literatürde ise KVB'ler Decision Making Units (DMUs) olarak tanımlanmaktadır. VZA'da ilk yapılması gereken birbirleriyle görece etkinlik yapılacak KVB'lerin seçilmesidir. KVB'lerin seçiminde birimlerin homojen olması yani üretim ve teknoloji açısından birbirlerine benzer olmaları çok önemlidir. Çeşitli bilim adamları VZA'nın etkin şekilde kullanılabilmesi için KVB'lerin sayısı ile girdilerin ve çıktılarının sayıları arasında belli oranların olması tavsiye etmektedirler. Bunlar

- KVB sayısı girdi ve çıktı sayılarının toplamının en az üç katı olmasını gerektiğini savunurlar (Vassiloglou ve Giokas, 1990)
- KVB sayısının en az 20 olması gerektiğini savunanlar (Norman ve Stoker, 1991)
- KVB sayısı Girdi ve Çıktı sayısının toplamının en az 2 katı olması gerektiğini savunanlar
- Girdi sayısı m , çıktı sayısı p olmak üzere $m+p+1$ tane KVB sayısı olması gerektiğini savunurlar (Behdioğlu ve Özcan, 2009; Boussofiâne, Dyson ve Rhodes, 1991).

KVB'lerin seçilmesinde şu hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Seçilen birimler aynı görevleri veya benzer işleri yapmalıdırlar
- Bütün birimler aynı pazarda yer almalıdırlar
- Tüm birimlerin girdi ve çıktı yoğunluk ve büyüklükleri hariç aynı olmalıdır (Oruç, 2008; Baysal ve Toklu, 2001)

3.2.2. Girdi ve çıktılarının belirlenmesi

Girdi ve çıktılar belirlenirken ilk aşamada geniş bir liste oluşturulmalıdır. KVB'leri etkileyebilecek her boyut başlangıç listesine dahil edilmelidir. Daha sonra oluşturulan bu liste KVB'lerin çalıştıkları sahada uzman olan kişiler tarafından eleştiri yapılarak incelenmelidir. Listedeki seçilecek olan girdi ve çıktılarını belirlemede aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

- Girdi ve çıktılar uygulamanın amaçlarından bir veya birkaçına etkide bulunuyor mu?
- Girdi ve çıktılar birbirlerine paralel olmayan bilgilerden mi oluşuyor?
- Girdi ve çıktı verileri güvenilir mi?

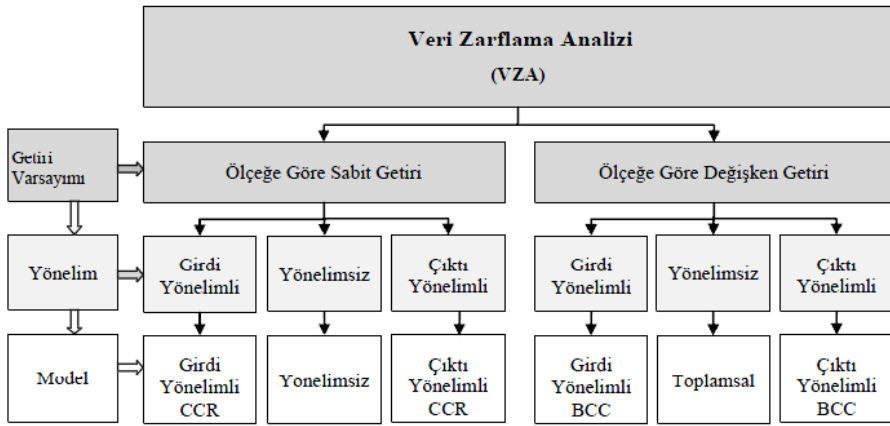
Bu faktörlerin analize katılması için rakamsal olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Girdiler ve çıktılar tüm KVB'ler için geçerli olması

gerekmektedir. Bu adımlar takip edilerek analize katılacak girdiler ve çıktılar belirlenmektedir (Akyol, 2009).

3.2.3. Modelin belirlenmesi

Yapılacak analizin amacına uygun olarak girdiye ve çıktıya uygun olarak CCR veya BCC modellerinden biri seçilmelidir. BCC ölçeğe göre değişken getiri esasına dayanır ve ölçeğe göre sabit getiri esasına dayanan CCR'a göre daha hassas çalışmaktadır (Farrell, 2009; Akyol, 2009).

Her sistemin girdi ve çıktı ağırlıklarını, kendi etkinlik derecesini en çok artıracak şekilde seçebileceğinin varsayıldığı VZA'da birçok model vardır. Şekil 3'te bu modeller gösterilmektedir.



Şekil 3. VZA'da kullanılan modeller (Özden, 2008)

Bu modeller arasından hangisinin seçileceğine karar verici araştırmanın kapsamına ve kullanacağı varsayımlara göre kendisi belirlemektedir. Örneğin:

- KVB'lerin ölçeğe göre sabit getiriye sahip oldukları düşünülüyorsa ve her birimin toplam etkinliği belirlenmek isteniyorsa CCR veya yönelimsiz modeller seçilmelidir.
- KVB'lerin ölçeğe göre değişken getiriye sahip oldukları düşünülüyorsa ve her birimin teknik etkinliği belirlenmek isteniyorsa BCC veya toplamsal modeller seçilmelidir.
- KVB'lerin etkinlikleriyle alakalı daha ayrıntılı bilgiler elde edilmek isteniyorsa, yani toplam etkin olmayan KVB'lerin etkinsizliklerinin nedeni teknik etkinlikten mi, ölçek etkinliğinden mi kaynaklandığı anlaşılacak isteniyorsa o zaman, toplam, teknik ve ölçek etkinliklerinin hepsinin hesaplanması gerekmektedir.

Ayrıca VZA'da en çok kullanılan CCR ve BCC modelleri girdi ve çıktı yönelimli olarak çeşitlenmektedir. Karar vericinin girdiler üzerinde etkisi azsa ya da yoksa çıktı yönelimli model, eğer çıktı üzerinde etkisi azsa ya da yoksa girdi yönelimli model seçilmelidir. Girdi yönelimli modellerde mevcut çıktıyı

en az girdiyle üretmeye, çıktı yönelimli modellerde ise mevcut girdi ile en fazla çıktıya ulaşılmaya çalışılmaktadır. Eğer en az girdiyle en fazla çıktı üretilmek isteniyorsa toplamsal veya yönelimsiz modeller seçilmelidir (Özden, 2008; Dinç ve Haynes, 1999).

3.2.4. Referans kümelerinin belirlenmesi

VZA’da etkin olan KVB’ler etkin olmayan KVB’ler tarafından referans kabul edilerek etkin düzeye ulaşabilecekleri varsayımı üzerine kurulmuştur (Özden, 2008; Dinç ve Haynes, 1999). VZA’ya göre etkin olmayan KVB’ler etkin KVB’leri referans olarak kabul ederek, etkin hale gelebilmek için yapmaları gereken değişiklikleri göstermektedir.

3.2.5. Sonuçların değerlendirilmesi

VZA’da yapılan bir analiz sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılır. Bunlar:

- Etkin KVB’ler
- Etkin olmayan KVB’ler
- Etkin olmayan KVB’ler tarafından kullanılan fazla kaynak miktarları,
- Etkin olmayan KVB’lerin şu anki girdi miktarlarıyla normalde üretmeleri gereken çıktı miktarları
- Etkin olmayan KVB’lerin etkin olan KVB’lerden oluşan referans kümeleri (Arıç, 2011).

En verimli KVB’ler en az girdi kullanarak en çok çıktıyı elde eden KVB’lerdir. Bu durumdaki KVB’lerin etkinliği 1’e (%100) eşit kabul edilmekte ve etkin olan KVB’ler olarak sayılmaktadır. Sınır çizgisinin altındaki KVB’lerin ise etkinliği 1’den küçük olmakta ve etkin olmadıkları sonucuna varılmaktadır. KVB’lerin etkinlik değerleri etkinlik derecesine göre 0 ile 1 aralığında değişmektedir.

3.3. VZA’nın Güçlü ve Zayıf Yönleri

3.3.1. VZA’nın güçlü yönleri

VZA doğru biçimde kullanıldığında çok güçlü bir analiz yöntemidir. VZA’yı güçlü kılan yönler şu şekilde sıralanmaktadır:

- VZA doğru form dışında ilişkilendirilecek herhangi bir fonksiyonel forma gereksinim duymamaktadır.
- VZA’da öncelikle etkin KVB’ler bulunur, etkin KVB’lere göre diğer KVB’lerin etkinliği ölçülür
- Girdiler ve Çıktılar tamamen alakasız birimlerden seçilebilmesine rağmen ortak bir paydada birleştirmeye ihtiyaç duyulmamaktadır.
- VZA göreceli etkinliği ölçerken, her KVB’nin kendini etkin hale getirebilmesi için neler yapmasına gerek duyduğunun bilgisini verir. Fakat parametrelili yöntemler endüstrinin tamamını ele alarak, ortalama etkinliğe göre analiz yapmaktadır.

- VZA çok girdiyi ve çok çıktıyı analiz edebilmektedir (Dağ, 2011; Atan, Karpat ve Göksel, 2002; Yolalan, 1993).

3.3.2. VZA'nın zayıf yönleri

VZA'nın bazı zayıf yönleri bulunmaktadır. Uygulayıcının bu zayıflıkları göz önünde bulundurması gerekmektedir. VZA'nın zayıf yönleri şunlardır:

- VZA maksimum sınır tekniğine dayandığı için ölçüm hatalarından çok fazla etkilenmektedir.
- KVB'lerin etkinliği ölçmede yeterli olmasına rağmen mutlak etkinlik için yeterli olmamaktadır.
- VZA parametrik bir teknik olmadığı için sonuçlara istatistiksel bir hipotez uygulanması zor olmaktadır.
- Statik bir analizdir. Bu yüzden sadece tek bir dönemin verilerinin kesit analizini yapar.
- Uygun paket program bulunmadığında büyük problemlerin analizi uzun zaman almaktadır (Dağ, 2011; Bakırcı, 2006).

3.4. VZA'da Kullanılan Paket Programlar

Veri zarflama analizi modellerinin çözümlenmesinde birçok bilgisayar programı kullanılabilir. Bu programların bazıları sadece etkinlik analizi için kullanılabilirken, bazıları da veri zarflama analizini doğrusal programlama modeline dönüştürerek çözümlenebilir. Windows ile çalışabilen programlardan bazıları şunlardır: Maxdea, Etaks, Ideas, Warwick Windows DEA, DEAP, Pioneer, Frontier Analyst, Dea Solver, PIM-DEA, OSDEA, Banxia Frontier Analyst, EMS. Ayrıca optimizasyona dayalı programlardan VZA için de kullanılabilen programlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır: Storm, GAMS, Osb ve Lindo. VZA'da farklı bilgisayar programlarının kullanımı aynı yöntem için farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu durum, farklı programların farklı çözüm algoritması kullanmalarından kaynaklanmaktadır (Savaş, 2009; Kılıç ve Atan, 2004).

4. SONUÇ

Günümüzde işletmeler ve kurumlar devamlı bir değişim döngüsü içerisinde gelişen şartlara uyum sağlama durumundadır. Rekabetin her geçen gün daha da artması işletmelerin ve kurumların ayakta kalabilmeleri için kısa vadeli planlardan ziyade uzun vadeli ve stratejik planlar yapmalarını bir gereklilik haline getirmiştir. Bu şekilde ellerindeki sınırlı miktardaki kaynağı etkin biçimde kullanarak en iyi performansı sergileme imkânı yakalamaktadırlar. Bu bağlamda etkinliklerini araştırmaları ve buna yönelik planlar yapmaları önem arz etmektedir.

Günümüzde etkinlik ölçümü için kullanılan farklı teknikler bulunmaktadır. Bunlardan biri VZA'dır. VZA ilk öngörüldüğü günden bugüne kadar birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve VZA'nın kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. Eğitim sektörü, sağlık sektörü, turizm sektörü, bilişim sektörü ve

bankacılık sektörü gibi çok farklı sektörlerde VZA kullanılarak etkinlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. VZA etkinlik analizinin zor yapıldığı kâr amacı gütmeyen organizasyonlarda daha fazla kullanılmaktadır. Bunun sebebi kâr amacı güden kuruluşlar etkinliklerini, gelirlerini gözeterek yapabiliyorken kâr amacı gütmeyen kuruluşların böyle bir gelirlerinin olmamasıdır.

Sonuç olarak her geçen gün VZA kullanılarak yapılan araştırma sayıları artmaktadır. Birbirleriyle emsal olan işletmeler, kurumlar veya aynı sektörden rakipler VZA ile göreceli olarak etkinliklerini değerlendirme imkânı yakalamaktadırlar. VZA sonucunda elde edilen bulgulara göre göreceli olarak etkin olmayan birimler referans aldıkları karar birimlerine göre hangi girdilerde gereğinden fazla girdi yaptıklarını veya hangi çıktılarda olması gerekenden az çıktı elde ettiklerini tespit edebilmektedirler. Bu sayede yöneticiler gerekli tedbirleri alarak bu konularda stratejiler geliştirebilmektedirler.

KAYNAKLAR

1. Aigner, D. J., Lovell, C. A. K., Schmidt, P. (1977). "Formulation and estimation of stochastic frontier production function models", *Journal of Econometrics*, 6(1):21-37.
2. Akyol, M. (2009). "Veri zarflama analizi ve yükseköğretimde bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 45-81.
3. Allen N. B., Humphrey, D. B. (1991). "The dominance of inefficiencies over scale and product mix economies in banking", *Journal of Monetary Economics*, 28(1):117-148.
4. Arıĝ, T. T. (2011). "Etkinlik hesaplama yöntemi olarak veri zarflama analizi ve İMKB'de işlem gören imalat sanayi şirketlerinin görel finansal etkinliklerinin değerlendirmesine ilişkin bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul,65-80.
5. Atan, M. (2005). "Üretim ve Verimlilik Arttırma Teknikleri Eğitim Notları", Gazi Üniversitesi Ekonometri Bölümü.
6. Atan, S., Karpat, G., Göksel, A. (2002). "Ankarada'ki anadolu liselerinin toplam etkinliğinin veri zarflama analizi (VZA) ile saptanması", XI. Eğitim Bilimleri Kongresi, KKTC Yakın Doğu Üniversitesi, Kıbrıs, 1-10.
7. Bakırcı, F. (2006). "Üretimde etkinlik ve verimlilik ölçümü veri zarflama analizi teori ve uygulama", Atlas Yayınları, 1. Basım.
8. Battese, G. E., Corra, G. S. (1977). "Estimation of a production frontier model: With application to the pastoral zone off Eastern Australia", *Australian Journal of Agricultural Economics*, 21(3):169-179.
9. Baysal, M. E., Toklu B. (2001). "Veri zarflama analizi ile bazı orta öğretim kurumlarının performanslarının değerlendirilmesi", Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 6(2):206.
10. Behdioĝlu, S., Özcan, G. (2009). "Veri zarflama analizi ve bankacılık sektöründe bir uygulama", Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 14(3):304..
11. Bekar, İ. (2006). "Parke endüstrisindeki işletmelerinde verimlilik rasyoları, verimlilik karlılık ilişkisi ve bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bolu, 18.
12. Besen, B. (1994). "Performans Yönetim Sistemi ve Veri Zarflama Analizinin Sağlık Sektöründe Uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28.
13. Boussofiâne A., Dyson, R., Rhodes, E. (1991). "Applied DEA", *European Journal of Operational Research*, 2(6): 1-15.
14. Budak, H. (2010). "Veri zarflama analizi ve hisse senedi seçiminde bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 18.

- 15.Charnes, A., Cooper, W. W., Lewin, A. Y., Seiford, L. M. (1994) "Data Envelopment Analyses Theory, Methodology and Applications", United States of America, 3-4.
- 16.Cook, W. D., Seiford, L. M. (2008). "Data Envelopment Analysis (DEA) Thirty Years On" *European Journal of Operational Research*.
- 17.Çolak, C. (2010). "Performans kavramı, değerlendirmesi ve Balıkesir İl Emniyet Müdürlüğü Yıldırım Ekipler Amirliğinde performans uygulaması örneği", Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Balıkesir, 9.
- 18.Dağ, S. (2011). "Türkiye'deki katılım ve mevduat bankalarının etkinliklerinin veri zarflama analizi yöntemiyle karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 60-61.
- 19.Dinç, M., Haynes, K. E. (1999). "Sources of Regional Inefficiency: An Integrated Shift-Share, Data Envelopment Analysis and Input-Output Approach", *The Annals of Regional Science*, 33, 469-489.
- 20.Erişir, E. (2013). "Bankacılık sektöründe verimlilik değerlendirmesi : Türkiye ve Avrupa Birliği ülkeleri üzerine ampirik çalışmalar", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Bankacılık ve Sigortacılık Enstitüsü, İstanbul, 15-25.
- 21.Farrell, M. J. (1957). *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3):253-290.
- 22.İnan, E. A. (2000). "Banka Etkinliğinin Ölçülmesi Ve Düşük Enflasyon Sürecinde Bankacılıkta Etkinlik", *Bankacılar Dergisi*, 34.
- 23.İpek, E. (2010). "İşletmelerde Performans Yönetimi ve 360 Derece Performans Değerleme Yöntemi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 6.
- 24.Kale, S. (2009). "Veri zarflama analizi ile banka şubelerinin performansının ölçülmesi", Doktora Tezi, Kadir Has Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 25-39.
- 25.Kalkan, A. (2005). "Kobilere sağlanan desteklerin örgütsel performansa etkileri", Doktora Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü.
- 26.Karacaer, S. (1998). "Antalya Yöresindeki 4 ve 5 Yıldızlı Otellerde Toplam Etkinlik Ölçümü: Veri Zarflama Analizi Uygulaması", Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 7.
- 27.Kıllı, M., Atan, M. (2004). "Etkinlik/Verimlilik çalışmalarında kullanılan veri zarflama analizi üzerine", 4. İstatistik Kongresi İstatistik Mezunları Derneği ve Türk İstatistik Derneği, Antalya.
- 28.Kocakalay, Ş. ve Işık, A. (2003). "Veri Zarflama Analizi", *DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5:163-173.
- 29.Koopmans, T. C. (1977). "Concepts Of Optimality And Their Uses", *American Economic Review*, 67:82.
- 30.Köksal, C. D. (2001). "Veri zarflama analizi ile bankacılıkta göreceli verimlilik ölçümü", Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta, 56-70.

- 31.Köse, Ö. (2010). "Dünyada ve Türkiye'de yüksek denetim", Sayıştay Yayın İşleri Müdürlüğü, Ankara, 81.
- 32.Köseoğlu, A. (2009). "Veri zarflama analizi ile Türkiye'deki bireysel emeklilik şirketlerinin etkinliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Bankacılık ve Sigortacılık Enstitüsü, İstanbul, 20-22.
- 33.Meeusen, W., Broeck, J. V. D. (1977). "Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error", International Economic Review, 18(2): 435-44.
- 34.Neely, A., Gregory, M., Platts, K. (2005). "Performance measurement system design, a literature review and research agenda", International Journal of Operations and Production Management, 25(12):1228.
- 35.Oruç, K. O. (2008). "Veri zarflama analizi ile bulanık ortamda etkinlik ölçümleri ve üniversitelerde bir uygulama", Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta, 12.
- 36.Ölçen, O. (2012). "Örgütlerde performans ölçümü ve uluslar arası faaliyet gösteren bir işletmenin Balanced Scorecard ile performans ölçüm süreci", Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 4.
- 37.Özcan, A. İ. (2005). "Celal Bayar Üniversitesine bağlı meslek yüksekokullarının etkinliklerinin veri zarflama analizi ile ölçülmesi", Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Manisa, 1.
- 38.Özcan, Y. A. (2008). "Health care benchmarking and performance evaluation, an assesment using data envelopment analyses", ABD: Springer, 113.
- 39.Özdemir, K. (2007). "Hızlı verimlilik değerlendirme (QPA) yaklaşımı ile verimlilik ölçümü ve bir tekstil işletmesinde uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kütahya, 7.
- 40.Özden, Ü. H. (2008). "Veri Zarflama Analizi ile Türkiye'deki Vakıf Üniversitelerinin Etkinliğinin Ölçülmesi", İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 37(2):170.
- 41.Saraç, M. (2009). "Stratejik yönetim ve performans aracı olarak performans karnesi ve EFQM mükemmellik modelinin uyumlaştırılarak birlikte kullanılabilirliği ve bir araştırma", Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bursa, 14.
- 42.Savaş, F. (2009). "Veri zarflama analizi ve bankacılık sektöründe etkinlik ölçümü uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 38.
- 43.Soba, M., Akcanlı, F., Erem, I. (2012). "İMKB'ye kayıtlı seçilmiş işletmelere yönelik etkinlik ölçümü ve performans değerlendirmesi: Veri zarflama analizi ve Topsis uygulaması", Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, Konya, 27:5.
- 44.Sumanth, D., J. (1984). "Productivity Engineering and Management", Mc Graw- Hill Book.

