

Mühendislikte Güncel Tartışmalar ve Disiplinlerarası Yaklaşımlar

Editör: Doç. Dr. Nusret BOZKURT



DUJAF

**MÜHENDİSLİKTE
GÜNCEL TARTIŞMALAR VE
DİSİPLİNLERARASI
YAKLAŞIMLAR**

Editör

Doç. Dr. Nusret BOZKURT



Mühendislikte Güncel Tartışmalar ve Disiplinlerarası Yaklaşımlar

Editör

Doç. Dr. Nusret BOZKURT

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: Mayıs 2026

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-8756-76-0

© Duvar Yayınları

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

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvarkitabevi@gmail.com

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir. Yayınevi ve editörler sorumlu tutulamaz.

İÇİNDEKİLER

1. Bölüm	1
Sous Vide Teknolojisinin Gıda Alanında Uygulamaları: Avantajlar, Dezavantajlar ve Güncel Gelişmeler Seda KALINTAŞ AYDIN, Duygu BALPETEK KÜLCÜ	
2. Bölüm	14
Türkçe Duygu Analizinde Orijinal Veri ve Farklı Çeviri Paradigmalarının Rolü: Geleneksel Derin Öğrenmeden Büyük Dil Modellerine Kapsamlı Bir Analiz Yunus Emre ASLAN, Fatih KAYAALP	
3. Bölüm	25
Verilog HDL ile Sayısal Sistem Tasarımı ve FPGA Gerçekleştirme Çalışmaları İsmail KARAKAŞ, Mete ÖZBALTAN	
4. Bölüm	37
Teknik Yeterlilik Kriterlerinin Yüklenici Seçimine Etkisi ve Sınırlılıkları Aylin ÖZODABAŞ, Nazım Çağatay DEMİRAL	
5. Bölüm	60
Kırmataş ve Kiremit Tozu Katkılarının Zeminin CBR Davranışı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi Perihan BİÇER	
6. Bölüm	76
Düşük Güçlü Entegre Devre Tasarım Teknikleri ve Uygulamaları Muhammed Remzi SARIOĞLU, Mete ÖZBALTAN	
7. Bölüm	99
Dijital İkiz Teknolojisinin Mühendislik Sistemlerinde Kullanımı: Üretim, Lojistik ve Afet Yönetimi Uygulamaları Zeynep Nur KÖSTEPEN	

1. Bölüm

Sous Vide Teknolojisinin Gıda Alanında Uygulamaları: Avantajlar, Dezavantajlar ve Güncel Gelişmeler

Seda KALINTAŞ AYDIN¹, Duygu BALPETEK KÜLCÜ²

Özet

Günümüzde bilinçli tüketiciler, gıdaların besin değerlerinin yanında duyuşal özelliklerini koruyan, minimum düzeyde işlenmiş, pratik ve uygun fiyatlı olmasına da dikkat etmektedirler. Sous-vide pişirme tekniğı, gıdaların vakumlu ambalaj içerisinde kontrollü sıcaklık ve süre koşullarında işlenmesine dayanan yenilikçi bir termal işlem yöntemidir. Geleneksel pişirme tekniklerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde uygulanması, ürünlerin duyuşal özelliklerinin korunmasını, su tutma kapasitesinin artırılmasını ve besin öğelerindeki kayıpların azaltılmasını sağlamaktadır. Özellikle et, balık, sebze ve hazır yemek ürünlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntem; homojen pişirme sağlanması, tekstürel kaliteyi iyileştirmesi ve raf ömrünü uzatması nedeniyle gıda endüstrisinde önemli bir alternatif işleme teknolojisi olarak değerlendirilmektedir.

Sous-vide uygulamalarında sıcaklık ve süre parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesi, mikrobiyolojik güvenliğın sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Vakum ortamı oksidatif reaksiyonları sınırlandırırken aroma bileşiklerinin korunmasına da katkıda bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, sous-vide tekniğinin yalnızca ürün kalitesini artırmakla kalmayıp aynı zamanda sürdürülebilir üretim, enerji verimliliğı ve tüketici beklentilerine uygun yüksek kaliteli ürün geliştirilmesi açısından da önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte uzun işlem süreleri, yüksek ekipman maliyetleri ve plastik ambalaj kullanımına bağlı çevresel etkiler yöntemin temel sınırlılıkları arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada sous-vide teknolojisinin tarihsel gelişimi, çalışma prensibi, farklı gıda ürünlerindeki uygulamaları, kalite özellikleri üzerine etkileri, avantajları ve sınırlamaları güncel literatür ışığında kapsamlı biçimde ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sous-vide, vakumlu pişirme, gıda işleme teknolojileri, gıda üretimi, termal işlem

¹ Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü, e-mail: sedakalintasaydin@gmail.com, Orcid ID: 0009-0006-9832-9489

² Doç. Dr. Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü, e-mail: duygu.balpetek@giresun.edu.tr Orcid ID: 0000-0001-7108-2654

1. Sous-Vide Teknolojisine Genel Bakış

Pişirme işlemi ile gıda maddelerinde bulunan mikroorganizma ve enzimler etkisiz hale gelirken raf ömrü uzamakta ve gıda güvenliği de sağlanmaktadır. Isıtma sıcaklığı ve süresi, gıdanın fiziksel, kimyasal, duyuusal ve besleyici özelliklerinde değişikliklere yol açmaktadır. Tüketicilerin koruyucu madde içermeyen, daha lezzetli, daha sağlıklı ve daha besleyici gıda maddelerine olan talebi, araştırmacıları alternatif işleme tekniklerine yöneltmiştir (Gokoglu, 2025). Son yıllarda alternatif işleme tekniklerden biri olan ve Fransızcadada “vakum altında” anlamına gelen Sous-Vide (SV) pişirme yöntemi kullanılmaktadır (Baldwin, 2012).

SV tekniği, vakumla paketlenmiş ürünlerin, istenen zaman ve sıcaklık parametrelerine göre hassas sıcaklık kontrolü altında bir su banyosunda pişirilmesini içermektedir. Bu teknik ile gıda maddesinin nemi, lezzeti ve besin değeri korunmakla birlikte, oksidasyonun ve istenmeyen tatların oluşması da engellenmektedir (Gokoglu, 2025).

Isıl işlem koşulları, et türüne, et kesiminin büyüklüğüne, kas içi bağ dokusuna ve miyofibriller protein bileşenlerine bağlı olarak değişmektedir. Bu yöntem; ön işlem (baharatlama vs), ön ısıl işlem (Maillard reaksiyonları), vakum veya modifiye atmosfer ambalajlama, su banyosunda veya konveksiyonlu buhar fırınında kontrollü sıcaklık ve zaman koşullarında ısıl işlem ve servis olmak üzere beş aşamadan oluşmaktadır. SV ürünler ısıl işlemden hemen sonra servis edilebilmekte, ambalajında 0–3 °C sıcaklığa kadar soğutulabilmekte, buzdolabında saklanabilmekte ve tüketimden önce ısıtılabilir (Latoch ve ark., 2023).

Dünya çapındaki büyük şeflerin sırrı olarak kanıtlanmış bu yöntem, taze ürüne benzer özelliklere sahip ve kaliteli işlenmiş gıdalara yönelik artan müşteri talebinin bir sonucu olarak kullanılmaktadır (Zavadlav ve ark., 2020).



Resim 1. Sous Vide Cihazı ve Tavuk Pişirmede Kullanımı

2. Sous-Vide Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

McGuckian, 1968 yılında Güney Carolina'daki Greenville Hospital System' de pişirilen yemeklerin kalitesinin artırılması ve üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla, gıdaları plastik torbalar içerisinde vakumlanarak kontrollü sıcaklıktaki su banyosunda pişirmiştir. Gıdaların daha üstün duyuşal özelliklerin yanı sıra aynı zamanda ürünlerin raf ömrünü de uzattığını ortaya koymuştur. McGuckian, elde ettiği bulguları 1969 yılında Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly dergisinde yayımlamıştır (Rooney, 2022).

Bruno Goussault ve Georges Pralus, su banyosunda düşük sıcaklıkta pişirme yönteminin gastronomi alanındaki ilk önemli uygulamalarını gerçekleştirmiştir. Goussault, 1971 yılında rosto bifteğin yumuşaklığını artırmak, Pralus ise 1974 yılında kaz ciğerinin yağ kaybını azaltmak ve yapısal bütünlüğünü korumak amacıyla daldırma pişirme yöntemini uygulamıştır. Bu iki araştırmacı ve şef, günümüzde "Sous Vide" olarak bilinen yöntemi geliştirmişler; vakum paketlenme ve kontrollü sıcaklıkta pişirme esasına dayanan modern ekipman ve tekniklerin standardizasyonunda önemli rol oynamışlardır (Rooney 2022; Kathuria ve ark., 2022).

1970'lerde, Birleşik Krallık'taki Oxford Üniversitesi'nde Macar fizik Profesörü Nicholas Kurti ve Fransız fizikokimyacı Herve, Nobel Fizik Ödülü sahibi Pierre Gilles de Gennes de dahil olmak üzere bir grup bilim adamı, profesyonel şef ekibi kurarak yemek pişirme üzerine çalışmalar başlatmışlardır. 1970'lerde tanıtılan SV tekniği, gıda maddesini su banyosuna veya buhar

ortamına daldırarak et pişirme yönteminde devrim yaratmıştır. Bu teknik ile eşit ısı dağılımı sağlanırken, lezzet kaybı önlenmiştir. Geleneksel pişirme tekniklerinden farklı olan bu yöntem, etin hücresel yapısını koruyarak dokusal ve nem tutma özelliklerini geliştirmiştir. SV gibi gelişmiş pişirme yöntemleri sayesinde, lezzet, doku ve besin bütünlüğü arasında uyumlu bir denge sağlanmıştır (Misu ve ark., 2024).

Bu çalışmalar, 1988'de moleküler gastronomi kavramının ortaya atılmasına yol açmıştır. Daha sonra, catering firmalarında (gıda fabrikaları, restoranlar), fast food sektöründe ve süpermarketlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. SV, özel termal işleme biçimi sayesinde, soğuk veya dondurarak depolama sonrasında yeniden ısıtıldığında bile gıda kalitesi korunabilmektedir. Son 20 yılda, SV üzerine yapılan çalışmalar; gıda güvenliği, depolama süresi, kalite iyileştirme, besin maddeleri üzerindeki etkiler, besin biyoyararlanımı ve çeşitli diğer teknik yaklaşımlar gibi çeşitli araştırma alanlarını kapsamaktadır (Cui ve ark., 2021).

Gıda bilimcileri, 1990'lı yıllardan itibaren SV işleme yöntemini aktif biçimde incelemekte ve özellikle minimum düzeyde işlenmiş gıdaların raf ömrünün uzatılmasına yönelik kullanımına odaklanmaktadır. Öte yandan, dünyanın önde gelen restoranlarında görev yapan şefler bu yöntemi 1970'li yıllardan bu yana kullanmakla birlikte, SV tekniğinin geniş kitleler tarafından tanınması 2000'li yılların ortalarını bulmuştur. 2000'li yılların sonları ile 2010'lu yılların başlarında ise hem restoranlarda hem de ev mutfaklarında SV pişirme yönteminin kullanımında belirgin bir artış yaşanmıştır (Baldwin, 2012).

Bu yöntem, gıda maddelerinin hava geçirmez şekilde kapatılmış, ısıya dayanıklı vakum poşetleri içinde, kontrollü sıcaklık (65–95 °C) ve süre (1–7 saat) koşullarında pişirilmesini içermektedir. Ayrıca, bu teknik aerobik bakterilerin gelişimini azaltır ve dondurulmuş gıdaların yeniden kontaminasyonunu önlemede oldukça etkilidir, bu da ürünlerin depolama sırasında raf ömrünü uzatmaktadır (Kathuria ve ark., 2022). SV pişirme, vakum paketlenmiş gıdaların düşük kontrollü bir sıcaklıkta uzun süre ısıtılması olarak bilinmektedir. SV tekniği, işlenmiş et ürünlerinin lezzetini, özellikle yumuşaklığını, sululuğunu ve aromasını iyileştirmek için kullanılan termal işlem olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, nispeten düşük pişirme sıcaklığına rağmen, SV pişirmenin depolama sırasında etin mikrobiyal güvenliği üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir (Noh ve ark., 2023). Gıdalar kapalı bir torbada pişirildiği için aromayı korumak ve daha sulu yiyecekler elde etmek, besin kalitesini artırmak ve yumuşaklığı ve duyu parametreleri iyileştirmek mümkündür. Bu işlem genellikle daha geleneksel pişirme yöntemlerine göre daha uzun sürmektedir (Romeo ve ark., 2024).

SV pişirme, yemeye hazır ürünler üretme yöntemlerinden biridir. Gıda sektöründe, özellikle yemek servisi, catering hizmeti ve restoranlarda, tüketici tercihlerini artırmak amacıyla çeşitli gıdalara uygulanmaktadır. Bu pişirme yönteminde, çiğ gıda ısıya dayanıklı ve gıda sınıfı plastik bir poşete vakumla kapatılır ve daha sonra hassas bir şekilde kontrol edilen sıcaklık ve süre altında su banyosunda pişirilmektedir. Geleneksel pişirme yöntemine kıyasla, SV pişirme, daha homojen et kalitesi özellikleri oluşturabilmekte ve çeşitli et türlerinde organoleptik özellikleri iyileştirebilmektedir (Park ve ark., 2020).

Mutfak teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yüksek kaliteli gıdaların besin değerinin korunması, mikrobiyolojik güvenlik ve hammaddelerin sürdürülebilir kullanımı bakımından hassas ısıl işlem yöntemleri daha fazla önem kazanmaktadır. SV yönteminin genellikle daha fazla miktarda vitamin (özellikle C vitamini), fenolik bileşik ve mineralin korunmasına olanak sağladığını ve bunun sonucunda daha yüksek besin değerine ve biyoaktif bileşenlerin biyoyararlanımına sahip ürünler elde edildiği ifade edilmiştir. Vakum ortamında kontrollü, düşük bir sıcaklığın korunması, su ve uçucu bileşen kaybını azaltır; bu da işlem veriminin yanı sıra sebzelerin rengi, dokusu ve aroması üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. SV yöntemi, ürünün sindirilebilirliğini artırırken, doğal görünümünü korumaktadır. Hava geçirmez ambalajı ve sınırlı oksijen erişimi sayesinde, bu yöntem iyi mikrobiyolojik kalite sağlamakta ve ürünün raf ömrünü uzatmaktadır (Głuchowski, ve ark., 2026).

SV pişirme, genellikle lezzeti artırmak ve raf ömrünü uzatmak için kullanılan güvenli bir yöntem olarak kabul edilmekte olup gıda kaynaklı hastalıkların olasılığı her zaman bulunmaktadır. Bu teknik, gıdaların baharat da içerebilen ısıya dayanıklı vakumlu poşetler içinde, uzun süre kontrollü orta sıcaklıklarda pişirilmesine dayanmaktadır. SV pişirme sıcaklığı 50 °C ile 100 °C arasında değişmekte olup, işlem süresi genellikle 1 ila 7 saat (etin büyüklüğüne ve özel tariflere bağlı olarak 48 saat) sürebilmektedir. Uzun süreli kontrollü pişirme yaklaşımı, geleneksel pişirme yöntemlerine göre gıdanın raf ömrünü etkili bir şekilde uzatan bir tür pastörizasyon olarak kabul edilebilir (Jang ve ark., 2025).

3. Sous-Vide Yöntemiyle İlgili Çalışmalar ve Uygulamalar

SV yöntemi et, balık, tavuk, sebze ve hazır yemek ürünlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar yöntemin farklı ürün gruplarında kalite özellikleri üzerine olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir.

SV pişirme yöntemiyle üretilen yüksek kaliteli ürünler, minimum işlenmiş yüksek kaliteli ürün talebini karşılamaktadır (Jiang ve ark., 2025).

SV yöntemi, kabak, patates, kuşkonmaz, havuç, pancar, maydanoz kökü, kereviz, yeşil bezelye, fasulye, kırmızı mercimek, brokoli, Brüksel lahanası,

karnabahar, balkabağı, enginar, mor patlıcan, ıspanak, kara lahana, beyaz lahana, kırmızı lahana, rezene, soğan, yaban havucu, şalgam, kereviz kökü ve hindiba gibi sebzelere uygulanmıştır (Głuchowski ve ark., 2026).

Muraro ve ark., (2026), endüstriyel ölçekte uygulanan su içinde daldırma SV tekniğinin, marine edilmiş tavuk göğsü filetosunun teknolojik ve mikrobiyolojik kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar örnekleri; 45 gün buzdolabı ($\leq 3^{\circ}\text{C}$) koşullarında muhafaza ederek fizikokimyasal bileşim, doku profili ve stabilite açısından değerlendirmişlerdir. Mikrobiyolojik analizlere göre depolama süresince *Salmonella* spp.'nin tespit edilmediğini ve *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus* ve *Listeria monocytogenes*'in tespit edilemeyen seviyelerinin yasal sınırlara uygun olduğu ifade edilmiştir (Muraro ve ark., 2026).

SV, tavuk göğsünün yumuşaklığını ve sululuğunu artırmak için kullanılan bir pişirme yöntemidir. Yapılan bir çalışmada kas içi bağ dokusunun kolajen denatürasyon sıcaklığına bağlı olarak, SV pişirme koşullarının tavuk göğsü ve butlarının fizikokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Araştırmacılar; tavuk göğsü ve butları farklı SV pişirme koşulunda (55°C 'de 3/6 saat ve 65°C 'de 3/6 saat) ve kontrol olarak 75°C 'de (iç sıcaklık 71°C) geleneksel pişirme yönteminde pişirmiştir. Araştırma sonucuna göre; SV pişirme koşulları arasında pH ve parlaklık açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır. Nem içeriği, pişirme kaybı, protein çözünürlüğü, kesme kuvveti, miyofibril parçalanma indeksi ve lipid oksidasyonu SV pişirme koşullarından etkilenmiştir. 55°C 'de SV pişirme, 65°C 'de SV pişirmeye göre daha yüksek nem içeriğiyle pişirme kaybını azaltabilir. Su tutma kapasitesi ve kesme kuvveti üzerindeki sonuçlar, iki farklı sıcaklıkta hem tavuk göğsü hem de but için benzer şekilde gözlemlenmiştir (Noh ve ark., 2023).

Yapılan bir çalışmada; tavuk göğsüne uygulanan iki aşamalı SV işleminin, tek sıcaklıkta uygulanan SV işlemine kıyasla ürün kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. 50 ve 60°C 'de gerçekleştirilen iki aşamalı SV uygulaması sonucunda daha iyi tekstürel özellikler, daha düşük pişirme kaybı, kontrol edilebilir kırmızılık değerleri ve daha düşük lipid oksidasyonu elde edilmiştir. Ayrıca iki aşamalı SV yönteminde tavuk göğsünün toplam çözünür protein içeriğinin, tek aşamalı SV yöntemine göre önemli düzeyde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Hasani ve ark.,2022).

Song ve ark., (2023), 4°C 'de soğutulmuş ve 4 hafta süresince tuz oranı azaltılmış tavuk göğsü jambonlarını SV yöntemiyle pişirerek genel kalite özelliklerini ve raf ömrünü değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar geleneksel pişirmeyi, iç sıcaklık 71°C 'ye ulaşana kadar 80°C 'de, SV pişirmeyi ise 2 saat boyunca 60°C 'de gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, tuz oranı azaltılmış ve SV

yöntemiyle pişirilmiş tavuk göğsü jambonunun sululuk ve yumuşaklık duyuşal puanları, normal tuz ve geleneksel yöntemle pişirilmiş tavuk göğsü jambonunun puanlarına benzer bulunmuştur. Tuz oranı azaltılmış ve SV yöntemiyle pişirilmiş tavuk göğsü jambonunda, 4 haftalık buzdolabında saklama süresi boyunca lipid oksidasyonu ve mikrobiyal güvenlik üzerinde olumsuz bir etki tespit edilmemiştir. Sonuç olarak SV pişirme yönteminin, raf ömrü üzerinde olumsuz bir etki yaratmadan tavuk göğsü jambonunun su tutma kapasitesini ve dokusunu iyileştirmek için pratik bir ısıl işlem olabileceği ifade edilmiştir (Song ve ark., 2023).

Sığır etinin yumuşaklığını ve yeme kalitesini artırmak için, yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak bromelain uygulamasıyla birleştirilmiş SV pişirme sürecinin optimize edildiği bir çalışmada, geleneksel pişirme kontrol grubu olarak kullanılırken, SV pişirme ve bromelain uygulamasıyla birleştirilmiş SV pişirme (SV + Bro) deney gruplarını oluşturmuştur. Araştırmada sığır eti kalitesi, kesme kuvveti, pişirme kaybı, doku profili ve renk farkı ölçülerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, optimum koşulların 250 U/mL bromelain, 65 °C SV pişirme sıcaklığı ve 120 dakika SV pişirme süresi olduğunu göstermiştir. Kontrole kıyasla, SV + Bro, kesme kuvvetini %37,710, pişirme kaybını %12,342 oranında azaltmış ve hareketsizleştirilmiş suyu ve miyofibril parçalanma indeksini artırmıştır (Huang ve ark., 2026).

Alfaifi ve ark., (2026) yaptıkları çalışmada, deve etinin pişirilmesinde ohmik ısıtma (O) ile SV yöntemini birleştiren hibrit O-SV sistemi incelemiştir. Sonuçlar, O-SV yönteminin geleneksel SV' ye göre daha düşük enerji tüketimi sağladığını ve enerji verimliliğini artırdığını göstermiştir; buna karşın sıcaklık ve pişirme süresi arttıkça enerji tüketimi yükselmiş, pişirme verimi ise azalmıştır. Ayrıca pH değerinin sıcaklık ve süreyle arttığı, ışıklık ve kırmızılığın azaldığı, sarılığın ise yükseldiği belirlenmiştir. Genel olarak araştırma, O-SV sisteminin deve eti için enerji tasarrufu sağlayan ve fiziksel kaliteyi koruyabilen sürdürülebilir bir pişirme alternatifi olduğunu ortaya koymuştur (Alfaifi ve ark., 2026).

Yapılan bir çalışmada; çilek bazlı marine işleminin, aynı SV koşulları altında işlenmiş kümes hayvanı ve sığır etlerinin fizikokimyasal, mikrobiyolojik, mikroyapısal ve duyuşal özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Araştırmada tüm örnekler için SV sıcaklığı ve süresi sabit tutulduğundan, işlemler arasındaki gözlemlenen farklılıklar, pişirme yönteminin kendisinden ziyade öncelikle marinade çilek bulunmasıyla açıklanmıştır. Çilek ilavesi, pH'ı düşürmeye, mikrobiyal güvenliği artırmaya, oksidatif stabiliteyi iyileştirmeye ve özellikle renk ve lezzet açısından olumlu duyuşal özelliklere katkıda bulunmuştur. Çilek marine edilmiş örneklerde mikro yapı, daha kompakt ve homojen kas liflerini göstermiş bu durum da iyileştirilmiş doku yapısıyla

ilişkilendirilmiştir. SV teknolojisi genellikle pişirme kayıplarının azalması ve işlem verimliliği ile ilişkilendirilse de bu çalışmada enerji tüketimi doğrudan ölçülmemiş veya ekonomik bir değerlendirme yapılmamıştır. Bulgulara göre çalışma geniş endüstriyel veya ekonomik avantajlara göre, kontrollü SV koşulları altında çilek bazlı marinenin teknolojik ve kalite ile ilgili faydaları belirlenmiştir (Yerlikaya ve ark., 2026).

SV pişirme ile geleneksel yüksek sıcaklıkta pişirme yöntemlerinin, sarı yüzgeçli ton balığının (*Thunnus albacares*) kalite özellikleri, protein yapısı, mikro yapısı ve uçucu aroma bileşiklerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, bu yöntemlerin ürün kalitesi üzerindeki farklı etkileri ortaya konmuştur. Bulgulara göre, SV işlem gruplarında (55 °C, 60 °C ve 65 °C), pişirme kaybı, sertlik ve çiğnenebilirlik azaltırken; ürünün elastikiyeti, yapışkanlığı ve rengi önemli ölçüde korunmuştur. Buna karşılık, geleneksel yüksek sıcaklıkta pişirme yöntemi, proteinlerin ikincil ve üçüncül yapılarında değişime neden olarak kas liflerinde kasılmaya, doku bütünlüğünün bozulmasına ve iç nem kaybına yol açmıştır. Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi analizleri, 55 °C’de uygulanan SV işleminde birincil koku bileşiklerinin konsantrasyonunun en düşük seviyede olduğunu göstermiştir. Bu durum, istenmeyen koku bileşiklerinin oluşumunu azaltarak aroma profilinin olumlu yönde gelişmesine katkı sağlamıştır. Araştırmacılar, SV pişirme teknolojisinin sarı yüzgeçli ton balığında hem doku özelliklerini hem de aroma profilini etkili bir şekilde iyileştirdiğini tespit etmişlerdir (Yuan ve ark., 2025).

Yang ve ark., (2023), yaptıkları bir çalışmada; farklı buharla işleme yöntemlerinin Tilapia filetosunun fizikokimyasal, dokusal ve lezzet özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacılar geleneksel yüksek sıcaklıkta buhar işleme yöntemiyle karşılaştırıldığında, SV tekniğinin kullanımı ile daha homojen ve kompakt bir mikro yapıya sahip Tilapia filetosu elde etmişlerdir. Ayrıca balık etinin doku yapısına verilen hasarı en aza indirmiş ve daha fazla esneklik, sertlik ve dayanıklılık özelliklerine sahip filetolar elde edilmiştir. Bu yöntem ile filetoların besin değerleri daha fazla korunarak iyi bir tüketim kalitesini sağlamış, lipid oksidasyonu azalmış ve α -heliks içeriği artırmıştır (Yang ve ark., 2023).

Özer ve Tepe (2019) haşlama, buhar ve SV pişirme teknikleri kullanarak havucun antioksidan aktivite, toplam fenolik madde ve β -karoten analizleri yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar; antioksidan aktivite ve toplam fenolik madde içeriği uygulanan tüm pişirme teknikleri ile azaldığını, β -karoten miktarının arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca haşlama ile karşılaştırıldığında, SV tekniğinin antioksidan aktivite ve toplam fenolik madde içeriğinde daha az kayba neden olduğunu ifade etmişlerdir.

4. Sous-Vide Tekniğinin Avantajları ve Sınırlamaları

SV tekniğinin farklı kullanım alanlarındaki avantajları ve sınırlamaları değerlendirildiğinde, evsel kullanımda bu yöntemin başlıca üstünlüklerinin geliştirilmiş lezzet ve doku, besin öğelerinin korunumu, gıda güvenliğinin sağlanması, kullanım kolaylığı ve homojen pişirme olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca uygulanan kontrollü ısı, et proteinlerinde belirli biyokimyasal dönüşümleri tetikleyerek ürünün yapısal ve fonksiyonel özelliklerini iyileştirmektedir. Protein denatürasyonu ile birlikte su tutma kapasitesi ve doku özellikleri yeniden şekillenmekte, bu da nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu süreçte bağ dokusunun temel bileşeni olan kolajen, kontrollü sıcaklık etkisiyle çözünerek daha yumuşak bir yapı oluştururken; miyozin ve aktin gibi miyofibriller proteinler büzülerek et dokusunun yeniden organize olmasına katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda sarkoplazmik proteinlerin jel benzeri yapılar oluşturması, et matrisinin bütünlüğünü destekleyerek daha stabil ve arzu edilen bir doku oluşmaktadır. Sıcaklık artışıyla birlikte özellikle miyozin proteininde fonksiyonel grupların açığa çıkması, moleküller arası etkileşimleri artırmakta; hidrofobik etkileşimler, hidrojen bağları, disülfid bağları ve iyonik bağlar gibi kuvvetler aracılığıyla üç boyutlu bir protein ağı oluşmaktadır. Bu yapı, ürünün tekstürel özelliklerinin gelişmesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca pişirilmiş gıdaların vakumlu poşetlerde saklanması, yeniden kontaminasyonu önlemek için uygundur.

Gastronomik kullanım açısından değerlendirildiğinde ise porsiyonlar arasında tutarlı kalite sağlanması, mutfak yaratıcılığı ve inovasyonun desteklenmesi, hazırlık sürecinde verimlilik, ürünlerin raf ömrünün uzaması ve gıda israfının azaltılması temel avantajlar arasında yer almaktadır. Buna karşın, ekipman için başlangıç maliyetinin yüksek olması, ekipman için gerekli alan ihtiyacı, pişirme sürecinin yavaş ilerlemesi, istenen dokuya ulaşmak için ek işlem adımlarının gerekebilmesi ve personel eğitimi ihtiyacı bu kullanım alanındaki başlıca sınırlamalardır.

Endüstriyel ölçekte ise bu tekniğin, büyük partilerde homojen pişirme imkânı sunması, gıda güvenliğini artırması, ürün raf ömrünü uzatması, yüksek kaliteli hazır yemek üretimine olanak tanınması ve üretimde ölçeklenebilirlik sağlaması açısından avantajlıdır. Bununla birlikte, yüksek ekipman yatırımı gereksinimi, geniş alan ihtiyacı, plastik kullanımının çevresel etkileri, personelin özel eğitim gereksinimi ve büyük ölçekli üretimde artan enerji tüketimi bu yöntemin endüstriyel uygulamalardaki temel sınırlamaları olarak değerlendirilmektedir (Misu ve ark., 2024; Latoch ve ark., 2023; Yadav ve ark., 2025; Zavadlav ve ark., 2020).

SV işleme yöntemi ile gıdalarda risk oluşturan mikroorganizmalar dört grupta değerlendirilmektedir. İlk kategoriye *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Vibrio*, *Staphylococcus aureus* ve *Campylobacter* gibi soğutma sıcaklıklarında üreyemeyen vejetatif bakteriler oluşturmaktadır. Bu bakteriler çoğunlukla pastörizasyon ile etkisiz hale getirilmektedir. İkinci kategori *Listeria monocytogenes*, *Yersinia* ve *Aeromonas* gibi soğutma sıcaklıklarında üreyebilen ve çoğalabilen vejetatif bakterileri içermektedir. Bu bakterilerin çoğu pastörizasyon sıcaklıklarına duyarlıdır, ancak bazı hücreler hafif ısı işlemine dayanabilmektedir. Üçüncü grup ise pastörizasyon işlemlerinden etkilenmeyen ve sonrasında düşük depolama sıcaklıklarında üreyebilen ve çoğalabilen psikrotrofik spor oluşturan patojenik bakteriler gelmektedir. Bunlar arasında proteolitik olmayan *Clostridium botulinum*, Enterotoksijenik *E. coli* ve spor oluşturan, psikrotrofik *Bacillus cereus* bulunmaktadır. Son olarak, pastörizasyon işlemlerinden etkilenmeyen ancak soğutma sıcaklıklarında büyüyüp üreyemeyen mezofilik spor oluşturan proteolitik *Clostridium botulinum*, mezofilik *B. cereus* ve *Clostridium perfringens* bulunmaktadır (Kilibarda ve ark., 2018).

5. Sonuç

Son yıllarda, SV veya vakumlu pişirme, dünya çapında hem gıda endüstrileri hem de restoranlar tarafından yiyecek ve içecek hazırlamak için kullanılmaktadır. SV, geleneksel pişirme yöntemlerinin daha besleyici ve daha sağlıklı bir yöntemle dönüşmüş hâli olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin, gıdaların kalitesini, rengini, lezzetini ve besin değerini korumak ve geliştirmek amacıyla ısıtma sıcaklığı ve süresinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gibi avantajları bulunmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar, SV tekniğinin et ve sebze ürünlerinde su tutma kapasitesini artırdığını, pişirme kayıplarını azalttığını ve homojen kalite özellikleri sağladığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, marine uygulamaları, enzim kullanımı ve hibrit pişirme sistemleri gibi yaklaşımlar, yöntemin etkinliğini daha da artırabilmektedir. Özellikle endüstriyel ölçekte uygulamalarda, ürün kalitesinin standardizasyonu, raf ömrünün uzatılması ve üretim verimliliğinin artırılması açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Buna karşın, yüksek ekipman maliyeti, uzun işlem süreleri, enerji tüketimi ve plastik ambalaj kullanımına bağlı çevresel etkiler, yöntemin başlıca sınırlamaları arasında yer almaktadır. Tüm bu yönleriyle değerlendirildiğinde, gıda kalitesi, güvenliği ve sürdürülebilir üretim hedefleri açısından önemli bir alternatif işleme yöntemi olarak öne çıkmakta olup, gelecekte farklı ürün gruplarında ve yenilikçi uygulamalarla kullanımının daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Referanslar

- Alfaifi, B., Othman, M., Hobani, A., Suliman, G., Elamin, W., Ibrahim, M., & Fulleros, R. B. (2026). Improving Energy Efficiency and Physical Quality of Camel (*Camelus dromedarius*) Meat Using a Hybrid Ohmic–Sous Vide Cooking Method. *Journal of Food Process Engineering*, 49(2), e70358. <https://doi.org/10.1111/jfpe.70358>
- Baldwin, D. E. (2012). Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1(1), 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2011.11.002>
- Chotigavin, N., Kerr, W. L., Klaypradit, W., & Kerdpi boon, S. (2023). Novel sous-vide pressure technique affecting properties of local beef muscle. *LWT*, 175, 114439. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114439>
- Cui, Z., Yan, H., Manoli, T., Mo, H., Bi, J., & Zhang, H. (2021). Advantages and challenges of sous vide cooking. *Food Science and Technology Research*, 27(1), 25-34. <https://doi.org/10.3136/fstr.27.25>
- Głuchowski, A., Czarniecka-Skubina, E., & Pielak, M. (2026). Effect of the Sous-Vide Method on the Quality of Vegetables—A Review. *Foods*, 15(2), 206. <https://doi.org/10.3390/foods15020206>
- Gokoglu, N. (2025). A novel cooking technique for seafood: Sous vide. *Advances in Food and Nutrition Research*, 118, 265-303. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2025.07.006>
- Hasani, E., Csehi, B., Darnay, L., Ladányi, M., Dalmadi, I., & Kenesei, G. (2022). Effect of combination of time and temperature on quality characteristics of sous vide chicken breast. *Foods*, 11(4), 521. <https://doi.org/10.3390/foods11040521>
- Huang, W., Geng, L., Fu, H., Wang, D., Jia, D., Wang, A., ... & Liu, C. (2026). Effect of sous vide cooking combined with bromelain on beef tenderness and eating quality. *Food Chemistry: X*, 33, 103438. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.103438>
- Jang, S., Al-Sharif, Z. T., Onyeaka, H., & Miri, T. (2025). The impact of thermosonication temperature on sous-vide cooking on the survival of *Escherichia coli* in beef steak. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 104, 104061. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104061>
- Jiang, Q., Lv, R., Zhai, P., Wang, X., Li, Y., & Yin, M. (2025). Molecular Mechanisms Underlying Sensory and Chemical Changes in Muscle Foods Induced by Sous-Vide Cooking: A Review. *Foods*, 14(17), 2967. <https://doi.org/10.3390/foods14172967>

- Kathuria, D., Dhiman, A. K., & Attri, S. (2022). Sous vide, a culinary technique for improving quality of food products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, *119*, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.031>
- Kilibarda, N., Brdar, I., Baltic, B., Markovic, V., Mahmutovic, H., Karabasil, N., & Stanisic, S. (2018). The safety and quality of sous vide food. *Scientific journal" Meat Technology"*, *59*(1), 38-45. <https://doi.org/10.18485/meattech.2018.59.1.5>
- Latoch, A., Głuchowski, A., & Czarniecka-Skubina, E. (2023). Sous-vide as an alternative method of cooking to improve the quality of meat: A review. *Foods*, *12*(16), 3110. <https://doi.org/10.3390/foods12163110>
- Muraro, K., Cansian, R. L., Backes, G. T., & Valduga, E. (2026). Sous-Vide Technique as an Alternative to Traditional Cooking Methods for the Technological Quality of Marinated Chicken at Industrial Scale. *Journal of Food Science*, *91*(2), e70912. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70912>
- Misu, G. A., Canja, C. M., Lupu, M., & Matei, F. (2024). Advances and drawbacks of sous-vide technique—A critical review. *Foods*, *13*(14), 2217. <https://doi.org/10.3390/foods13142217>
- Noh, S. W., Song, D. H., Ham, Y. K., Yang, N. E., & Kim, H. W. (2023). Physicochemical properties of chicken breast and thigh as affected by sous-vide cooking conditions. *Foods*, *12*(13), 2592. <https://doi.org/10.3390/foods12132592>
- Özer, Ç., & Tepe, B. (2019). Farklı pişirme tekniklerinin havuç dilimlerinin bazı kimyasal ve biyoaktif özellikleri. *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, *7*(4), 2630-2643. <https://doi.org/10.21325/jotags.2019.491>
- Park, C. H., Lee, B., Oh, E., Kim, Y. S., & Choi, Y. M. (2020). Combined effects of sous-vide cooking conditions on meat and sensory quality characteristics of chicken breast meat. *Poultry Science*, *99*(6), 3286-3291. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.03.004>
- Romeo, M., Lavilla, M., & Amárita, F. (2024). Microbial food safety of sous vide cooking processes of chicken and eggs. *Foods*, *13*(19), 3187. <https://doi.org/10.3390/foods13193187>
- Rooney B., (2022). Everything You Need To Know About Sous Vide. Cook. <https://www.tastingtable.com/1144823/everything-you-need-to-know-about-sous-vide/>
- Song, D. H., Yang, N. E., Seomoon, K. M., Jang, I. S., Chin, K. B., & Kim, H. W. (2023). Sous-vide cooking as a practical strategy to improve quality attributes and shelf stability of reduced-salt chicken breast ham. *Poultry Science*, *102*(3), 102444. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102444>

- Yadav, K. K., Mehta, N. K., Sharma, S., Bhajan, S., Kulshrestha, T., Gaurav, K., ... & pal Yadav, R. (2025). Advances in sous-vide technology for meat processing: a comprehensive overview. *Journal of Agriculture and Food Research*, 102257. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102257>
- Yang, L., Li, Z., Xie, T., Feng, J., Xu, X., Zhao, Y., & Gao, X. (2023). Effects of sous-vide on quality, structure and flavor characteristics of tilapia fillets. *Molecules*, 28(24), 8075. <https://doi.org/10.3390/molecules28248075>
- Yerlikaya, S., Erdem, N., & Gökmen, S. (2026). Strawberry-enriched marination pre-treatment as a natural strategy to enhance the oxidative stability, tenderness, and microbiological safety of sous vide poultry and bovine meats. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11694-026-04192-2>
- Yuan, X., Li, D., Shi, P., Wu, J., Dai, Z., Dong, X., & Lu, Y. (2025). Effect of sous vide cooking technology on the quality, protein structure, microstructure, and flavor of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Food Chemistry*, 484, 144423. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144423>
- Zavadlav, S., Blažić, M., Van de Velde, F., Vignatti, C., Fenoglio, C., Piagentini, A. M., ... & Putnik, P. (2020). Sous-vide as a technique for preparing healthy and high-quality vegetable and seafood products. *Foods*, 9(11), 1537. <https://doi.org/10.3390/foods9111537>

2. Bölüm

Türkçe Duygu Analizinde Orijinal Veri ve Farklı Çeviri Paradigmalarının Rolü: Geleneksel Derin Öğrenmeden Büyük Dil Modellerine Kapsamlı Bir Analiz

Yunus Emre ASLAN¹, Fatih KAYAALP²

ÖZET

Günümüzde dijital platformlardan toplanan metin verilerinin anlamlandırılması işletmelerin stratejik kararları için büyük önem taşımaktadır. Doğal dil işleme (NLP) ve duygu analizi bu verilerin işlenmesinde çok güçlü araçlar olsa da Türkçe gibi sondan eklemeli ve morfolojik açıdan zengin olan dillerin yapısal zorlukları ve bununla beraber mevcut algoritmaların çoğunlukla İngilizce veriler üzerinde eğitilmiş olması araştırmacıları metin çevirisine dayalı veri dönüştürme yöntemlerine yöneltmektedir. Bu çalışmanın amacı farklı analiz mimarilerinin orijinal Türkçe veri ve bundan elde edilen makine çevirisi (Google Translate) ve üretken yapay zeka (Gemini) çevirisinden elde edilen İngilizce verilere duygu analizi performansı açısından nasıl tepkiler verdiğini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Bu çalışma kapsamında yapısal karmaşıklıkları ve uzunlukları farklı olan iki veri kümesi (sinema eleştirileri ve e-ticaret müşteri yorumları) üzerinde Bi-LSTM, dönüştürü tabanlı yöntemler (mBERT, XLM-ROBERTa, BERTurk, Tr. ELECTRA) ve Büyük Dil Modelleri (Mistral-7B, LLaMA-3) dâhil olmak üzere geniş bir yelpazede analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında çok dilli transformer modellerinin ve LLM'lerin genel performansının Gemini çevirisiyle yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunun yanında doğrudan Türkçe derlem ile eğitilmiş modellerle kısa metinli e-ticaret veri setindeki LLaMA-3 mimarisi, en yüksek skoru orijinal Türkçe veriler üzerinde elde etmiştir. Araştırma bulguları, spesifik veri setleri üzerinde Türkçe derleme eğitilmiş modellerin çeviri işlemine ihtiyaç duymadan yüksek rekabet gücü sunduğunu; çevirinin kullanıldığı durumlarda metin uzunluğu ve yapısal karmaşıklığın performansa katkısını doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Büyük Dil Modelleri (LLM), Doğal Dil İşleme, Duygu Analizi, Makine Çevirisi, Üretken Yapay Zeka.*

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Düzce Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Düzce/Türkiye. ORCID: 0009-0003-6747-4083

² Doç.Dr., Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce/Türkiye. ORCID: 0000-0002-8752-3335

1. Giriş

Günümüz dünyasında işletmelerin ürünlerini ve marka kimliklerini internet ekosisteminde konumlandırmaları temel bir ihtiyaç haline gelmiştir. Tüketicilerin ürünlere ve şirketlerin sosyal medya hesaplarına yaptıkları yorumlar çok değerli veri kaynaklarıdır ve işletmelerin stratejik karar alma süreçlerinde etkin bir rol oynamaktadır. Gerek sosyal medya üzerinden gerekse e-ticaret sitelerinden toplanan bu yorumlar, hem tüketici davranışını ve memnuniyetini ölçmek hem de işletmelerin hedef kitleleriyle doğru iletişim kurup kurmadığını değerlendirmek için kullanılabilir. Yönetim Bilişim Sistemleri (YBS) açısından bakıldığında, yığınlar halindeki bu yapılandırılmamış metin verilerinin işlenerek anlamlı bilgiye dönüştürülmesi, ancak doğal dil işleme (NLP) ve duygu analizi yöntemleriyle mümkün olabilmektedir [1].

Duygu analizi, metinlerin kutupluluğunu (olumlu veya olumsuz) analiz etmede oldukça başarılı sonuçlar verebilse de; Türkçe gibi sondan eklemeli, morfolojik olarak zengin ve İngilizceye kıyasla daha az kaynakla eğitilmiş dillerde çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Bu kısıtlar, araştırmacıları metin çevirisine dayalı veri dönüştürme yöntemlerine yöneltmektedir. Geleneksel makine çevirisi yöntemleri bazı koşullarda cümlenin tam anlamını yakalamakta yetersiz kalabilse de, son yıllarda büyük dil modellerinin ve üretken yapay zekanın (Generative AI) yükselişi metin çevirisi paradigmasını köklü bir şekilde değiştirmiştir. Yeni nesil modeller, kelimeleri birebir çevirmek yerine cümlenin ardındaki semantik anlamı ve duygusal tonu hedef dile başarıyla aktarabilmektedir [2].

Bu çalışmanın temel amacı; farklı analiz mimarilerinin Orijinal Türkçe veri kümesi ile bu veriden elde edilen makine çevirisi ve üretken yapay zeka çevirilerine nasıl tepki verdiğini duygu analizi performans farklılıkları üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemektir. Çalışma kapsamında birbirinden farklı mimarilere sahip geniş bir model yelpazesi kullanılmıştır. Çift yönlü bağlamı yakalayan geleneksel derin öğrenme mimarisi Bi-LSTM, maskelenmiş dil modellemesi yapan Transformer tabanlı mBERT ve XLM-ROBERTa, Türkçe için özel eğitilmiş yerel modeller BERTurk ve Tr.Electra, en güncel Büyük Dil Modellerini (LLM) temsil eden Mistral-7B ile LLaMA-3 bu üç farklı veri formatı üzerinde test edilmiştir. Bu analizleri gerçekleştirebilmek için Kaggle platformundan elde edilen iki farklı veri kümesi (sinema eleştirileri ve e-ticaret müşteri yorumları) kullanılmıştır. Araştırmada çeviri paradigmasının modellere etkisini ölçmenin yanı sıra, çeşitli sekans uzunluklarının (max_len) model başarımına etkileri de incelenmiştir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde duygu analizi ve dil modelleri üzerine ilgili literatür sunulmuştur.

Üçüncü bölümde veri kümeleri ve uygulanan metodoloji anlatılmıştır. Dördüncü bölümde analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiş, beşinci bölümde ise sonuçlar tartışılarak gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK ÇERÇEVE

Duygu analizi ve metin sınıflandırma alanındaki akademik literatür, makine öğrenmesi algoritmalarından başlayarak derin öğrenme mimarilerine ve en nihayetinde Büyük Dil Modellerine (LLM) uzanan dinamik bir gelişim göstermiştir. Bu çalışmanın ana odak noktası, çeşitli sınıflandırma mimarilerinin orijinal Türkçe veri kümeleri üzerindeki etkileri ile farklı çeviri paradigmalarından elde edilen İngilizce veri kümelerinin performans metrikleri üzerindeki yansımalarını incelemektir.

2.1. Geleneksel Derin Öğrenme ve Duygu Analizi

Doğal dil işleme alanında ilk büyük adım, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağlarının literatüre girmesiyle yaşanmıştır [3]. LSTM mimarileri, metin içindeki sıralı bağımlılıkları öğrenmedeki başarısıyla öne çıkmıştır. Literatürdeki çalışmalar, metni her iki yönden okuyarak bağlamı yakalayan çift yönlü Bi-LSTM mimarisinin, tek yönlü analiz yapan standart LSTM ağlarından daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamıştır [4].

2.2. Transformer Mimarileri ve Çok Dilli Modeller

Dikkat mekanizmasına dayalı Transformer mimarilerinin geliştirilmesi, NLP literatüründe dönüm noktasıdır [5]. Özellikle BERT, kelimeleri her iki yönden eşzamanlı okuyarak metin sınıflandırma görevlerine yeni standartlar getirmiştir [6]. mBERT ve XLM-ROBERTa [7] gibi çok dilli modeller, transfer öğrenimi konusunda literatüre büyük katkılar sağlamıştır. Türkçenin morfolojik yapısı nedeniyle doğrudan Türkçe derlem ile eğitilmiş BERTurk ve TrElectra gibi tek dilli modellerin, Türkçe veri kümelerinde daha yüksek sonuçlar verdiği bilinmektedir [8].

2.3. Üretken Yapay Zeka ve Büyük Dil Modelleri (LLM)

Günümüzde NLP araştırmalarının odağı, milyarlarca parametreye sahip Büyük Dil Modellerine (LLM) kaymıştır. Mistral-7B [9] ve Meta tarafından geliştirilen LLaMA-3 [10] gibi modeller, devasa parametre boyutları sayesinde dilin sadece sentaksını değil, aynı zamanda karmaşık anlamsal ilişkilerini ve duygusal tonlarını da başarılı bir şekilde yakalayabilmektedir. Böylesi büyük modellerin metin sınıflandırma çalışmalarında etkin kullanılabilmesi ve donanım kısıtlarının aşılabilmesi için LoRA (Low-Rank Adaptation) gibi PEFT (Parameter-Efficient Fine-Tuning) tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır [11].

2.4. Çeviri Paradigmaları ve Veri Dönüştürme

Türkçe için etiketlenmiş veri kümelerinin İngilizceye kıyasla görece daha az olması ve Türkçe gibi sondan eklemeli bir dilin doğal dil işleme algoritmalarında yarattığı zorluklar, araştırmacıları metin çevirisi yöntemlerine yöneltmiştir. Geleneksel makine çevirisi araçları örneğin Google Translate, kelime ve cümle bazında yüksek doğruluk verse de; deyim, kinaye, gündelik dil ve argo ifadeleri çoğu zaman birebir çevirmekte ve bağlam kaybı yaşayarak yetersiz kalabilmektedir. Son dönemlerde Gemini gibi üretken yapay zeka modelleri, kelime odaklı çeviriden ziyade "cümlelerin bağlamını ve anlamını" çevirme yetenekleriyle öne çıkmış; bu da Türkçeden İngilizceye çeviri yaparken duygusal tonun kayıpsız aktarılmasını sağlamıştır. Literatürdeki güncel çalışmalar, LLM tabanlı veri artırma ve çeviri yöntemlerinin, geleneksel makine çevirisinden kaynaklanan tutarsızlıkları önemli ölçüde azalttığını kanıtlamaktadır. Ayrıca, sondan eklemeli diller üzerine yapılan son araştırmalar, üretken yapay zekanın kinaye ve yerel ifadeleri hedef dile aktarmadaki üstünlüğüne dikkat çekmektedir [12].

2.5. Literatürdeki Boşluk ve Çalışmanın Özgün Değeri

Literatür incelendiğinde; tek dilli ve çok dilli modellerin performanslarını [7], [8] veya metin analizinde çevirinin etkilerini [12] ayrı ayrı inceleyen çalışmalar bulunmasına karşın, farklı çeviri paradigmasının farklı model mimarilerindeki etkisini çaprazlama analiz eden araştırmaların sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu çalışma, sadece Orijinal Türkçe veriyle değil; aynı veriden elde edilen Google Translate ve Gemini çevirilerini, gelenekselden (Bi-LSTM) en güncel (LLaMA-3) uzanan geniş bir model yelpazesinde ve farklı metin uzunluklarında kıyaslayarak literatürdeki bu boşluğu doldurmayı hedeflemektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmanın deneysel süreçlerinde kullanılan veri setlerinin kaynağı ve özellikleri, veri ön işleme ve çeviri işlemleri, sınıflandırma modellerinin mimari yapıları ile eğitim parametreleri detaylandırılmıştır.

3.1. Veri Kümeleri

Çalışma kapsamında, doğal dil işleme modellerinin farklı uzunluktaki metinler üzerindeki performansını ölçmek amacıyla Kaggle platformundan elde edilen iki farklı veri kümesi kullanılmıştır [13], [14]:

- Sinema Eleştirileri (Beyazperde.com): Kullanıcıların filmler hakkındaki detaylı görüşlerini yansıtan, dengeli bir sınıf dağılımına (pozitif/negatif) sahip yaklaşık 10.600 satırdan oluşan veri kümesidir. Aylık 5.5 milyon ziyaretçisi olan beyazperde.com'dan alınan bu sinema eleştirileri, sonrasında

1,2 yıldız olanlar negatif 4 ve 5 yıldız olanlar pozitif olacak şekilde etiketlenmiş bir veri kümesidir.

- E-Ticaret Müşteri Değerlendirmeleri: Farklı çevrimiçi mağazalardan derlenmiş, yapısal olarak sinema eleştirileri veri kümesinden daha kısa ve gündelik yorumlardan oluşan 8.500 satırlık dengeli bir veri kümesidir. Çeşitli E-ticaret sitelerinden toplanmış olup kullanıcıların verdikleri puanlamaya göre etiketlenmiş verilerdir 1,2 yıldız yorumlar olumsuz 4 ve 5 yıldız yorumlar olumlu olacak şekilde etiketlenmiştir.

3.2. Veri Ön İşleme ve Çeviri Süreci

Modellerin eğitim süreçlerindeki başarısını artırmak, verideki gürültüyü temizlemek ve algoritmaların genellebilirlik kapasitesini yükseltmek amacıyla veri kümeleri üzerinde kapsamlı bir ön işleme ardışık düzeni (pipeline) gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte; veri temizleme, tokenizasyon tabanlı metin optimizasyonu, veri seti ayrımı ve metin çevirisi olmak üzere dört temel adım izlenmiştir.

3.3. Veri Temizleme ve Normalizasyon

İlk aşamada veri kümeleri içindeki tekrar eden (mükerrer) satırlar tespit edilerek silinmiştir. Veri kümelerinin kaynağı temelde web platformlarına dayandığı için, yorumların içerdiği HTML biçimlendirme etiketleri (ör. <div>,
,) temizlenmiştir. Modelin vektör uzayında hatalı temsiller oluşturmasını engellemek amacıyla metin içindeki sekme (\t), satır sonu (\n) ve satır başı (\r) gibi görünmez karakterler düzenli ifadeler (Regex) kullanılarak temizlenmiş, kelimeler arasındaki gereksiz boşluklar tek bir boşluğa indirgenmiştir.

3.4. Tokenizasyon ve Uzunluk Optimizasyonu

Sınıflandırma modellerinin girdi (input) katmanını optimize etmek için veri kümelerinin yapısal karakteristikleri istatistiksel olarak incelenmiştir. Transformer mimarilerinde hesaplama maliyetini doğrudan etkileyen maksimum sekans uzunluğu (max_len) hiperparametresini doğru belirleyebilmek için tokenizasyon analizi yapılmıştır. Türkçe gibi sondan eklemeli bir dilde salt kelime sayımı yanıltıcı olabileceğinden, metinler WordPiece algoritması kullanılarak alt sözcüklere ayırılmıştır WordPiece algoritması kelimeleri modelin sözlük yapısına göre kök ve eklere böler bu şekilde modelin daha önce karşılaşmadığı karmaşık türetilmiş kelimeleride tanımasını sağlar bu işlem için Türkçe dil yapısınada uygun olan dbmdz/bert-base-turkish-cased tokenizer'ı kullanılarak gerçek token uzunlukları hesaplanmıştır [6]. Elde edilen analiz

sonuçlarına göre; kısa metinlerden oluşan e-ticaret veri kümesi $max_len = 128$, daha uzun cümleler barındıran sinema eleştirileri ise $max_len = 256$ olarak optimize edilmiştir. Bu işlem sadece verilerin türkçe olarak ortalama kaç token olduğunu bulmak için uygulanmıştır model eğitimleri sırasında (AutoTokenizer.from_pretrained) metodu kullanılmıştır.

3.5. Sınıf Dengesi ve Veri Seti Ayrımı

Modellerin eğitim süreçlerinde veriyi ezberlemesinden (overfitting) kaynaklanabilecek performans dalgalanmalarını ve taraflı (biased) tahminler üretmesini önlemek amacıyla, veri kümeleri %80 eğitim (train) ve %20 test olmak üzere ayrılmıştır. Bu ayırma işlemi gerçekleştirilirken hedef sınıf dengesinin (pozitif/negatif) korunmasına özen gösterilmiş; oluşturulan test veri kümesinin kendi içinde homojen ve dengeli olması sağlanmıştır. Bu doğrultuda, çalışmadaki tüm modeller aynı eğitim setiyle eğitilmiş ve algoritmaların performans metrikleri tamamen aynı train ve test veri setleri üzerinden hesaplanmıştır.

3.6. Çeviri ve Veri Dönüştürme Süreci

Temizlenmiş metinlerin, Türkçe veri kümesi ile İngilizce çevirileri arasındaki performans farklılıklarını ölçmek ve karşılaştırmak amacıyla veriler iki farklı araçla İngilizceye çevrilmiştir:

- Geleneksel Makine Çevirisi (NMT): Standart çeviri mimarisini temsilen, veri kümesindeki tüm yorumlar Google Translate API'si üzerinden İngilizceye aktarılmıştır. Bu araç her ne kadar yaygın ve erişilebilir olsa da, ironi ve kinaye gibi algoritmalar tarafından çözümlenmesi zor olan ifadelerde bağlam kaybı yaşatabilmektedir [15].
- Üretken Yapay Zeka Çevirisi (GenAI): Geleneksel çevirinin limitlerini aşmak ve bağlam kayıplarını minimize etmek amacıyla Gemini-2.5-flash dil modeli kullanılmıştır. Bu süreç, modelin API'si üzerinden tasarlanan otomatize edilmiş bir betik (script) aracılığıyla yürütülmüştür. Üretken yapay zekanın çeviri sırasında halüsinasyon üretmesini ve metne gereksiz eklemeler yapmasını engellemek amacıyla "İstem Mühendisliği" (Prompt Engineering) teknikleri uygulanmıştır. Algoritmaya "uzman bir veri bilimi asistanı" rolü (persona) atanmış ve makine öğrenmesi duygu analizi modellemesi yapılacağı belirtilerek "Orijinal duyguyu (olumlu/olumsuz) ve tonu kesinlikle koru" kısıtı (constraint) sisteme zorunlu (hard-prompt) olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak; aynı ön işleme adımlarından geçmiş tek bir veri kaynağından, 3 farklı formatta (Orijinal Türkçe, Google Translate ve Gemini Translate) paralel veri kümeleri elde edilmiştir.

3.7. Deney Ortamı

Bu çalışmadaki modellerin eğitim süreçleri kaggle'ın bulut ortamında gerçekleştirilmiştir. Donanım altyapısı olarak 32 GB (16+16) NVIDIA Tesla T4 (T4*2) grafik işlem birimi kullanılmıştır. Yazılım ortamında veri işleme ve model eğitimi ve değerlendirme adımlarında Python programlama dili ile PyTorch ve Hugging Face kütüphaneleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde; Orijinal Türkçe, Google Translate ve üretken yapay zeka (Gemini) çevirisi ile oluşturulmuş veri kümeleri üzerinde eğitilen sınıflandırma modellerinin duygu analizi performansları sunulmaktadır. Tablolardaki Doğruluk (Accuracy) sonuçları, modellerin mimari gereksinimlerine ve donanım kısıtlarına göre optimize edilmiş spesifik hiperparametre konfigürasyonları altında elde edilmiştir. Eğitim süreçlerinde Bi-LSTM modeli; 128 boyutlu kelime gömme vektörü, 64 yığın boyutu ve erken durdurma destekli ($lr=0.001$) optimizasyonu ile kurgulanmıştır. Transformer tabanlı modeller (mBERT, XLM-ROBERTa, TrELECTRA, BERTÜRK varyantları) standart olarak 3 Epoch, 16 Batch Size, $3e-5$ Learning Rate (Öğrenme Oranı) ve aşırı öğrenmeyi önlemek amacıyla 0.01 Weight Decay (Ağırlık Sönümlenmesi) parametreleriyle çalıştırılmıştır. Mistral-7B ve LLaMA-3 gibi Büyük Dil Modellerinde (LLM) ise maksimum başarıyı sağlamak için 2 Epoch kullanılmıştır, donanımsal bellek kısıtlarının yönetilmesi ve modeller arasında adil bir kıyaslama olabilmesi için yığın boyutları ve gradyan biriktirme adımları modellere özel olarak ayarlanmıştır LLaMA-3 modelinde cihaz başına düşen yığın boyutu 8 gradyal biriktirme adımı 2 olarak ayarlanmış; Mistral-7B modelinde bellek tüketimi çok daha agresif olduğu için yığın boyutu 4'e düşürülmüş ama gradyal biriktirme adımı 4 olarak belirlenmiştir. Yapılan bu özel ayarlamalar sayesinde her iki modelin ağırlıkları güncellemeden önce işlediği örnek sayısı dengelenmiş olup efektif yığın boyutu 16'da eşitlenmiştir bu sayede iki model arasında daha adil bir kıyaslama sağlanmıştır. Her iki modeldede Düşük Dereceli Uyum (LoRA: $r=16, \alpha=32, \text{dropout}=0.1$) parametreleri aynı şekilde standart olarak uygulanmıştır.

4.1. Sinema Eleştirileri (Beyazperde) Veri Kümesi Bulguları

Görece daha uzun ve karmaşık cümle yapıları barındıran bu veri kümesi, optimum token uzunluğu hesaplanarak veri kümesi için ideal parametre olan

max_len = 256 olarak ayarlanmıştır. Beyazperde veri kümesi üzerinde elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Beyazperde Veri Kümesi Model Performansları (Accuracy - %)

Model Adı	Türkçe	Google Translate	Gemini Translate
Bi-LSTM	% 89,31	% 89,08	% 89,27
mBERT	% 90,29	% 91,56	% 91,60
XLM-ROBERTa	% 91,41	% 92,39	% 93,25
Tr. ELECTRA	% 94,07	% 86,01	% 89,01
BERTurk	% 93,62	% 89,08	% 89,01
LLaMA-3	% 93,21	% 94,90	% 95,65
Mistral-7B	% 88,75	% 93,36	% 95,72

Tablo 1 incelendiğinde; çok dilli (multilingual) Transformer mimarilerinde ve Büyük Dil Modellerinde (LLM), genel performansın Gemini çevirilerinde belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Özellikle Mistral-7B modelinin Orijinal Türkçe veride gösterdiği performans ile Gemini çevirisi arasındaki oran kıyaslandığında, yaklaşık %7'lik devasa bir başarı farkı olduğu tespit edilmiştir. LLaMA-3 modelinde ise bu sıçrama nispeten daha düşük seviyede kalmıştır. Öte yandan, geleneksel derin öğrenme mimarisi olan Bi-LSTM ve doğrudan Türkçe derlem (corpus) ile eğitilmiş olan BERTurk ile Tr. ELECTRA modelleri, çeviriye ihtiyaç duymadan en yüksek başarıyı Orijinal Türkçe veri setinde yakalamıştır.

4.2. E-Ticaret Müşteri Değerlendirmeleri Veri Kümesi Bulguları

Gündelik dille yazılmış, yapısal olarak daha kısa metinler içeren E-ticaret verileri; hem hesaplama maliyetini düşürmek hem de gereksiz boşluk (padding) işlemlerini engellemek için max_len = 128 olarak ayarlanmıştır. İlgili veri kümesine ait deneysel sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. E-Ticaret Veri Kümesi Model Performansları (Accuracy - %)

Model Adı	Türkçe	Google Translate	Gemini Translate
Bi-LSTM	% 88,44	% 89,38	% 89,97
mBERT	% 90,97	% 92,04	% 93,39
XLM-ROBERTa	% 92,51	% 93,21	% 94,22
Tr ELECTRA	% 93,57	% 89,90	% 91,21
BERTurk	% 94,34	% 88,44	% 88,15
Mistral-7B	% 93,34	% 94,99	% 95,46
LLaMA-3	% 95,34	% 95,17	% 94,69

Tablo 2'deki bulgular, kısa metinlerde de üretken yapay zeka çevirisinin (Gemini) genel olarak geleneksel çeviriye göre daha başarılı olduğunu doğrulamaktadır. Ancak çeviri ile orijinal veri arasındaki performans marjı, uzun metinlere kıyasla daha dar bir bantta kalmıştır. Bununla birlikte doğrudan Türkçe için eğitilmiş yerel modeller (BERTurk ve Turkish ELECTRA), e-ticaret verilerinde İngilizce çevirilere gerek bırakmayacak şekilde son derece rekabetçi sonuçlar (sırasıyla %94.34 ve %93.57) sunmuştur. İstisnai bir bulgu olarak, devasa parametrelili LLaMA-3 modelinde, diğer çok dilli modellerin aksine en yüksek doğruluk oranı (%95.34) düşük bir farkla da olsa çevrilmemiş Orijinal Türkçe veri seti üzerinde elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yönetim Bilişim Sistemleri (YBS) perspektifinden bakıldığında, dijital ekosistemlerde kullanıcılar tarafından oluşturulan yapılandırılmamış devasa verilerin anlaşılması, işletmelerin veri odaklı ve çevik stratejiler geliştirmesi için büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, Türkçe metinlerin duygu analizinde sınıflandırma performansını maksimize etmek amacıyla verinin orijinali, geleneksel makine çevirisi ve üretken yapay zeka çevirisi olmak üzere farklı temsilleri oluşturulmuş; algoritmaların bu formatlara verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar; model mimarisi, metin uzunluğu ve çeviri paradigması arasındaki karmaşık ilişkilere dair önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Birincisi; test edilen modellerin genelinde (Orijinal Türkçe < Google Translate < Gemini Translate) şeklinde belirgin bir başarı trendi tespit edilmiştir. Ancak bu durum tüm mimariler için evrensel bir geçerlilik taşımamaktadır. Çok dilli (multilingual) modeller ve İngilizce ağırlıklı Büyük Dil Modelleri (Mistral-7B vb.) performanslarını Gemini çevirileriyle maksimize ederken; doğrudan Türkçe corpus ile eğitilmiş yerel modeller (BERTurk, Tr. ELECTRA) ile e-ticaret veri kümesindeki LLaMA-3 ve sinema veri kümesindeki Bi-LSTM mimarileri, en yüksek sınıflandırma başarılarını çeviri işlemine maruz kalmamış Orijinal Türkçe verilerde göstermiştir. Bu ampirik bulgu, yerel dilde spesifik olarak eğitilmiş modellerin çeviri aracı maliyetlerine ihtiyaç duymadan da oldukça rekabetçi sonuçlar üretebildiğini kanıtlamaktadır.

İkincisi; metin uzunluğu ve yapısal karmaşıklık, çevirinin modele sağladığı performans katkısını (marjını) doğrudan etkilemektedir. Karmaşık cümle yapılarının ve kinayelerin yoğun olduğu uzun metinli (Beyazperde) veri kümesinde çevirinin etkisi çok daha radikal ve keskin olmuştur. Örneğin, Mistral-7B modelinin orijinal dildeki başarısı Gemini çevirisi ile yaklaşık %7 oranında devasa bir sıçrama (%88.75'ten %95.72'ye) göstermiştir. Buna karşın, semantik

bağlamın halihazırda sınırlı olduğu kısa metinli (E-ticaret) veri kümesinde, modellerin orijinal veri ile çeviri verisi arasındaki başarı farkları çok daha dar bir aralıkta kalmıştır.

Gelecek çalışmalar düşünüldüğünde; bu araştırmada başarıyla uygulanan farklı çeviri paradigmasının kıyaslanması metodolojisinin, sağlık, finans veya hukuk gibi sektörel jargonun yoğun kullanıldığı spesifik veri kümelerinde (domain-specific data) test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu çalışmada gerçekleştirilen analizler e-ticaret veri kümesinde $\text{max_len} = 128$, sinema veri kümesinde ise $\text{max_len} = 256$ sekans uzunluklarıyla sınırlı tutulmuştur. Gelecek çalışmalarda, daha yüksek işlem gücü (GPU) altyapısı kullanılarak çok daha uzun metinlerin farklı çeviri paradigmalarındaki performans analizleri ölçülerek literatüre yeni katkılar sunulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Q. Wu, C. Xia, and S. Tian, "AI-Driven Sentiment Analytics: Unlocking Business Value in the E-Commerce Landscape," arXiv preprint arXiv:2504.08738, 2025.
- [2] A. B. Altinel Girgin, G. Gümüşçekiçi, and N. C. Birdemir, "Turkish sentiment analysis: A comprehensive review," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 42, no. 4, pp. 1292–1314, 2024.
- [3] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," *Neural computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997.
- [4] A. Graves and J. Schmidhuber, "Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures," *Neural networks*, vol. 18, no. 5-6, pp. 602-610, 2005.
- [5] A. Vaswani et al., "Attention is all you need," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, 2017.
- [6] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding," arXiv preprint arXiv:1810.04805, 2018.
- [7] A. Conneau et al., "Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale," arXiv preprint arXiv:1911.02116, 2019.
- [8] S. Schweter, "BERTurk - Turkish BERT models," GitHub repository, 2020. [Online]. Available: <https://github.com/stefan-it/turkish-bert>
- [9] A. Q. Jiang et al., "Mistral 7B," arXiv preprint arXiv:2310.06825, 2023.
- [10] AI@Meta, "Llama 3.1: An In-Depth Analysis of the Next Generation Large Language Model," 2024.
- [11] E. J. Hu et al., "LoRA: Low-rank adaptation of large language models," arXiv preprint arXiv:2106.09685, 2021.
- [12] M. Mohsen, "Artificial Intelligence in Academic Translation: A Comparative Study of Large Language Models and Google Translate," *Psycholinguistics*, 2024.
- [13] E. Demirtaş and M. Pechenizkiy, "Cross-lingual polarity detection with machine translation," in *Proceedings of the Second International Workshop on Issues of Sentiment Discovery and Opinion Mining*, 2013, p. 9.
- [14] B. Bilen and F. Horasan, "LSTM network based sentiment analysis for customer reviews," *Politeknik Dergisi*, vol. 25, no. 3, pp. 959–966, 2022.
- [15] A. Poncelas et al., "The Impact of Indirect Machine Translation on Sentiment Classification," in *Proceedings of the 22nd Annual Conference of the European Association for Machine Translation*, 2020.

3. Bölüm

Verilog HDL ile Sayısal Sistem Tasarımı ve FPGA Gerçekleştirme Çalışmaları

İsmail KARAKAŞ¹, Mete ÖZBALTAN²

1. GİRİŞ

Sayısal sistem tasarımı, mikroelektronik dünyasındaki baş döndürücü ve sürekli devam eden teknolojik değişimlerle birlikte köklü bir yapısal dönüşüm sürecinden geçmiştir. Tarihsel gelişim süreci içerisinde Moore Yasası ile paralel olarak transistör sayısındaki dramatik ve üstel artış, tasarımcıları artık yönetilemez hale gelen manuel devre çizim yöntemlerinden tamamen uzaklaştırarak, çok daha gelişmiş ve otomatize edilmiş bilgisayar destekli tasarım (CAD) araçlarına yöneltmiştir. Bu teknolojik evrim sürecinde, milyonlarca kapıdan oluşan karmaşık mantık devrelerinin işlevsel olarak doğrulanması, simülasyonu ve fiziksel donanım sentezlenmesi aşamalarında Donanım Tanımlama Dilleri (HDL) kaçınılmaz bir endüstri standardı haline gelmiştir. Verilog HDL, özellikle C programlama diline benzer esnek sözdizimi yapısı, olay tabanlı simülasyon yetenekleri ve hiyerarşik modelleme avantajlarıyla, modern dijital mimarilerin ve yüksek seviyeli sistem tasarımlarının modellenmesinde küresel ölçekte bir endüstri lideri konumuna yükselmiştir.

Günümüzde sayısal sistemlerin fiziksel olarak hayata geçirilmesi ve donanımsal gerçekleştirilmesi iki ana stratejik kolda ilerlemektedir: Uygulamaya Özel Tümlü Devreler (ASIC) ve Alan Programlanabilir Kapı Dizileri (FPGA). ASIC tasarımları, belirli bir görev için optimize edildikleri için en yüksek performansı ve en düşük birim güç tüketimini sunsalar da, astronomik üretim maliyetleri, uzun üretim döngüleri ve fiziksel üretim sonrası geri dönülemez yapıları nedeniyle, günümüzün dinamik pazarında yerini hızla FPGA teknolojisinin sunduğu esnekliğe bırakmaktadır. FPGA'ler, tasarımcıya donanım konfigürasyonunu çalışma anında veya tasarım aşamasında defalarca yeniden yapılandırma imkanı sunarak, prototipleme süreçlerini ve hata ayıklama döngülerini radikal bir şekilde hızlandırmıştır. Bu cihazların iç mimarisinde

¹ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ORCID: 0009-0001-0849-6632, e-posta: 6017061@bakircay.edu.tr

² Doç. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3215-6363, e-posta: mete.ozbaltan@bakircay.edu.tr

bulunan ve temel mantık hücrelerini oluşturan Look-Up Table (LUT) yapıları, flip-floplar ve programlanabilir karmaşık ara bağlantılar, en yoğun işlem gerektiren algoritmaların bile donanımsal seviyede paralelleştirilmesine ve yüksek hızlarda çalıştırılmasına olanak tanır.

Literatürdeki akademik ve endüstriyel çalışmalarda, FPGA tabanlı bir tasarımın başarısı sadece çalışma frekansı veya ham hız verileriyle değil; aynı zamanda enerji verimliliği, birim alanda gerçekleştirilen işlem kapasitesi ve pazara çıkış süresi (time-to-market) gibi kritik parametrelerle ölçülmektedir. Özellikle yüksek başarılı hesaplama (HPC), büyük veri analitiği ve derin öğrenme temelli yapay sinir ağları gibi yoğun veri işleme gerektiren modern alanlarda, FPGA'lerin sunduğu özelleştirilmiş paralel işlem yeteneği, geleneksel komut setine dayalı işlemci (CPU) mimarilerinin karşılaştığı veri yolu darboğazlarını ve sıralı işlem kısıtlarını başarıyla aşmaktadır. Sayısal sistemlerin tasarım aşamasında, sistemin davranışsal düzeyde (behavioral level) matematiksel ve mantıksal olarak doğru modellenmesi, sentez ve yerleşim sonrası aşamalarda ortaya çıkabilecek kritik zamanlama hatalarının ve sinyal gecikmesi ihlallerinin (timing violations) önlenmesi açısından hayati bir stratejik öneme sahiptir.

Modern mühendislik uygulamalarında Verilog HDL, yalnızca basit bir kodlama veya betimleme aracı değil, aynı zamanda sistem seviyesinde kapsamlı bir tasarım metodolojisini temsil etmektedir. IP (Intellectual Property) çekirdeklerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, önceden tasarımı yapılmış, doğrulanmış ve optimize edilmiş hazır modüllerin yeni projelere entegre edilmesi, modern sistemlerin devasa karmaşıklık düzeyinin yönetimini önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Donanım dünyasındaki bu modüler yapı ve blok tabanlı tasarım anlayışı, sistem-on-chip (SoC) mimarilerinin kapılarını sonuna kadar aralayarak, tek bir silikon çip üzerinde işlemci çekirdekleri, bellekler, giriş-çıkış birimleri ve özel hızlandırıcıların bulunduğu tüm bir bilgisayar sisteminin gerçekleşmesine imkan sağlamıştır. Son yıllarda yükselişe geçen açık kaynaklı donanım girişimleri ve RISC-V gibi açık mimari standartları, Verilog tabanlı özelleştirilmiş tasarımların önemini hem akademik araştırma projelerinde hem de ticari endüstriyel boyutta daha da pekiştirmiş ve demokratikleştirmiştir.

Sonuç olarak, FPGA platformları üzerinde Verilog HDL kullanılarak gerçekleştirilen ileri seviye tasarım ve uygulama çalışmaları; günümüzün yüksek hızlı haberleşme ağları, kritik savunma sanayii sistemleri, uzay teknolojileri ve otonom araçlarla şekillenen otomotiv sektörü gibi stratejik alanlarda temel itici güç ve inovasyon kaynağıdır. Sinyal işleme süreçlerindeki gecikme sürelerinin (latency) minimizasyonu, donanım kaynaklarının (logic utilization) maksimum verimlilikle kullanımı ve güç tüketimi analizleri, günümüz tasarımcılarının

üzerinde en çok durduğu ve optimizasyon yaptığı temel mühendislik konuları arasında yer almaktadır. Bu bölümün devam eden kısımlarında, bahsedilen bu kapsamlı teorik temellerin Verilog dilindeki pratik kod karşılıkları, sentezlenebilir RTL yazım teknikleri ve modern FPGA cihazları üzerindeki donanımsal gerçekleştirme detayları her yönüyle ve kapsamlı bir şekilde analiz edilecektir.

Tablo 1: Sayısal Tasarım Teknolojilerinin Tarihsel Gelişimi ve Karşılaştırması (Trimberger, 2012).

Teknoloji	Transistör Sayısı	Tasarım Yönetimi	Esneklik	Maliyet
SSI (Small Scale)	1 - 10	Ayrık Kapılar (7400 Serisi)	Çok Düşük	Düşük
MSI (Medium Scale)	10 - 500	Sayıcılar, Çoklayıcılar	Düşük	Orta
VLSI (Very Large)	10,000+	HDL (Verilog/VHDL)	Yüksek	Yüksek (ASIC için)
FPGA	Milyonlarca	HDL / IP Çekirdekleri	Çok Yüksek	Çok Düşük

2. VERİLOG HDL VE SAYISAL SİSTEM TASARIMINA İLİŞKİN TEMEL BİLGİLER

Sayısal sistem tasarımı süreci, sadece teknik bir uygulama alanı olmayıp; soyut bir fikrin, karmaşık bir matematiksel modelin veya ileri düzey bir algoritmanın somut, işlevsel ve fiziksel bir donanımsal gerçekliğe dönüştürülmesini sağlayan, çok katmanlı, hiyerarşik ve disiplinlerarası bir mühendislik disiplini. Bu disiplinin metodolojik merkezinde konumlanan Verilog Donanım Tanımlama Dili (HDL), dijital sistemleri tasarımın gerektirdiği karmaşıklık düzeyine ve ihtiyaç duyulan teknik ayrıntıya göre farklı soyutlama seviyelerinde tanımlama yeteneğine sahiptir. Bir tasarımın en temel, bölünemez ve vazgeçilmez yapı taşı olan modül kavramı, devasa ölçekli ve çok bileşenli karmaşık sistemlerin mantıksal bir düzen içerisinde hiyerarşik parçalara ayrılmasına zemin hazırlayarak, yüksek doğruluk oranına sahip, test edilmiş ve farklı projelerde tekrar kullanılabilir blokların oluşturulmasına imkan tanır. Verilog dili, tasarımcıya hedeflenen donanımın işlevsel gereksinimlerine ve tasarımın hangi aşamasında olduğuna bağlı olarak yapısal, veri akışı ve davranışsal olmak üzere üç temel düzeyde modelleme esnekliği sunar. Yapısal modelleme yaklaşımı tasarımı en alt seviyeden ele alarak mantık kapıları ve önceden spesifikasyonu yapılmış alt modüllerin birbirlerine fiziksel bir ağ listesi mantığıyla bağlanması şeklinde kurgularken; veri akışı modellemesi sürekli

atama deyimleri aracılığıyla sinyaller arasındaki veri iletimini Boolean denklemleri üzerinden tanımlar, davranışsal modelleme ise prosedürel bloklar vasıtasıyla sistemin çalışma mantığını yüksek seviyeli algoritmik ifadeler üzerinden betimler.

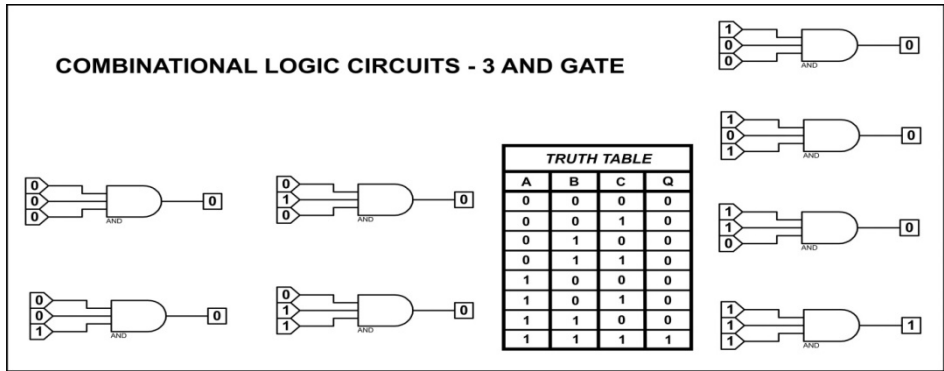
Tasarım sürecinde kullanılan reg ve wire gibi veri tiplerinin işlevlerine uygun seçilmesi ve sayı sistemlerinin doğru formatta tanımlanması, sentez aşamasında kodun donanım karşılığı oluşturulurken beklenmedik mantıksal hataların veya donanım verimliliğini düşüren istenmeyen yapıların ortaya çıkmaması adına hayati bir öneme sahiptir. Sayısal tasarımın teorik ve pratik temelini oluşturan kombinasyonel ve ardışıl devre yapıları arasındaki keskin ayrım, Verilog içerisinde oldukça hassas ve kurallı bir biçimde yönetilir. Kombinasyonel devrelerde çıktı değerleri sadece o anki mevcut giriş değerlerinin bir fonksiyonuyken; ardışıl devrelerde sistemin geçmiş bilgisi ve mevcut durumu, flip-flop gibi saklayıcı birimler aracılığıyla bir sonraki saat çevrimine kadar muhafaza edilir. Bu noktada, sistemin ritmini belirleyen saat sinyali ile sistemin bilinen bir başlangıç durumuna dönmesini sağlayan sıfırlama mekanizmalarının yönetimi, donanım kararlılığı ve senkronizasyonun korunması için birincil önceliklidir. Literatürde, özellikle kontrol birimlerinin ve karmaşık karar mekanizmalarının tasarımında kullanılan Moore ve Mealy makineleri gibi Sonlu Durum Makineleri modelleri, sistem davranışlarının sistematik, öngörülebilir ve hatasız bir şekilde kurgulanmasını sağlar.

Sentezlenebilir kod yazımı olarak adlandırılan RTL seviyesi, donanım tanım dillerini klasik yazılım dillerinden ayıran en temel ve karakteristik özelliktir. Yazılan her bir Verilog komutunun, hedef donanım mimarisinde, örneğin bir FPGA içerisindeki bakma tabloları (LUT), flip-floplar veya blok bellek birimleri gibi somut bir fiziksel karşılığının olması zorunluluğu, tasarımcıyı mevcut alan ve donanım kaynağı kısıtlarını her adımda gözetmeye zorlar. Tasarımın fonksiyonel doğrulanması sürecinde başvuru testbench yapıları, tasarlanan ana modülün dış dünyadan izole edilerek çeşitli senaryolar, zamanlanmış uyarılar ve köşe vakalar altında simüle edilmesine olanak tanır. Ayrıca, zamanlama analizi süreçleri sinyallerin fiziksel iletim yolları üzerindeki yayılım gecikmelerini nanosaniye düzeyinde inceleyerek, sistemin hedeflenen çalışma frekansında hata vermeden ve veri kaçırmadan çalışıp çalışmayacağını matematiksel olarak kesinleştirir.

Sistem performansını doğrudan etkileyen kritik yol kavramı, iki saklayıcı arasındaki en uzun gecikmeye sahip sinyal yolunu ifade eder ve bu yolun optimize edilerek kısaltılması, sistemin ulaşabileceği maksimum saat frekansını ve dolayısıyla toplam işlem kapasitesini belirleyen ana kısıttır. Modern ve geniş ölçekli sayısal tasarımlarda, birbirinden farklı frekanslarda veya fazlarda çalışan

çoklu saat bölgeleri arasındaki veri transferi, metastabilite gibi senkronizasyon hatalarının ve rastgele veri kayıplarının önlenmesi için özel FIFO yapıları veya çift aşamalı tamponlama teknikleri gerektirir. Bunlara ek olarak, tasarımın güç tüketimi verimliliği ve silikon üzerindeki alan optimizasyonu, özellikle enerji kısıtı olan mobil cihazlar ve gömülü sistemler için tasarım sürecinin vazgeçilmez analiz parametreleri arasında yer alır. Son olarak, IEEE 1364 standartları çerçevesinde evrensel bir endüstriyel norm haline getirilen Verilog dili, karmaşık donanım mimarilerinin dökümantasyonu, farklı teknoloji kütüphaneleri arasında taşınabilirliği ve standardizasyonu açısından akademik dünya ile küresel endüstriyel uygulama alanları arasında sarsılmaz ve sürdürülebilir bir köprü vazifesi görür.

Tablo 2: Combinational Logic Circuits - 3 And Gate



3. VERİLOG TABANLI TASARIM, FPGA GERÇEKLEME VE UYGULAMALARI

Verilog tabanlı bir tasarımın soyut bir kod yapısından somut ve işlevsel bir fiziksel donanıma dönüşme aşamaları, yalnızca bir programlama dilinde kod yazımıyla sınırlı kalmayıp, hedef alınan donanım mimarisinin (FPGA) sahip olduğu fiziksel kısıtlar ve yapısal özelliklerle doğrudan bir ilişki içerisindedir. Tasarımın donanım üzerinde başarıyla hayata geçirilmesi; mantıksal kapıların ve hücrelerin yerleşimi sırasında ortaya çıkan kaynak kullanım oranları, sinyal gecikmelerini belirleyen çalışma hızı ve enerji verimliliğini temsil eden güç tüketimi arasındaki optimizasyon dengesinin hassas bir şekilde kurulmasına bağlıdır.

Bu süreçte, yazılan donanım tanımlama dili bloklarının hedef mimarideki Look-Up Table (LUT), flip-flop ve yönlendirme kaynaklarına en verimli şekilde haritalanması gerekmektedir. Mimari sınırların dışına çıkmadan gerçekleştirilen bu dönüştürme işlemi; fiziksel yerleşim ve zamanlama analizleri sonucunda

ulaşılan performans kriterleri, düşük güç harcanımı ve sınırlı donanım kaynaklarının efektif yönetimi arasındaki teknik dengeyle tasarımın nihai başarısını belirler.

3.1. Devre Seviyesi Tasarımlar

Devre seviyesinde tasarım, donanımın en küçük atomik birimlerinin (kapılar, aritmetik birimler ve yazmaçlar) Verilog ile optimize edilmesini kapsar. Bu seviyede yapılan tasarımlarda, FPGA içerisindeki LUT (Look-Up Table) ve Carry-Chain yapılarının verimli kullanımı esastır. Örneğin, hızlı çarpma işlemleri için özel DSP dilimleri (DSP Slices) doğrudan örneklenebilir. Düşük seviyeli tasarımda, sinyal yayılım gecikmelerini kontrol etmek amacıyla donanım geometrisini dikkate alan yerleşim stratejileri geliştirilmektedir. Ayrıca, meta-kararlılık (metastability) risklerini minimize etmek adına çift yazmaçlı senkronizasyon birimleri bu aşamada kurgulanır (Ginosar, 2011). Karmaşık mantık fonksiyonlarının Boolean sadeleştirmeleri, sentezleyicinin daha az mantık kapısı kullanmasını sağlayarak alan tasarrufu sağlar.

Tablo 3: FPGA Üzerinde FSM Kodlama Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi (Kaushal, 2016; Hossain, 2017)

Kodlama Yöntemi	Flip-Flop Kullanımı	Mantık (LUT) Kullanımı	Maksimum Hız (fmax)	Önerilen Uygulama
Binary (İkili)	Az	Çok	Orta	Basit kontrol birimleri
Gray Code	Az	Orta	Yüksek	Hata toleranslı sistemler
One-Hot	Çok	En Az	En Yüksek	FPGA Mimari Yapıları

3.2. Sistem Seviyesi Tasarımlar

Sistem seviyesi tasarımlar, bağımsız modüllerin bir araya gelerek anlamlı bir bütün oluşturduğu SoC (System-on-Chip) mimarilerini temsil eder. Bu aşamada, veri transferini yönetmek için AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture) veya Wishbone gibi standart veriyolu protokolleri tercih edilir (Flynn, 2001). Verilog ile tasarlanan işlemci çekirdekleri (Soft-Core CPU) ve bu çekirdeklerin çevre birimleriyle (UART, I2C, SPI) entegrasyonu, sistemin esnekliğini belirler. Bellek yönetim birimleri ve DMA (Direct Memory Access) kontrolörleri, sistemin veri bant genişliğini maksimize etmek için kritik rol oynar (Vandierendonck vd., 2008). Ayrıca, donanım-yazılım ortak tasarımı (hardware-software co-design) yaklaşımlarıyla, algoritmanın hangi bölümlerinin FPGA donanımında, hangi bölümlerinin gömülü işlemcide çalışacağı kararlaştırılır (De

Micheli & Gupta, 1997). Sistemin modülerliği için IP (Intellectual Property) bloklarının parametrik tasarımı büyük önem taşır.

3.3. Performans Odaklı Tasarımlar

Yüksek performanslı tasarımlarda temel hedef, birim zamanda işlenen veri miktarını (throughput) artırmak ve yanıt süresini (latency) düşürmektir. Bu bağlamda, Pipelining (Borhattı) tekniği ile kritik yol parçalara ayrılarak sistemin çalışma frekansı yukarı çekilir. Paralel işleme mimarileri kullanılarak, tek bir saat döngüsünde birden fazla işlemin eş zamanlı yürütülmesi sağlanır. Gerçek zamanlı sistemlerde, zamanlama kısıtlamaları (timing constraints) tanımlanarak sinyallerin hedeflenen sürelerde hedefe ulaşması garanti altına alınır. Enerji verimliliği odaklı yaklaşımlarda ise "Clock Gating" teknikleriyle aktif olmayan blokların güç tüketimi minimize edilir. Özellikle yüksek çözünürlüklü görüntü işleme uygulamalarında, donanım hızlandırıcılar (hardware accelerators) kullanılarak yazılımın darboğazları aşılmaktadır (Nane vd., 2016).

4. ANALİZ VE TARTIŞMA

Verilog HDL ile gerçekleştirilen FPGA tasarımlarının başarısı, teorik modelleme ile fiziksel gerçekleştirme arasındaki uyumun analiziyle doğrulanmaktadır. Literatürdeki çalışmalar, donanım hızlandırıcıların özellikle yoğun hesaplama gerektiren algoritmalarda geleneksel işlemciler (CPU) göre 10 ile 100 kat arasında bir başarımlı artışı sağladığını göstermektedir (Underwood, 2004). Ancak bu performans artışı, tasarım karmaşıklığı ve donanım kaynaklarının (resource utilization) yönetimi gibi kritik tartışmaları da beraberinde getirmektedir.

FPGA tabanlı sistemlerde en büyük tartışma konularından biri "Alan-Zaman Takası" (Area-Time Trade-off) prensibidir. Bir tasarımın paralel işleme kapasitesi artırıldığında elde edilen hız kazancı, FPGA üzerindeki mantık hücrelerinin (Slices/LUTs) daha yoğun tüketilmesine neden olmaktadır. Bu durum, sınırlı donanım kaynaklarına sahip mobil veya uç cihazlarda (Edge Devices) tasarımın ölçeklenebilirliğini kısıtlamaktadır (Guo vd., 2013). Analizler göstermektedir ki; bor hattı (pipelining) derinliği arttıkça saat frekansı yükselmekte, fakat bu durum kaydedici (flip-flop) kullanımını ve dolayısıyla statik güç tüketimini artırmaktadır (Shang vd., 2002).

Bir diğer kritik analiz noktası, yüksek seviyeli sentez (HLS) araçları ile doğrudan Verilog kodlaması arasındaki verimlilik farkıdır. Bazı araştırmacılar, C/C++ tabanlı HLS araçlarının tasarım süresini kısalttığını savunurken (Meeus vd., 2012), diğerleri bu araçların ürettiği donanımın, el ile yazılmış (hand-crafted) Verilog koduna göre %20-30 oranında daha fazla alan kapladığını ve daha yavaş

çalıştığını vurgulamaktadır (Cong vd., 2011). Bu tartışma, sistemin kritikliği ve hedeflenen performans seviyesine göre tasarım metodolojisinin seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Tablo 4: Örnek Bir Sayısal Tasarımın FPGA Kaynak Kullanım ve Zamanlama Raporu (Kuon & Rose, 2007; Xilinx, 2020)

Tasarım Modülü	LUT Sayısı	Flip-Flop (FF)	DSP Blokları	Max. Frekans (fmax)
32-bit ALU	450	120	4	185 MHz
UART Kontrolcü	85	64	0	250 MHz
Görüntü Filtresi	1,200	850	12	110 MHz
Toplam (Optimize)	1,735	1,034	16	-

Zamanlama analizi (Timing analysis) ve saat sinyali yönetimi, ardışıl sistemlerin kararlılığı üzerinde belirleyici bir faktördür. Çoklu saat bölgeleri (Clock Domains) arasında veri aktarımı yapılırken karşılaşılan meta-kararlılık sorunları, sistemin öngörülemez hatalar vermesine yol açabilmektedir (Ginosar, 2003). Literatürde, asenkron FIFO yapıları ve özel senkronizasyon devrelerinin bu hataları minimize etmedeki etkinliği sıklıkla tartışılmaktadır (Cummings, 2002). Ayrıca, FPGA üzerindeki yönlendirme (routing) gecikmelerinin, mantık kapısı gecikmelerinden daha baskın hale gelmesi, fiziksel yerleşim algoritmalarının önemini artırmaktadır.

Güç tüketimi analizi, özellikle sürdürülebilir yeşil bilgi işlem (green computing) bağlamında ele alınmaktadır. Dinamik güç tüketimi, geçiş aktivitesi (switching activity) ile doğru orantılıdır ve Verilog kodunda uygulanacak düşük seviyeli "clock gating" veya "power-aware synthesis" teknikleri ile bu tüketimin %40'a varan oranlarda azaltılabileceği kanıtlanmıştır (Lach vd., 1998). Tartışmalar, donanım tabanlı çözümlerin enerji verimliliği açısından grafik işlem birimlerinden (GPU) daha üstün olduğunu, ancak programlanabilirlik açısından hala GPU'ların gerisinde kaldığını göstermektedir (Brodtkorb vd., 2010). Son olarak, donanım güvenliği (Hardware Security) perspektifinden bakıldığında, HDL kodlarındaki truva atlarının (Hardware Trojans) tespiti, tasarımın güvenilirliği üzerine yapılan güncel analizlerin odağını oluşturmaktadır.

Tablo 5: RTL (Verilog) ve HLS (High-Level Synthesis) Karşılaştırması
(Cong et al., 2011; Vanderbauwhede & Benkrid, 2013)

Kriter	RTL (Verilog)	HLS (C/C++)
Tasarım Süresi	Uzun (Haftalar)	Kısa (Günler)
Donanım Kontrolü	Tam Kontrol (Hassas)	Kısıtlı (Otomatik)
Kaynak Verimliliği	Mükemmel	Orta / İyi
Bakım ve Güncelleme	Zor	Kolay
Kullanım Alanı	Kritik hız/alan tasarımları	Hızlı prototipleme, Karmaşık algoritmalar

5. SONUÇ

Verilog HDL ile sayısal sistem tasarımı ve FPGA gerçekleştirme süreçlerini kapsayan bu çalışma, modern dijital elektroniğin esneklik ve performans odaklı evrimini ortaya koymaktadır. Yapılan literatür taraması ve teknik analizler sonucunda, Verilog HDL'nin donanım soyutlama yeteneğinin, karmaşık algoritmaların doğrudan silikon üzerinde paralelleştirilmesinde hala en etkin yöntem olduğu teyit edilmiştir (Kuon vd., 2008). FPGA'lerin sunduğu yeniden programlanabilirlik avantajı, tasarım döngülerini kısaltırken, ASIC tasarımlarının yüksek başlangıç maliyetlerine karşı sürdürülebilir bir alternatif oluşturmaktadır (Tuan vd, 2006).

Çalışmanın devre ve sistem seviyesindeki incelemeleri, doğru mimari seçimlerin (pipelining, paralel işleme, veriyolu yönetimi) sistemin toplam verimliliğini %50'den fazla artırabildiğini göstermektedir. Performans odaklı tasarımlarda, sadece hızın değil, aynı zamanda güç tüketimi ve alan verimliliğinin de birincil tasarım kriteri haline geldiği gözlemlenmiştir (Anderson & Najm, 2004). Analiz ve tartışma bölümünde ele alınan bulgular, yüksek seviyeli sentez (HLS) araçlarının yaygınlaşmasına rağmen, düşük seviyeli Verilog kontrolünün kritik zamanlama gereksinimlerini karşılamada vazgeçilmezliğini koruduğunu ispatlamaktadır (Nane vd, 2016).

Gelecek perspektifinden bakıldığında, FPGA teknolojisinin yapay zeka (AI) ve derin öğrenme hızlandırıcıları alanında GPU'lara ciddi bir rakip olmaya devam edeceği öngörülmektedir (Nurvitadhi vd., 2017). Özellikle "bulut tabanlı FPGA" (FPGA-in-the-cloud) hizmetlerinin artmasıyla, donanım tasarımının demokratikleşmesi ve açık kaynaklı donanım ekosisteminin (RISC-V gibi) büyümesi beklenmektedir. Ancak, tasarım güvenliği ve donanım tabanlı siber saldırılara karşı dirençli mimarilerin geliştirilmesi, önümüzdeki on yılın en önemli araştırma alanlarından biri olacaktır (Swierczynski vd., 2015).

Sonuç olarak, Verilog HDL ve FPGA gerçekleme metodolojileri, sadece bugünün değil, geleceğin otonom sistemlerinin, yüksek hızlı haberleşme ağlarının ve enerji dostu veri merkezlerinin inşasında temel yapı taşı olmaya devam edecektir (Trimberger, 2015). Tasarımcıların donanım kısıtlarını yazılımsal esneklikle birleştirebildiği bu alan, disiplinler arası mühendislik çözümlerinin merkezinde yer alacaktır (Compton & Hauck, 2002).

KAYNAKLAR

- Anderson, J. H., & Najm, F. N. (2004). Power estimation techniques for FPGAs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 12(10), 1015–1027.
- Brodtkorb, A.R., Hagen, T. R., & Sætra, M. L. (2013). Graphics processing unit (GPU) programming strategies and trends in GPU computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(1), 4–13.
- Compton, K., & Hauck, S. (2002). Reconfigurable computing: A survey of systems and software. *ACM Computing Surveys*, 34(2), 171–210.
- Cong, J., Liu, B., Neuendorffer, S., Noguera, J., Vissers, K. A., & Zhang, Z. (2011). High-level synthesis for FPGAs: From prototyping to deployment. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 30(4), 473–491.
- Cummings, C. E. (2002). Simulation and synthesis techniques for asynchronous FIFO design. *SNUG San Jose 2002 Conference Proceedings*, 1–23.
- De Micheli, G., & Gupta, R. K. (1997). Hardware/software co-design. *Proceedings of the IEEE*, 85(3), 349–365.
- Flynn, D. (2001). AMBA: Enabling reusable on-chip ecosystems. *IEEE Micro*, 21(5), 20–27.
- Ginosar, R. (2003). Fourteen ways to fool your synchronizer. *Proceedings of the 9th International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems (ASYNC)*, 89–96.
- Ginosar, R. (2011). Metastability and synchronizers: A tutorial. *IEEE Design & Test of Computers*, 28(5), 44–54.
- Guo, K., Zhang, Z., Xu, X., & Yu, D. (2013). Deep learning in the FPGA: Challenges and opportunities. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Low-Power Electronics and Design (ISLPED 2013)*, 135–140.
- Kuon, I., Rose, J., & Lemieux, G. (2008). FPGA architecture: Survey and challenges. *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, 2(2), 135–253.
- Lach, J., Lau, S., & Srinivasan, V. (1998). Low power FPGA design. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2, 213–216.
- Meeus, W., Van Beeck, K., Goedemé, T., & Stroobandt, D. (2012). An overview of high-level synthesis tools for FPGAs. *Design Automation for Embedded Systems*, 16(3), 191–216.
- Nane, R., Sima, V.-M., Pilato, C., Choi, J., Fort, B., Canis, A., Chen, Y. T., Hsiao, H., Brown, S., Ferrandi, F., Santambrogio, M. D., & Choi, J. (2016). A

- survey and comparison of high-level synthesis tools. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 35(10), 1591–1604.
- Nurvitadhi, E., Venkatesh, G., Sim, J., Marr, D., Huang, R., & Choi, J. (2017). Can FPGAs beat GPUs in accelerating next-generation deep learning? *Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA '17)*, 5–14.
- Shang, L., Kaviani, A., & Bathala, K. (2002). Dynamic power consumption in Virtex-II FPGA family. *Proceedings of the ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays (FPGA '02)*, 155–162.
- Swierczynski, P., Fyrbiak, M., Güneysu, T., & Paar, C. (2015). Security in FPGA-based systems. *IEEE Security & Privacy*, 13(2), 80–83.
- Trimberger, S. M. (2015). Three decades of FPGA development. *Proceedings of the IEEE*, 103(3), 318–328.
- Tuan, T., Lee, B., Liu, S., & Wang, Y. (2006). A 90nm low-power FPGA for mobile applications. *Proceedings of the 2006 ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays (FPGA '06)*, 3–11.
- Underwood, K. (2004). FPGAs vs. CPUs: Trends in peak floating point performance. *Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays (FPGA '04)*, 171–180.
- Vandierendonck, H., Raghavan, P., & Nikolov, H. (2008). Analysis of DMA transfer efficiency in embedded systems. *IEEE Transactions on Computers*, 57(8), 1059–1072.
- Vipin, K., & Fahmy, S. A. (2018). FPGA dynamic partial reconfiguration: A survey of strategies and architectures. *ACM Computing Surveys*, 51(4), 1–39.
- Xiong, J., Wang, Y., Lin, J., & Wang, L. (2016). An energy-efficient FPGA accelerator for convolutional neural networks. *Proceedings of the International Conference on Field-Programmable Technology (FPT 2016)*, 113–120.
- Zhang, C., Li, P., Sun, G., Guan, Y., & Cong, J. (2015). Optimizing FPGA-based accelerator design for deep convolutional neural networks. *Proceedings of the 2015 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA '15)*, 161–170.

4. Bölüm

Teknik Yeterlilik Kriterlerinin Yüklenici Seçimine Etkisi ve Sınırlılıkları

Aylin ÖZODABAŞ¹, Nazım Çağatay DEMİRAL²

ÖZET

Bu çalışma, Türkiye’de yapım işleri kapsamında uygulanan yapı müteahhitliği yetki belgesi sistemi ile yüklenici seçiminde kullanılan teknik ve mali yeterlilik ölçütlerini incelemektedir. Çalışmanın temel amacı, müteahhitlik yetki belgesi grupları ile ihale ve yapım sürecinde aranan yeterlilik kriterleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek; mevcut sistemin teknik kapasiteyi, iş deneyimini, mali gücü ve nitelikli iş gücünü ne ölçüde yansıttığını tartışmaktır. Bu kapsamda yapı sınıfları, müteahhit grupları, iş deneyimi, iş hacmi, banka referansı, teknik personel ve belgeli usta iş gücü gibi kriterler mevzuat ve uygulama örnekleri üzerinden ele alınmıştır. Ayrıca Türkiye’deki sistem, seçilmiş ülkelerdeki lisans, sertifikasyon ve şantiye denetimi uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bulgular, mevcut sınıflandırma yaklaşımının belirli yönleriyle teknik yeterliliği görünür kılmakla birlikte, performans, eğitim düzeyi, şantiye yönetimi tecrübesi ve iş gücü niteliği gibi nitel unsurları sınırlı biçimde değerlendirdiğini göstermektedir. Çalışma, yüklenici seçiminde yalnızca iş hacmi ve finansal büyüklüğe dayalı bir yaklaşım yerine, teknik kapasiteyi ve uygulama performansını da içeren çok boyutlu bir değerlendirme modelinin geliştirilmesini önermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapı müteahhitliği, teknik yeterlilik, müteahhitlik yetki belgesi, yüklenici seçimi, iş deneyimi, mesleki yeterlilik.

¹ Doç. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. aylin.ozodabas@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0002-6011-980X

² Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. cagatay.demiral@bilecik.edu.tr ORCID No: 0000-0001-5927-7299

1. GİRİŞ

Yapım projelerinde yüklenici seçimi, projenin maliyet, süre, kalite ve iş güvenliği performansı üzerinde doğrudan etkili olan stratejik bir karardır. Bu nedenle yüklenici ön yeterlilik değerlendirmesi, yalnızca teklif bedelinin karşılaştırılmasına indirgenemeyecek; teknik kapasite, finansal yeterlilik, deneyim, organizasyon gücü ve risk yönetimi gibi çok sayıda ölçütün birlikte ele alınmasını gerektiren çok kriterli bir karar problemi olarak değerlendirilmektedir [1-2].

Literatürde yüklenici ön yeterlilik süreçlerinin giderek daha fazla performans odaklı ve çok kriterli değerlendirme yöntemleriyle ele alındığı görülmektedir. Ön yeterlilik modellerinin gelişimine ilişkin çalışmalar, teknik yeterlilik, deneyim, finansal istikrar ve risk faktörlerinin birlikte değerlendirilmesinin proje başarısı açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır [3-4]. Benzer şekilde finansal yeterlilik, teknik kapasite, geçmiş proje deneyimi ve referansların; projelerin zamanında tamamlanması, maliyet kontrolü ve kalite standartlarının sağlanması üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır [5-7].

Türkiye’de yapı müteahhitliği sistemi, bir yandan yapı ruhsatına tabi işlerde müteahhitlerin kayıt altına alınmasını ve sınıflandırılmasını amaçlamakta, diğer yandan yapım işlerinde yeterli teknik ve mali kapasiteye sahip yüklenicilerin seçilmesini hedeflemektedir. Bununla birlikte, müteahhitlik yetki belgesi grupları ile ihale/yeterlilik kriterleri arasındaki ilişkinin uygulamada her zaman kolay anlaşılmadığı, bazı göstergelerin daha çok nicel büyüklüklere odaklandığı ve teknik yeterliliğin nitel boyutlarının sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu çalışma, söz konusu sistemi mevzuat, tablo ve uygulama örnekleri üzerinden değerlendirerek, yüklenici seçiminde daha bütüncül bir yeterlilik yaklaşımına duyulan ihtiyacı tartışmaktadır.

2. MÜTEAHHİTLİK YETKİ BELGESİ VE SINIFLANDIRMA SİSTEMİ

Yapı müteahhitliği yetki belgesi, yapı ruhsatına tabi yapım işlerinde müteahhitlerin kayıt altına alınması ve ekonomik, mali, mesleki ve teknik yeterliklerine göre sınıflandırılması amacıyla kullanılan temel araçlardan biridir. Bu sistem, “kimlerin hangi büyüklükte ve nitelikte yapım işini üstlenebileceği” sorusuna idari ve teknik bir çerçeve içinde cevap vermektedir. Yetki belgesi numarası, ilgili mevzuat uyarınca yapı ruhsatı, yapı kullanma izin belgesi ve yapım işleri sözleşmelerinde kullanılan bir kayıt unsurudur. Bu yönüyle belge, yalnızca bir başvuru evrakı değil, müteahhidin iş üstlenme kapasitesini izlemeye yarayan kurumsal bir mekanizmadır.

Uygulamada müteahhitlik faaliyetine başlamak isteyen gerçek veya tüzel kişiler, hukuki ve ticari varlıklarını oluşturduktan sonra ilgili başvuru sistemi

üzerinden yetki belgesi numarası için müracaat eder. Başvuru kapsamında iş deneyimini, ekonomik ve mali yeterliği, mesleki ve teknik iş gücünü gösteren belgeler değerlendirilir. Müteahhit, sahip olduğu belge grubunun izin verdiği parasal ve fiziksel sınırlar içinde iş üstlenebilir; tamamlanan işler ve oluşan deneyim, daha üst gruplara geçiş bakımından belirleyici olur. Bu süreç, basit bir “belge alma” işleminden çok, müteahhidin kurumsal kapasitesinin aşamalı olarak sınıflandırılması anlamına gelmektedir.

Tablo 1, T.C. Yalova Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü tarafından yayımlanan 2020 tarihli müteahhitlik belgesi örnek tablosunu göstermektedir [8]. Bu nedenle tabloda görülen 3-B, 4-A ve 5-A yapı gruplarına ilişkin birim fiyatlar, güncel parasal limitler olarak değil, ilgili kaynağın ait olduğu yılın örnek değerleri olarak okunmalıdır. Tabloda müteahhitlik grupları A’dan H’ye doğru azalan iş yapma kapasitesini temsil ederken, eşik değeri ve üstlenilecek iş tutarı, müteahhidin geçmiş iş deneyimi ile üstlenebileceği iş büyüklüğü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Örneğin C grubu bir müteahhit için kaynak tabloda yer alan 65.213.187 TL düzeyindeki deneyim ve üstlenme sınırı, aynı parasal büyüklüğün farklı yapı gruplarında farklı inşaat alanlarına karşılık gelebileceğini göstermektedir. Bu durum, parasal limitlerin yapı sınıfı ve birim maliyetle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 1. 2020 yılına ait müteahhitlik belgesi örnek tablosu.

Grup	2020 eşik değeri	Eşik değerine oran	Gereken iş deneyimi	Üstlenilecek iş tutarı	Üstlenilecek iş tutarı	3-B grup m ²	4-A grup m ²	5-A grup m ²
A	65.213.187 TL	2 katı	130.426.374 TL	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız	Sınırsız
B	65.213.187 TL	1,40 katı	91.298.462 TL	1 katı	91.298.462 TL	62.964	58.902	38.041
C	65.213.187 TL	1 katı	65.213.187 TL	1 katı	65.213.187 TL	44.975	42.073	27.172
D	65.213.187 TL	0,67 katı	43.475.458 TL	1 katı	43.475.458 TL	29.983	28.049	18.115
E	65.213.187 TL	0,33 katı	21.737.729 TL	1 katı	21.737.729 TL	14.992	14.024	9.057
F	65.213.187 TL	0,10 katı	6.521.319 TL	2 katı	13.042.637 TL	8.995	8.415	5.434
G	65.213.187 TL	0,07 katı	4.564.923 TL	1,50 katı	6.847.385 TL	4.722	4.418	2.853
H	65.213.187 TL	Gerekmez	Gerekmez	G iş deneyiminin 3/5 katı	2.738.954 TL	1.889	1.767	1.141

Tablo 1'deki dağılım, yetki belgesi grubunun yalnızca bir harf derecesi olmadığını; aynı eşik değeri üzerinden iş deneyimi, üstlenilebilecek iş tutarı ve farklı yapı gruplarında yapılabilecek yaklaşık inşaat alanı bakımından doğrudan sonuç doğurduğunu göstermektedir. Özellikle 3-B, 4-A ve 5-A yapı gruplarında aynı parasal kapasitenin farklı metrekaresine karşılıklarına dönüşmesi, yapı birim maliyetindeki artışın yüklenicinin fiili üretim ölçeğini daralttığını ortaya koymaktadır [8]. Bu nedenle alt gruplarda görülen sınırlamalar, teknik yeterliliğin parasal büyüklükle birlikte yapı türünün maliyet yoğunluğu üzerinden değerlendirilmesi gerektiğine işaret eder.

2.1. Yeterlilik Kriterlerinin Yapısı

Tablo 2, müteahhitlik sınıflandırmasında kullanılan temel yeterlilik göstergelerini bir arada sunmaktadır. Yetki grubu, firmanın üstlenebileceği iş büyüklüğünü; asgari iş deneyim tutarı, geçmişte tamamlanan veya belgelendirilen işlerin parasal değerini; asgari iş hacmi ve banka referansı ise firmanın güncel mali kapasitesini göstermektedir. Bunun yanında yıllık asgari usta iş gücü ve teknik iş gücü kriterleri, yalnızca finansal büyüklüğün yeterli görülmediğini, şantiyeyi yürütecek nitelikli insan kaynağının da sistem içinde dikkate alındığını göstermektedir.

Tablo 2. Yapım işlerinde müteahhitlik yeterlilik kriterlerine ilişkin sınıflandırma tablosu.

Yetki grubu	Asgari deneyimi	İş hacmi	İş Banka referansı	MYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami Azami yapım işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
A	921.600.000 TL	138.240.000 TL	46.080.000 TL	50	8	0,50	0,10	En çok 0,75	Sınırsız	Sınırsız	A	B1	E1
B	645.120.000 TL	96.768.000 TL	32.256.000 TL	24	6	0,50	0,10	En çok 0,75	645.120.000 TL	63.247 IV-B: 53.537 IV-C: 51.817 V-A: 46.748	B	C	E1
B1	552.960.000 TL	82.944.000 TL	27.648.000 TL	18	4	0,50	0,10	En çok 0,75	552.960.000 TL	73.728 III-A: 61.440 III-B: 54.212 IV-A: 45.889 IV-B: 44.414 V-A: 40.070	B1	C1	E1

Yetki grubu	Asgari iş deneyimi	Asgari iş hacmi	İş Banka referansı	MİYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami Azami yapım işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
C	460.800.000 TL	69.120.000 TL	23.040.000 TL	12	3	0,50	0,10	En çok 0,75	460.800.000 TL	III-A: 61.440 III-B: 51.200 IV-A: 45.176 IV-B: 38.241 IV-C: 37.012 V-A: 33.391	C	D	F
C1	384.000.000 TL	57.600.000 TL	19.200.000 TL	10	3	0,50	0,10	En çok 0,75	384.000.000 TL	III-A: 51.200 III-B: 42.667 IV-A: 37.647 IV-B: 31.867 IV-C: 30.843 V-A: 27.826	C1	D1	F1
D	307.200.000 TL	46.080.000 TL	15.360.000 TL	9	2	0,50	0,10	En çok 0,75	307.200.000 TL	III-A: 40.960 III-B: 34.133	D	D1	G

Yetki grubu	Asgari iş iteneyimi	Asgari iş hacmi	Banka iş referansı	MYYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami Azami yapılm işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
										IV-A: 30.118 IV-B: 25.494 IV-C: 24.675 V-A: 22.261			
										III-A: 30.720 III-B: 25.600 IV-A: 22.588 IV-B: 19.120 IV-C: 18.506 V-A: 16.696			
D1	230.400.000 TL	34.560.000 TL	11.520.000 TL	8	2	0,50	0,10	En çok 0,75	230.400.000 TL		D1	E	G1
										III-A: 20.480 III-B: 17.067 IV-A: 15.059 IV-B: 12.747			
E	153.600.000 TL	15.360.000 TL	7.680.000 TL	6	2	0,50	0,10	En çok 0,75	153.600.000 TL		E	E1	G1

Yetki grubu	Asgari iş deneyimi	Asgari iş hacmi	İş Banka referansı	MYYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami Azami yapım işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
										IV-C: 12.337 V-A: 11.130			
										III-A: 16.384 III-B: 13.653 IV-A: 12.047 IV-B: 10.198 IV-C: 9.870 V-A: 8.904			
E1	92.160.000 TL	9.216.000 TL	4.608.000 TL	5	2	0,50	0,10	En çok 0,75	122.880.000 TL	12.047 IV-B: 10.198 IV-C: 9.870 V-A: 8.904	E1	E1	H
										III-A: 12.288 III-B: 10.240 IV-A: 9.035 IV-B: 7.648 IV-C: 7.402 V-A: 6.678			
F	46.080.000 TL	Aranmaz	2.304.000 TL	3	1	0,50	0,10	En çok 0,75	92.160.000 TL	12.288 10.240 9.035 7.648 7.402 6.678	F	G	H

Yetki grubu	Asgari iş deneyimi	Asgari iş hacmi	İş/Banka referansı	MYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami yatırım işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
F1	39.168.000 TL	Aranmaz	1.958.400 TL	3	1	0,50	0,10	En çok 0,75	68.544.000 TL	III-A: 9.139 III-B: 7.616 IV-A: 6.720 IV-B: 5.688 IV-C: 5.506 V-A: 4.967	F1	G	H
G	32.256.000 TL	Aranmaz	1.612.800 TL	1	1	Aranmaz	Aranmaz	Aranmaz	48.384.000 TL	III-A: 6.451 III-B: 5.376 IV-A: 4.744 IV-B: 4.015 IV-C: 3.886 V-A: 3.506	G	G1	H
G1	23.040.000 TL	Aranmaz	1.152.000 TL	1	1	Aranmaz	Aranmaz	Aranmaz	34.560.000 TL	III-A: 4.608 III-B: 3.840	G1	G1	H

Yetki grubu	Asgari iş deneyimi	Asgari iş hacmi	İş Banka referansı	MİYK iş gücü	Teknik iş gücü	Cari oran	Öz kaynak	KVBB/öz kaynak	Azami yatırım işi	Azami inşaat alanı	Ortaklık grubu	Pilot ortak	Özel ortak
										IV-A: 3.388 IV-B: 2.868 IV-C: 2.776 V-A: 2.504			
										III-A: 2.560 III-B: 2.133 IV-A: 1.882 IV-B: 1.593 IV-C: 1.542 V-A: 1.391			
H	Aranmaz	Aranmaz	Aranmaz	İlk başvuruda ilk aramamaz; yenilemede 1 kişi	İlk başvuruda ilk aramamaz; yenilemede 1 kişi	Aranmaz	Aranmaz	Aranmaz	19.200.000 TL			H	H

Tablo 2, müteahhitlik sınıflandırmasının çok değişkenli bir yeterlik mantığına dayandığını göstermektedir: iş deneyimi ve iş hacmi geçmiş performansı ve piyasa ölçeğini, banka referansı kısa vadeli finansman erişimini, MYK iş gücü ile teknik iş gücü ise sahadaki organizasyon kapasitesini temsil etmektedir [9-11]. A grubundan H grubuna doğru inildikçe parasal ve örgütsel eşiklerin kademeli biçimde azalması, sistemin yüksek bedelli ve karmaşık işlerde daha güçlü kurumsal kapasite aradığını; buna karşılık küçük ölçekli işlerde piyasaya giriş eşliğini sınırlı tuttuğunu göstermektedir. Ancak bu yapı, teknik yeterliliği ölçerken belgeli personel sayısını görünür kılmakla birlikte, bu personelin proje süresince etkin kullanımı ve önceki işlerdeki kalite performansı gibi nitel unsurları aynı açıklıkta ölçmemektedir.

Mali yeterlilik göstergeleri içinde cari oran, firmanın kısa vadeli borçlarını dönen varlıklarıyla karşılayabilme kapasitesini; öz kaynak oranı, varlıkların ne ölçüde öz kaynakla finanse edildiğini; kısa vadeli banka borçlarının öz kaynaklara oranı ise firmanın kısa vadeli finansal risk düzeyini ifade etmektedir. Bu göstergeler birlikte değerlendirildiğinde, yüklenicinin yalnızca geçmişte iş yapmış olması değil, yeni bir işi sürdürebilecek mali dengeye sahip olup olmadığı da incelenmiş olur. Ancak bu oranların hangi yıla ve hangi yönetmelik değişikliğine göre kullanıldığı açıkça belirtilmelidir; çünkü ilgili mevzuat değişiklikleri parasal limitler ve oranlar üzerinde etkili olabilmektedir. Bu mali göstergelerin nasıl yorumlanacağına ilişkin özet çerçeve Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Mali oranların değerlendirilmesine ilişkin örnek gösterim.

Gösterge	Formül	Değerlendirme
Cari oran	$\frac{\text{Dönen varlıklar}}{\text{Kısa vadeli borçlar}}$	Kısa vadeli borç ödeme gücünü gösterir.
Öz kaynak oranı	$\frac{\text{Öz kaynaklar}}{\text{Toplam aktif}}$	Varlıkların ne kadarının öz kaynakla finanse edildiğini gösterir.
KVBB / öz kaynak	$\frac{\text{Kısa vadeli banka borçları}}{\text{Öz kaynak}}$	Kısa vadeli finansal risk düzeyini gösterir; tabloda azami sınır yer alır.

Tablo 3'te yer alan mali oranlar, yüklenici seçiminin yalnızca geçmişte tamamlanmış işlere değil, firmanın güncel finansal dayanıklılığına da bağlı olduğunu göstermektedir. Cari oran kısa vadeli ödeme gücünü, öz kaynak oranı sermaye yapısının sağlamlığını, kısa vadeli banka borçlarının öz kaynaklara oranı ise finansal kaldıraçtan doğabilecek kırılganlığı görünür kılar [9]. Bu göstergeler özellikle kamu ihale uygulamalarında ekonomik ve mali yeterlik ile mesleki ve teknik yeterlik kriterlerinin birlikte ele alınması gerektiğine ilişkin yaklaşım ile

uyumludur [12]. Bununla birlikte mali oranların yüksekliği, tek başına işçilik kalitesi, şantiye yönetimi veya iş güvenliği performansı anlamına gelmediğinden, finansal filtrelerin teknik yeterlilik göstergeleriyle birlikte yorumlanması gerekir.

Yapı sınıfı ve yapı grubu ayrımı, müteahhitlik kapasitesinin yalnızca parasal değerle açıklanamayacağını göstermektedir. Bir yapının yaklaşık maliyeti, yapı sınıfı ve birim maliyetine göre değiştiği için aynı parasal sınır, basit bir yapı türünde daha büyük bir inşaat alanına, daha karmaşık veya yüksek maliyetli bir yapı türünde ise daha sınırlı bir alana karşılık gelebilir. Bu nedenle sistemde parasal limitlerin yanında tek parselde üstlenilebilecek azami inşaat alanı da dikkate alınmaktadır. Yapı sınıfı kodlarının genel anlamı Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Yapı sınıfı kodlarının anlamı.

Kod	Anlamı
I	En basit ve düşük maliyetli yapı sınıfı
II	Basit ve orta düzey yapılar
III	Orta karmaşıklıkta yapılar
IV	Daha yüksek maliyetli ve karmaşık yapılar
V	En yüksek maliyet ve karmaşıklık düzeyindeki yapılar

Tablo 4'teki sınıf kodları, yapının mimarlık hizmetlerine esas alınan genel maliyet ve karmaşıklık düzeyini gösterirken, tek başına yapı türleri arasındaki alt farklılıkları açıklamak için yeterli değildir. 2025 yılı yapı yaklaşık birim maliyetleri tebliğinde aynı sınıf içinde A, B, C ve devamı alt gruplara ayırım yapılması, örneğin aynı ana sınıfta kalan yapıların kullanım amacı, donanım düzeyi, kapasitesi veya teknik karmaşıklığı nedeniyle farklı birim maliyetlere sahip olabildiğini göstermektedir [13]. Bu nedenle Tablo 5'teki harfli ayırım, müteahhitlik yetki gruplarındaki A, B veya C dereceleriyle karıştırılmamalı; yapı sınıfı içindeki maliyet ve nitelik farklılaşmasını açıklayan ayrı bir sınıflama katmanı olarak okunmalıdır.

Tablo 5. Yapı sınıfı harflerinin anlamı.

Harf	Genel anlamı
A	Aynı sınıf içindeki daha düşük/temel alt grup
B	A grubuna göre daha yüksek maliyet veya nitelik düzeyi
C ve üzeri	Yapı türüne göre artan maliyet, donanım veya karmaşıklık düzeyi

Tablo 5'te özetlenen harfli ayırım, yapı sınıflarının uygulamadaki karşılığını ancak yapı türleriyle birlikte değerlendirildiğinde anlamlı hale gelmektedir. 2025 yılı birim maliyet tebliğinde basit tarım yapıları, depolar, konutlar, sağlık yapıları, alışveriş merkezleri, fakülte yapıları, stadyumlar ve şehir hastaneleri gibi örneklerin farklı sınıf ve alt gruplara yerleştirilmesi, sınıflandırmanın yalnızca alan büyüklüğüne değil, yapının işlevsel yoğunluğu ve teknik risk düzeyine de bağlı olduğunu göstermektedir [13]. Bu nedenle Tablo 6, yetki belgesi grubunun hangi tür yapı üretimlerinde fiilen önem kazandığını somutlaştıran bir okuma aracı olarak kullanılabilir.

Tablo 6. Yapı sınıfları ve anlamları.

Sınıf	Örnek yapı türleri	Genel nitelik
I. sınıf	Basit tarım yapıları, çardaklar, seralar, depo niteliğindeki basit yapılar	Düşük maliyetli ve basit yapılar
II. sınıf	Depolar, pazar yerleri, hangarlar, sanayi tesisleri, geçici kullanımlı yapılar	Basit-orta düzey yapılar
III. sınıf	Apartman tipi konutlar, ilkokul/ortaokul, ibadethane, iş merkezi, sosyal tesis, sağlık birimleri	Orta düzey maliyet ve teknik karmaşıklık
IV. sınıf	AVM, fakülte, otel, banka, arşiv, büyük spor salonları, kamu binaları, hastaneler	Yüksek maliyetli ve daha karmaşık yapılar
V. sınıf	Büyük hastaneler, kampüsler, stadyumlar, büyükelçilik yapıları, yüksek karma kullanımlı yapılar	En yüksek maliyetli ve karmaşık yapı grubu

Tablo 6, yapı sınıfı yükseldikçe yükleniciden beklenen teknik koordinasyonun da arttığını göstermektedir. Basit tarım yapıları veya depolar gibi düşük karmaşıklıkta işler ile hastane, kampüs, stadyum veya karma kullanımlı büyük yapılar aynı türden şantiye yönetimi, malzeme kontrolü ve iş güvenliği riski üretmez. 3194 sayılı İmar Kanunu'nun yapılaşmayı plan, fen, sağlık ve çevre şartlarına uygunluk amacıyla düzenlemesi; yapı malzemeleri mevzuatının performans beyanı ve CE işareti üzerinden ürün güvenliğini ele alması; yapı işlerinde iş sağlığı ve güvenliği düzenlemelerinin de asgari saha güvenliği şartlarını belirlemesi, yüksek sınıflardaki yapıların yalnızca daha pahalı değil,

aynı zamanda daha yoğun teknik uyum gerektiren işler olduğunu göstermektedir [14-16].

İş ortaklıklarında yeterlilik hesabı ayrıca önem taşımaktadır. Ortak girişimlerde pilot ortağın asgari deneyim koşullarının önemli bir bölümünü sağlaması, diğer ortakların ise belirli oranlarda katkı sunması beklenir. Böylece ortaklık yapısı, tek bir firmanın kapasitesini aşan işlerde tamamlayıcı bir mekanizma olarak çalışır. Örneğin B grubu bakımından tabloda asgari iş deneyim tutarı 645.120.000 TL, asgari iş hacmi 96.768.000 TL, asgari banka referans mektubu 32.256.000 TL, yıllık usta iş gücü 24 kişi ve teknik personel iş gücü 6 kişi olarak verilmektedir. Aynı grup için yapı sınıfına bağlı olarak III-A yapıda 86.016 m², IV-B yapıda 53.537 m² gibi farklı alan sınırları ortaya çıkmaktadır. Bu örnek, yeterlilik değerlendirmesinin iş deneyimi, mali kapasite, insan kaynağı ve yapı sınıfı değişkenlerinin birlikte okunmasını gerektirdiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, sistemde kullanılan kodlar uygulamada kavramsal karışıklığa neden olabilmektedir. Yapı sınıflarında III-A veya IV-B gibi ifadeler yapının mimarlık ve mühendislik hizmetlerine esas sınıfını ve maliyet düzeyini gösterirken, müteahhitlik gruplarında A, B veya C gibi harfler firmanın iş üstlenme kapasitesini ifade etmektedir. Aynı harfin farklı bağlamlarda farklı anlamlara gelmesi, özellikle uygulayıcılar açısından yorum güçlüğü doğurabilir. Bu nedenle yapı sınıfı kodları ile müteahhitlik grubu kodlarının daha ayırt edici biçimde gösterilmesi, örneğin yapı için “III-YA”, müteahhit grubu için “4-MA” benzeri ayrımlarla desteklenmesi, sistemin okunabilirliğini artırabilir.

3. İNŞAAT SÜRECİNDE MESLEKİ YETERLİLİKLER VE ULUSLARARASI ÖRNEK UYGULAMALAR

Yüklenici yeterliliği yalnızca firmanın belge grubu ile sınırlı değildir; yapım sürecinde görev alan usta, işçi, operatör, teknik personel ve şantiye yönetiminin yeterliliği de yapı kalitesi üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle müteahhitlik sisteminin değerlendirilmesinde, firmanın kurumsal kapasitesi ile sahadaki mesleki yeterliliklerin birlikte ele alınması gerekir.

3.1. Türkiye

Türkiye’de inşaat işlerinde çalışan ustalar ve teknik personel açısından Mesleki Yeterlilik Kurumu belgeleri, 3308 sayılı Mesleki Eğitim Kanunu kapsamındaki ustalık belgeleri ve Millî Eğitim Bakanlığına bağlı mesleki ve teknik eğitim kurumlarından alınan belgeler önemli bir yer tutmaktadır. Yapı müteahhitliği ve şantiye şefliği mevzuatı, inşaat ve tesisat işlerinde yetki belgeli usta çalıştırılmasını zorunlu kılmakta; şantiyede yapılacak kontrollerde ustaların yaptıkları işe uygun belgeyi ibraz etmesini öngörmektedir. Bu düzenleme, belgeli

iş gücünün yapı güvenliği ve uygulama kalitesi açısından kritik kabul edildiğini göstermektedir.

3308 sayılı Kanun ve Mesleki ve Teknik Eğitim Yönetmeliği, çıraklık, kalfalık ve ustalık süreçlerini farklı aşamalar halinde düzenlemektedir. Aday çırak ve çıraklar için teorik eğitim, mesleğin özelliğine göre haftada 8 saatten az olmamak üzere yürütülür. Buna karşılık ustalık eğitiminin kapsamı ve süresi tek bir sabit süre olarak değil, ilgili meslek dalı ve Bakanlıkça belirlenen eğitim programları çerçevesinde şekillenmektedir. Kalfaların ustalık sınavına girebilmesi ise ustalık eğitimini tamamlamaları veya mevzuatta öngörülen çalışma ve sınav şartlarını sağlamalarına bağlıdır. Bu nedenle “haftada 8 saat” kuralının usta, kalfa ve çırakların tamamına aynı şekilde uygulanan genel bir süre şartı olarak yorumlanması doğru değildir.

İnşaat sektöründe ahşap kalıpcı, betonarme demircisi, sıvacı, duvarcı, ısı yalıtımcısı, inşaat boyacısı, iskele kurulum elemanı ve benzeri mesleklerde belgelendirme uygulamaları, sahadaki iş gücü niteliğinin izlenmesi bakımından önemlidir. İş makineleri için operatörlük belgeleri ve iş sağlığı ve güvenliği eğitimleri de yapım sürecinin güvenli yürütülmesi açısından tamamlayıcı unsurlardır. Bununla birlikte, mevzuatta belge zorunluluğunun bulunması tek başına yeterli değildir; belgelerin şantiyede düzenli denetlenmesi, kayıt sistemleriyle izlenmesi ve uygulamada gerçek bir kalite kontrol aracına dönüşmesi gerekir. Teknik yeterlilik ve deneyimi ölçmeyen sistemlerin proje kalitesini düşürebileceği yönündeki literatür bulguları bu noktayı desteklemektedir [17].

3.2. Uluslararası Uygulamalar

Uluslararası uygulamalarda müteahhitlik ve ustalık yeterliliklerinin tek tip bir modelle düzenlenmediği görülmektedir. ABD’de federal düzeyde tek bir genel müteahhitlik lisansı bulunmamakta; lisans, sınav ve deneyim koşulları eyaletlere göre değişmektedir. Bazı eyaletlerde genel müteahhit lisansı zorunlu iken, daha düşük düzenlemeli bölgelerde lisans şartları sınırlı olabilmektedir. Bu yapı esneklik sağlamakla birlikte, standartların eyaletler arasında farklılaşmasına yol açmaktadır [1, 18].

Norveç’te sistem, Türkiye’deki gibi merkezi bir müteahhitlik yetki belgesinden çok inşaat izinleri, yerel idare denetimi, şantiye kayıtları ve iş güvenliği belgeleri üzerinden işlemektedir. İşçilerin kimlik, kayıt ve iş güvenliği süreçleri sıkı biçimde izlenmekte; özellikle yabancı işçiler açısından mesleki eğitim, deneyim ve çalışma izni koşulları önem kazanmaktadır [19-20]. İspanya’da şirket kurmak ve inşaat faaliyeti yürütmek mümkün olmakla birlikte, REA kaydı, mesleki eğitim belgeleri, sosyal güvenlik ve çalışma/vize yükümlülükleri belirleyici olmaktadır. İngiltere’de ise ulusal düzeyde tüm müteahhitleri kapsayan tek bir lisans sistemi bulunmamakta; CSCS kartı ve belirli uzmanlık alanlarına ilişkin sertifikalar şantiyeye giriş ve mesleki

uygunluk bakımından önem taşımaktadır. İtalya'da da ulusal tek bir ustalık lisansından çok, mesleki eğitim, deneyim, diploma ve proje türüne göre aranan belgeler öne çıkmaktadır [21-22].

Mesleki yeterlilik karşılaştırması yapılırken yalnızca müteahhitlik şirketinin hukuki statüsüne bakmak yeterli değildir; yapım işini sahada gerçekleştiren usta, teknik eleman ve şantiye organizasyonunun da değerlendirilmesi gerekir. Türkiye bakımından bu ilişki, 3308 sayılı Mesleki Eğitim Kanunu'nun çırak, kalfa ve ustaların eğitimine ilişkin çerçevesi; Mesleki ve Teknik Eğitim Yönetmeliği'nin ustalık, usta öğreticilik ve iş güvenliği eğitimine verdiği yer; ayrıca yapı işlerinde şantiye şefi ve yetki belgeli usta çalıştırılmasına ilişkin düzenlemeler üzerinden kurulmaktadır [23-25]. Bu nedenle Tablo 7, ülkeler arasında yalnızca belge adlarını değil, teknik emeğin nasıl belgelendirildiğini ve sahaya nasıl taşındığını karşılaştırmak amacıyla okunmalıdır.

Tablo 7. Ülkelerdeki ustalık kriterleri.

Ülke	Resmî ustalık/sertifika düzeni	Lisans/izin yaklaşımı	Yeterlilik ölçüm aracı
Türkiye	MYK belgesi ve 3308 sayılı Kanun kapsamındaki ustalık belgeleri	Müteahhitlik yetki belgesi ve mesleğe uygun usta belgesi zorunluluğu	MYK sınavları, ustalık sınavları ve şantiye kontrolleri
ABD	Eyaletlere göre değişen lisans veya sertifika düzeni	Bazı eyaletlerde zorunlu, bazı eyaletlerde sınırlı	Lisans sınavı, deneyim ve yerel koşullar
İngiltere	Ulusal tek bir ustalık lisansı yoktur	Şirket kurulabilir; belirli alanlarda sertifika gerekir	CSCS kartı, mesleki eğitim ve uzmanlık belgeleri
İspanya	Mesleki eğitim ve yeterlilik belgeleri öne çıkar	REA kaydı ve proje bazlı yükümlülükler önemlidir	Mesleki eğitim, kayıt ve iş güvenliği belgeleri
Norveç	Mesleki eğitim ve deneyim güçlü biçimde aranır	İzin, kayıt ve şantiye denetimi belirleyicidir	Resmî eğitim, deneyim, HMS kartı ve saha kayıtları
İtalya	Belgelendirme ve diploma temelli yaklaşım yaygındır	Proje türüne ve işin niteliğine göre değişir	Tecrübe, mesleki eğitim ve diploma

Tablo 7'deki karşılaştırma, teknik yeterliliğin ülkeler arasında aynı araçlarla ölçülmediğini; lisans, sertifika, mesleki eğitim, şantiye kayıtları ve iş güvenliği belgeleri gibi farklı kanallardan üretildiğini göstermektedir. Türkiye satırında öne çıkan MYK/ustalık belgesi ve şantiye kontrolü vurgusu, 3308 sayılı Kanun ile mesleki ve teknik eğitim düzenlemelerinin sahadaki usta yeterliliğiyle bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır [23-24]. Ancak belgeli iş gücünün varlığı, nitelikli

üretimin kendiliğinden gerçekleştiğini kanıtlamaz; bu belgelerin şantiye organizasyonu, iş güvenliği eğitimi ve fiili denetimle desteklenmesi gerekir [15, 25]. Bu nedenle tablo, Türkiye'nin güçlü yanının belgeye dayalı izlenebilirlik olduğunu; geliştirilmesi gereken yanının ise belge sahipliğini ölçülebilir saha performansına bağlamak olduğunu göstermektedir.

Müteahhitlik rejimleri arasındaki fark, merkezi bir yetki belgesi sisteminin bulunup bulunmamasından ibaret değildir; yeterliliğin hangi aşamada, hangi belgeyle ve hangi idari denetim aracılığıyla ölçüldüğü de belirleyicidir. Türkiye'de yapı ruhsatına tabi işlerde müteahhidin kayıt altına alınması, ekonomik-mali yeterlik ile mesleki-teknik yeterliğin birlikte değerlendirilmesi ve şantiye düzeyinde yetki belgeli usta/şantiye şefi yükümlülüklerinin aranması, daha merkezi ve belge temelli bir model üretmektedir [9, 25]. Buna karşılık literatürde ABD ve Kuzey Avrupa örneklerinde lisanslama, proje bazlı izinler, saha kayıtları ve işçi kabul süreçlerinin farklı kurumsal düzeylerde işletildiği görülmektedir [18-19]. Bu farklılıklar Tablo 8'in, ülkeler arasında basit bir üstünlük sıralaması değil, yeterlilik denetiminin kurumsal konumunu gösteren karşılaştırmalı bir çerçeve olarak değerlendirilmesini gerektirir.

Tablo 8. Ülkelerdeki müteahhitlik kriterlerine ilişkin karşılaştırmalı özet.

Ülke	Müteahhitlik düzeni	Herkes müteahhit olabilir mi?	Önemli değerlendirme
Türkiye	Yapı ruhsatına tabi işlerde yetki belgesi ve grup sınıflandırması esastır.	Hayır; belge ve grup koşulları belirleyicidir.	İş deneyimi, iş hacmi, teknik personel ve usta iş gücü birlikte değerlendirilir.
ABD	Federal tek lisans yoktur; eyalet bazlı lisans ve sınav sistemleri vardır.	Eyaletlere göre değişir.	Düzenleme düzeyi yerel mevzuata bağlı olduğu için standartlar farklılaşabilir.
Norveç	İnşaat izinleri, yerel denetim, kayıt ve iş güvenliği süreçleri öne çıkar.	Şirket kurmak mümkündür; ancak izin ve denetim koşulları sınırlayıcıdır.	Dijital kayıt, kimlik ve saha denetimi güçlüdür.
İspanya	REA kaydı, çalışma koşulları ve mesleki yeterlilik belgeleri önemlidir.	Şirket kurmak mümkündür; ancak kayıt, vergi, sosyal güvenlik ve vize koşulları aranır.	Belgelendirme ve kayıt yükümlülükleri proje ve iş türüne göre değişir.
İngiltere	Ulusal tek bir genel müteahhitlik lisansı yoktur; uzmanlık bazlı sertifikalar kullanılır.	Genel faaliyet bakımından mümkündür; bazı işlerde sertifika gerekir.	CSCS kartı ve uzmanlık belgeleri şantiye erişimi ve yeterlilik bakımından önemlidir.

Tablo 8'deki karşılaştırma, Türkiye'deki sistemin güçlü tarafının yapı ruhsatı ve yetki belgesi numarası üzerinden izlenebilirlik sağlaması olduğunu göstermektedir [9]. Buna karşılık bu modelin sınırlılığı, yüklenici seçimini çoğu zaman belge grubu ve parasal eşikler üzerinden kurması; saha performansı, iş güvenliği geçmişi, malzeme uygunluğu ve çalışan yeterliliği gibi dinamik göstergeleri ikincil düzeyde bırakabilmesidir [15-16, 25]. Bu nedenle uluslararası örneklerden çıkarılabilecek temel ders, Türkiye'deki merkezi kayıt sisteminin zayıflatılması değil, bu sistemin proje bazlı performans verileri ve şantiye düzeyindeki yeterlilik denetimiyle desteklenmesidir.

4. TÜRKİYE MÜTEAHHİTLİK SİSTEMİNDE İYİLEŞTİRME GEREKTİREN ALANLAR

4.1. Sistemde Öne Çıkan Sorun Alanları

Türkiye'deki müteahhitlik sınıflandırma sistemi, iş deneyimi ve finansal kapasiteyi ölçme bakımından belirli bir çerçeve sunmakla birlikte, teknik yeterliliğin nitel boyutlarını sınırlı biçimde değerlendirmektedir. Nitelikli iş gücü, teknik personel ve belgeli usta sayısı sistemde yer alsa da bu kişilerin deneyim düzeyi, uzmanlık niteliği, şantiye yönetimi becerisi ve proje performansına katkısı ayrıntılı biçimde puanlanmamaktadır. Bu durum, yeterliliğin çoğu zaman sayısal varlık üzerinden ölçülmesine, kalite ve performans boyutunun ise geri planda kalmasına yol açmaktadır.

Eğitim düzeyi ve mesleki uzmanlık da mevcut sistemde sınırlı bir role sahiptir. Lisans, yüksek lisans, uzmanlık eğitimi veya şirket sahibinin mühendislik kökenli olması gibi unsurlar, belge grubunun belirlenmesinde doğrudan ve güçlü bir puanlama unsuruna dönüşmemektedir. Benzer biçimde şantiye şefliği, saha mühendisliği veya teknik yönetim deneyimi, müteahhitlik grubunun yükseltilmesinde finansal büyüklük ve iş deneyimi kadar belirleyici değildir. Bu nedenle sistem, “kim daha çok iş yaptı?” sorusuna görece güçlü bir yanıt verirken, “kim daha nitelikli ve güvenilir biçimde iş yapabilir?” sorusunu aynı açıklıkta yanıtlayamamaktadır.

Finansal göstergelerin ağırlığı, büyük iş hacmine sahip firmalara avantaj sağlarken, teknik kapasitesi yüksek ancak iş hacmi görece sınırlı mühendis kökenli küçük işletmelerin üst gruplara yükselmesini zorlaştırabilmektedir. Oysa yüklenici seçimi yalnızca ciro, bilanço ve banka referansı ile değerlendirilmemeli; zamanında iş bitirme, kalite performansı, iş güvenliği, organizasyon yapısı, belgeli iş gücü oranı ve geçmiş proje başarısı gibi göstergeler de dikkate alınmalıdır [26-27].

4.2. Önerilen Değerlendirme Çerçevesi

Mevcut sistemin daha dengeli hale getirilebilmesi için iş deneyimi ve mali yeterliliği koruyan, ancak teknik kapasite, eğitim ve iş gücü kalitesine daha görünür ağırlık veren bir puanlama modeli geliştirilebilir. Bu çerçevede 100 puanlık bir değerlendirmede iş deneyimi 40 puan, mali yeterlilik 20 puan, teknik personel yapısı 20 puan, eğitim ve mesleki nitelik 10 puan, iş gücü kalitesi ise 10 puan olarak ele alınabilir. Böyle bir model, mevcut sistemin tamamen terk edilmesini değil, nicel kriterlerin nitel göstergelerle desteklenmesini amaçlamaktadır.

Önerilen yaklaşımda tamamlanan işler ve iş bitirme belgeleri korunmakta; ancak bunların ağırlığı teknik personel, belgeli usta, eğitim düzeyi ve deneyimli ekip gibi unsurlarla dengelenmektedir. Örneğin inşaat mühendisi, mimar, tekniker ve MYK belgeli ustaların varlığı teknik personel puanına; şirket sahibinin mühendis olması, lisansüstü eğitim veya mesleki eğitimler ise eğitim ve mesleki nitelik puanına yansıtılabilir. Bu yaklaşım, yalnızca büyük ölçekli iş hacmine sahip firmaları değil, küçük ancak teknik kapasitesi güçlü firmaları da görünür kılabılır [28-29].

Önerilen puanlama modeli, mevcut yetki belgesi sisteminin yerine tamamen farklı bir sistem koymaktan çok, aynı sistem içinde ölçülen kriterlerin daha dengeli ağırlıklandırılmasını amaçlamaktadır. Kamu ihale uygulamalarında ekonomik ve mali yeterlik ile mesleki ve teknik yeterlik kriterlerinin ön yeterlik ve sıralama aşamalarında birlikte ele alınması, puanlama temelli bir yaklaşımın hukuki ve idari mantık bakımından yabancı olmadığını göstermektedir [12]. Bu nedenle Tablo 9'daki aralıklar, iş deneyimi ve mali kapasiteyi korurken teknik personel, belgeli usta iş gücü, iş güvenliği uygulamaları ve belgeye dayalı saha yeterliliği gibi unsurları daha görünür kılan kavramsal bir iyileştirme önerisi olarak değerlendirilmelidir [9, 15, 23-25]. Tablo 9'da müteahhit sınıflarının önerilen puan aralıkları sunulmuştur.

Tablo 9. Önerilen puan aralıklarına göre müteahhit sınıfı.

Puan	85-100	70-84	55-69	40-54	<40
Sınıf	A	B	C	D	E

Tablo 9'a göre önerilen sınıf aralıkları, teknik yeterlilik tartışmasını tek bir asgari koşul mantığından çıkarıp ölçülebilir bir ağırlıklandırma problemine dönüştürmektedir. Bu yaklaşımda yüksek puan alan bir yüklenicinin yalnızca büyük ciroya veya yüksek iş deneyimine sahip olması değil; belgeli usta istihdamı, teknik personel sürekliliği, iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları ve yapı malzemesi uygunluğu gibi sahada kaliteyi etkileyen göstergeler bakımından da

güçlü olması beklenir [15-16, 23-25]. Dolayısıyla önerilen model, mevcut mevzuatın aradığı belge ve yeterlikleri reddetmeyen; ancak bu göstergeleri yüklenici seçimi bakımından daha açıklayıcı ve karşılaştırılabilir hale getirmeyi amaçlayan tamamlayıcı bir değerlendirme çerçevesidir.

SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye’deki müteahhitlik yetki belgesi ve yeterlilik değerlendirme sisteminin, yüklenici seçimi açısından önemli bir kurumsal çerçeve sunduğunu; ancak teknik yeterliliğin nitel boyutlarını ölçme bakımından geliştirmeye açık olduğunu göstermektedir. Mevcut sistem, iş deneyimi, mali yeterlilik ve belge grubu üzerinden müteahhidin kapasitesini belirlemekte; buna karşılık eğitim düzeyi, şantiye yönetimi deneyimi, teknik personel niteliği ve belgeli iş gücünün kaliteye etkisi gibi unsurlar sınırlı biçimde dikkate alınmaktadır.

Yüklenici sınıflandırmasının yalnızca finansal büyüklük ve geçmiş iş deneyimine dayandırılması, uzun vadede nitelikli yapı üretimini desteklemek bakımından yeterli olmayabilir. Bu nedenle, teknik kapasiteyi, geçmiş proje performansını, iş güvenliği uygulamalarını, organizasyon yapısını ve mesleki eğitim düzeyini birlikte değerlendiren çok boyutlu bir sistemin geliştirilmesi önem taşımaktadır. Böyle bir yaklaşım, “çok iş yapan” yüklenici ile “iyi iş yapabilecek kapasitede olan” yüklenici arasındaki farkın daha görünür hale gelmesine katkı sağlayacaktır.

Gelecek çalışmalar açısından, yüklenici yeterlilik kriterlerinin ağırlıklandırılmasında çok kriterli karar verme yöntemleri, yapay sinir ağları ve veri temelli performans modelleri kullanılabilir. Bu tür yöntemler hem nicel hem de nitel göstergeleri birlikte analiz ederek, Türkiye’de yüklenici seçimi ve müteahhitlik sınıflandırması alanında daha şeffaf, izlenebilir ve kalite odaklı bir değerlendirme sisteminin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Contractor pre-qualification model: State-of-the-art. Nabil El-Sawalhi, David Eaton, Rifat Rustom. International Journal of Project Management. Volume 25, Issue 5, July 2007, Pages 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.011>.
- [2] Contractor selection innovation: examination of two decades' published research Available. Gary Holt. Construction Innovation: Information Process Management (2010) 10 (3): 304–328. <https://doi.org/10.1108/14714171011060097>
- [3] Recent advances and proposed improvements in contractor prequalification methodologies. Ekambaram Palaneeswaran, Mohan Kumaraswamy. Building and Environment. Volume 36, Issue 1, 1 January 2001, Pages 73-87.
- [4] An exploration of the consistency limits of the analytical hierarchy process and its impact on contractor selection. Hector Martin,Joey Koylass, Ferida Welch. International Journal of Construction Management. Volume 18, 2018 - Issue 1. Pages 14-25.
- [5] Acheamfour, V. K., Kissi, E., & Adjei-Kumi, T. (2019). Ascertaining the impact of contractors pre-qualification criteria on project success criteria. Engineering, Construction and Architectural Management, 26(4), 618-632. <https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2018-0110>
- [6] Acheamfour, V. K., Kissi, E., Adjei-Kumi, T., & Adinyira, E. (2020). Review of empirical arguments on contractor pre-qualification criteria. Journal of Engineering, Design and Technology, 18(1), 70-83. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2019-0067>.
- [7] Analysis of criteria for contractors' qualification evaluation. Nerija Banaitiene, Audrius Banaitis. Ukio Technologinis ir Ekonominis Vystymas. Volume 12, 2006 - Issue 4.
- [8] T.C. Yalova Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. (2020). Müteahhitlik belgesi tablosu. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yalova/icerikler/yapi-muteahhitligi--8230-43081-20200716085248.pdf>
- [9] Yapı Müteahhitlerinin Sınıflandırılması ve Kayıtlarının Tutulması Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete: 2/3/2019, Sayı: 30702. Erişimi adresi: <https://www.tbb.gov.tr/tr/mevzuat-duyurulari/yapi-muteahhitlerinin-siniflandirilmesi-ve-kayitlarinin-tutulmasi-hakkinda-yonetmelik>
- [10] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Müteahhitlik sınıflandırılması: Müteahhitlik yeterli şartları ve yetki gruplarına ilişkin sınıflandırma tablosu.

- [11] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Yapı müteahhitliği yetki belgesi numarası/grubu başvuru formu ve başvuru belgeleri. Erişim adresi: <https://edirne.csb.gov.tr/yapi-muteahhitligi-basvuru-evraklari-113225>
- [12] Kamu İhale Genel Tebliği. Resmî Gazete: 22/8/2009, Sayı: 27327. Erişim adresi: <https://www.kik.gov.tr/DokumanDownload.aspx?DokumanID=537>
- [13] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Mimarlık ve Mühendislik Hizmet Bedellerinin Hesabında Kullanılacak 2025 Yılı Yapı Yaklaşık Birim Maliyetleri Hakkında Tebliğ. Resmî Gazete: 31/1/2025, Sayı: 32799.
- [14] 3194 Sayılı İmar Kanunu. Kabul Tarihi: 3/5/1985; Resmî Gazete: 9/5/1985, Sayı: 18749.
- [15] Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği. Resmî Gazete: 5/10/2013, Sayı: 28786.
- [16] Yapı Malzemeleri Yönetmeliği (305/2011/AB). Resmî Gazete: 10/7/2013, Sayı: 28703.
- [17] Contractor selection: a review of qualification and pre-qualification systems. V. K. Acheamfour, T. Adjei-Kumi & E. Kissi. International Journal of Construction Management. Vol 23. Pages 338-348, 11 Jan 2021. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1868092>.
- [18] A structured approach to the contractor prequalification process in the USA. Transactions. J. Russell, M. Skibniewski. 4th International Symposium on Building Economics, The International Council for Construction Research Studies and Documentation, CIB W-55 (1987), pp. 240-251. Copenhagen.
- [19] Sanna Suikki-Tuupanen Contractor and Worker Onboarding in Nordic, International Construction Site Master's Thesis Master of Business Administration International Business Management 2024. South Eastern Finland University of Applied Sciences.
- [20] Identifying the key process factors affecting project performance Available. Søren Lindhard. Jesper Kranker Larsen. Engineering, Construction and Architectural Management (2016) 23 (5): 657–673. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2015-0123>.
- [21] Contractor selection for Project execution using multi-attribute decision making. San Cristóbal, J.R. Fernández, V Dominguez, S. D. Salinas, R Alv angonzález. Procedia Computer Science. Volume 219, 2023, Pages 1760-1768.
- [22] Chartered Institute of Building (Great Britain). (2002). Code of practice for project management for construction and development. John Wiley & Sons.

- [23] 3308 Sayılı Mesleki Eğitim Kanunu. Kabul Tarihi: 5/6/1986; Resmî Gazete: 19/6/1986, Sayı: 19139.
- [24] Mesleki ve Teknik Eğitim Yönetmeliği. Resmî Gazete: 3/7/2002, Sayı: 24804.
- [25] Yapı Mütahhitlerinin Kayıtları ile Şantiye Şefleri ve Yetki Belgeli Ustalar Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete: 16/12/2010, Sayı: 27787.
- [26] Contractor management performance evaluation model at prequalification stage. Pooria Rashvand, Muhd Zaimi Abd Majid, Jeffrey K. Pinto. *Expert Systems with Applications*. Volume 42, Issue 12, 15 July 2015, Pages 5087-5101. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.043>.
- [27] Araújo, M. C. B., Alencar, L. H., & Mota, C. M. (2015, December). Contractor selection in construction industry: A multicriteria model. In 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (pp. 519-523). IEEE.
- [28] Analysis of pre-qualification criteria in contractor selection and their impacts on project success. Hemanta Doloi. Pages 1245-1263 | Received 05 May 2009, Accepted 06 Oct 2009, Published online: 17 Dec 2009. *Construction Management and Economics*. Volume 27, 2009 - Issue 12.
- [29] Donn E. Hancher; Sean E. Lambert, *Transportation Research Record*, 2002, 1813(1), 260-274, DOI 10.3141/1813-32

5. Bölüm

Kırmataş Ve Kiremit Tozu Katkılarının Zeminin CBR Davranışı Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Perihan BİÇER¹

1. Giriş

Yol altyapısı, dolgu ve temel zemini uygulamalarında kullanılan doğal zeminler, her zaman istenen mühendislik özelliklerini sağlayamayabilir. Özellikle düşük taşıma kapasitesi, yüksek sıkışabilirlik, su muhtevasına duyarlı davranış ve yetersiz kompaksiyon özellikleri, zeminlerin doğrudan kullanımını sınırlandırabilmektedir. Bu nedenle doğal zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve gerekli durumlarda iyileştirilmesi, geoteknik mühendisliği ve yol mühendisliği uygulamaları açısından önemli bir konudur.

Yol mühendisliği açısından alt zemin ve dolgu malzemelerinin taşıma davranışının değerlendirilmesinde deneysel yöntemler önemli yer tutmaktadır. Dane boyutu dağılımı, plastisite özellikleri, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık gibi parametreler, zeminin sıkışma ve taşıma davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda California Bearing Ratio (CBR) deneyi, sıkıştırılmış zeminlerin ve granüler malzemelerin penetrasyon direncini belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir indeks deneyidir. CBR değerinin yol üstyapısı tasarımında taşıma kapasitesi ve zemin rijitliğiyle ilişkilendirilebilmesi, bu deneyin katkılı zeminlerin değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Haas ve Rodway, 2001).

Doğal zeminlerin mühendislik özelliklerini geliştirmek amacıyla mekanik stabilizasyon, kompaksiyon, katkı malzemesi kullanımı ve fiziksel ya da kimyasal iyileştirme gibi farklı yöntemler uygulanabilmektedir. Bu yöntemlerde temel amaç, zeminin dane düzenini, boşluk yapısını, sıklık durumunu ve dayanım özelliklerini iyileştirerek kullanım amacına daha uygun bir zemin davranışı elde etmektir. Katkı malzemeleriyle yapılan stabilizasyon uygulamalarında katkının etkisi; zeminin başlangıç özelliklerine, katkı türüne,

¹ Dr. Öğretim Üyesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi/ Çorlu Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü/ Çorlu-Tekirdağ
Orcid: 0000-0002-4966-4719

katkı oranına, dane dağılımına ve kompaksiyon koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Nicholson, 2015).

Son yıllarda doğal kaynak tüketiminin azaltılması ve inşaat-yıkıntı atıklarının yeniden değerlendirilmesi amacıyla atık veya geri dönüştürülmüş malzemelerin zemin iyileştirme ve yol altyapısı uygulamalarında kullanımı daha fazla araştırılmaktadır. Bu yaklaşım, hem doğal agrega kullanımının azaltılması hem de depolama alanlarında biriken atıkların mühendislik uygulamalarında yeniden değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Ancak bu tür malzemelerin performansı, yalnızca atık olarak değerlendirilebilir olmalarına değil; dane boyutu dağılımı, su emme kapasitesi, dayanım, gradasyon ve kompaksiyon özelliklerine bağlıdır (Jiménez, 2013).

Kırmataş, köşeli ve pürüzlü yüzey yapısına sahip granüler bir malzeme olması nedeniyle zemin içerisinde daneler arası kenetlenmeyi ve granüler iskelet oluşumunu etkileyebilecek bir katkı olarak değerlendirilebilir. Kiremit tozu ise seramik esaslı, ince daneli ve inşaat-yıkıntı kökenli atık niteliğinde bir malzeme olup, zeminin ince malzeme oranını, boşluk yapısını ve su ihtiyacını değiştirebilecek özelliklere sahiptir. Bu iki katkı malzemesinin farklı fiziksel özelliklere sahip olması, zeminin CBR davranışı üzerinde farklı etkiler oluşturabileceğini düşündürmektedir.

Bu çalışmada, doğal zemin numunesine ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında kırmataş ile %1, %2 ve %3 oranlarında kiremit tozu ilave edilerek katkı türü ve katkı oranının CBR davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Katkılı numunelerden elde edilen CBR değerleri, katkısız doğal zemin numunesinin CBR değeri ile karşılaştırılmıştır. Böylece kırmataş ve kiremit tozu katkılarının zeminin taşıma davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda çalışma, granüler ve seramik esaslı katkıların aynı doğal zemin üzerindeki etkilerini deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. Literatür Değerlendirmesi

Zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi kullanımı, doğal zeminin dane dağılımını, boşluk yapısını, sıkışma davranışını ve taşıma gücünü değiştirebilmektedir. Özellikle yol altyapısı, dolgu ve taban zemini uygulamalarında California Bearing Ratio (CBR) değeri, zeminin taşıma davranışının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir parametredir. Bu nedenle katkılı zeminlerin performansının belirlenmesinde kompaksiyon ve CBR deneyleri birlikte değerlendirilmektedir.

İnşaat ve yıkıntı atıklarının yol altyapısında yeniden kullanımı, hem doğal agrega tüketiminin azaltılması hem de atıkların değerlendirilmesi açısından önem

taşımaktadır. Jiménez (2013), geri dönüştürülmüş agregaların yol uygulamalarındaki kullanımını ele almış ve bu tür malzemelerin fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin yol tabakalarında kullanılabilirlik açısından belirleyici olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Vural (2019), inşaat yıkıntı atığı, kireç ve kaolin karışımlarının CBR değerleri üzerindeki etkisini incelemiş ve inşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirme uygulamalarında değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Kılıç (2020), atık parke taşı ve atık tuğlanın doğal agrega yerine plent-miks temel tabakasında kullanılabilirliğini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada fiziksel özelliklerin yanı sıra Modifiye Proktor, CBR ve esneklik modülü deneyleri yapılmış; atık tuğlanın tek başına kullanımının yeterli olmadığı, atık parke taşının ise doğal agregaya alternatif olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir.

İnşaat ve yıkıntı atıklarının yol altyapısında değerlendirilmesine yönelik çalışmalarda, kırılmış tuğla ve geri dönüştürülmüş agregaların temel/alttemel tabakalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Poon ve Chan (2006), geri dönüştürülmüş beton agregası ile kırılmış kil tuğlası içeren karışımların alttemel malzemesi olarak kullanımını incelemiş; kırılmış kil tuğlası ilavesinin optimum su muhtevasını artırabildiğini ve maksimum kuru yoğunluğu azaltabildiğini belirtmiştir. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş alttemel malzemelerinin CBR değerlerinin yol uygulamaları açısından değerlendirilebilir düzeyde olduğu ifade edilmiştir. Aatheesan vd. (2010) ise kırılmış tuğla ile bazalt kökenli kırmataş karışımlarının kaplama sistemlerindeki performansını incelemiş ve belirli oranlarda kırılmış tuğla içeren kırmataş karışımlarının yüksek CBR değerleri verebildiğini göstermiştir. Bu bulgular, seramik esaslı atık malzemelerin granüler malzemelerle birlikte kullanıldığında yol altyapısı uygulamalarında değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Granüler katkı malzemeleri, zeminlerin dane dağılımını ve sıkışma davranışını etkileyerek taşıma kapasitesinde artış sağlayabilmektedir. Mishra vd. (2019), ince daneli taban zeminlerinin taş tozu ve 10 mm boyutlu iri agrega ile mekanik stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmada taş tozu ve iri agrega ilavesiyle maksimum kuru yoğunluk ve CBR değerlerinin arttığı, optimum su muhtevasının ise azaldığı belirtilmiştir. Bu artış, katkı malzemelerinin plastik olmayan ve köşeli yapısına, dane dağılımını iyileştirmesine ve daneler arası kenetlenmeyi artırmasına bağlıdır. Salehi vd. (2021) ise kırılmış taş atığının çimento ile birlikte kullanılması durumunda CBR değerlerinde artış sağlanabildiğini göstermiştir.

Seramik esaslı atık malzemeler de zemin stabilizasyonunda kullanılan katkıları arasında yer almaktadır. Blayi vd. (2020), yüksek plastisiteli silt zemine %6,

%12, %18, %24 ve %30 oranlarında atık tuğla tozu ilave ederek zeminin geoteknik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Çalışmada Atterberg limitleri, sıkıştırma özellikleri, özgül ağırlık, serbest şişme, serbest basınç dayanımı, CBR ve permeabilite deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre atık tuğla tozu ilavesiyle likit limit, plastik limit, plastisite indeksi, serbest şişme ve permeabilite değerleri azalırken; maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç dayanımı ve CBR değerleri artmıştır.

Salimah vd. (2022), kırmızı tuğla tozu ve kirecin yumuşak zemin stabilizasyonundaki etkisini karşılaştırmış; hem suda bekletilmiş hem de bekletilmemiş CBR değerlerinde katkı oranına bağlı artış elde edildiğini belirtmiştir. Çalışmada özellikle %15 kırmızı tuğla tozu katkısının CBR değerinde belirgin artış sağladığı ifade edilmiştir. Rakh vd. (2025) ise siyah pamuk zemini olarak tanımlanan yüksek plastisiteli, şişme-büzülme potansiyeli yüksek ve montmorillonit içeriği nedeniyle genleşme davranışı gösterebilen killi zemine farklı oranlarda tuğla atığı tozu ilave etmiştir. Çalışmada %10 tuğla tozu oranının CBR açısından uygun olduğu belirtilmiştir. Bu sonuç, seramik esaslı katkılarda katkı oranının önemli olduğunu ve her artan katkı oranının daha yüksek CBR değeri sağlamayabileceğini göstermektedir.

Kiremit tozunun farklı katkı malzemeleriyle birlikte zemin iyileştirme amacıyla kullanımına ilişkin çalışmalardan biri Özbahçeci Gökdeniz ve Bağrıaçık (2024) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, kiremit tozu ve biyopolimer katkılarıyla iyileştirilmiş kil zeminin mukavemet parametreleri incelenmiştir. Çalışmada CBR deneyi yapılmamış olmakla birlikte, kiremit tozunun zemin iyileştirme uygulamalarında değerlendirilebileceğini göstermesi bakımından mevcut çalışma ile ilişkilidir.

Literatürdeki çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, granüler/köşeli katkıların ve seramik esaslı ince daneli atıkların zeminlerin kompaksiyon ve CBR davranışı üzerinde etkili olabileceği görülmektedir. Ancak bu etkinin katkı türüne, katkı oranına, doğal zeminin başlangıç özelliklerine ve deney koşullarına bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle kırmataş ve kiremit tozu katkılarının düşük oranlarda kullanılması durumunda CBR davranışında meydana gelen değişimin deneysel olarak değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

3. Materyal ve Yöntem

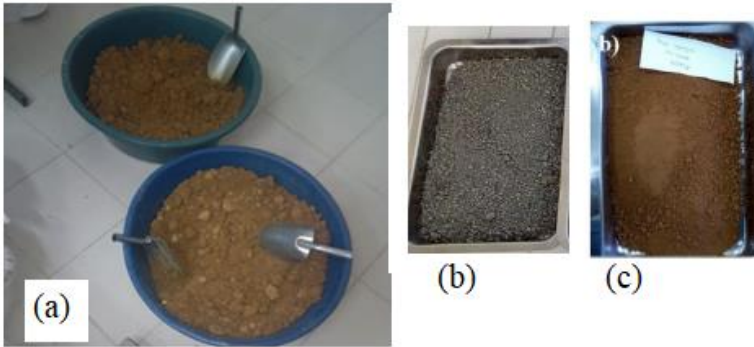
Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan doğal zemin numunesi, katkı malzemeleri, numune hazırlama süreci ve uygulanan laboratuvar deneyleri açıklanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında doğal zemin numunesinin temel mühendislik özellikleri belirlenmiş; daha sonra zemine düşük oranlarda kırmataş

ve kiremit tozu ilave edilerek katkılı numunelerin CBR davranışı değerlendirilmiştir.

3.1. Materyal

Deneyssel çalışmada doğal zemin numunesi, kırmataş ve kiremit tozu olmak üzere üç farklı materyal kullanılmıştır. Doğal zemin numunesi katkısız referans numune olarak değerlendirilmiş; kırmataş granüler katkı malzemesi, kiremit tozu ise seramik esaslı ince daneli katkı malzemesi olarak kullanılmıştır.

Deneyssel çalışmada kullanılan malzemeler Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu çalışmada kiremit tozu ve kırmataş katkıları için 0–5 mm dane boyutu aralığındaki malzemeler tercih edilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan malzemeler: (a) doğal zemin numunesi, (b) kırmataş, (c) kiremit tozu

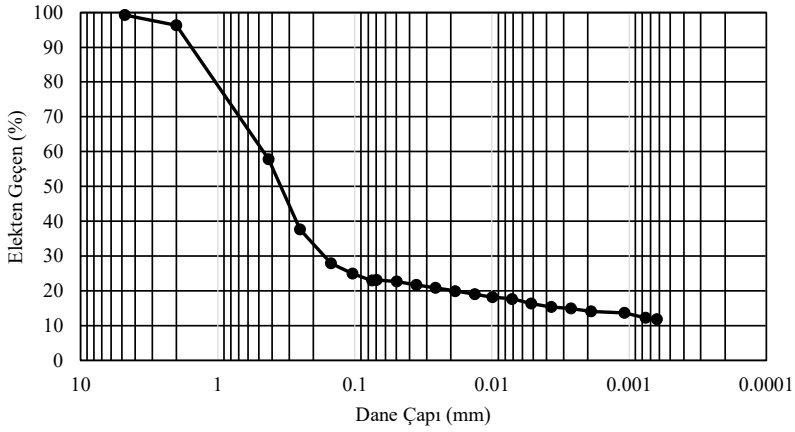
3.1.1. Doğal zemin numunesi

Çalışmada kullanılan doğal zemin numunesi Tekirdağ ili Çorlu ilçesi Hürriyet mahallesi’nden temin edilmiştir. Doğal zemin numunesinin temel mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi, hidrometre deneyi, özgül ağırlık deneyi ve kompaksiyon deneyi yapılmıştır.

Doğal zemin numunesine ait temel mühendislik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Dane boyutu dağılımı, doğal zemin numunesinin kum ağırlıklı bir yapıya sahip olduğunu; bununla birlikte yaklaşık %34 oranında ince dane içerdiğini göstermektedir. Bu durum, zeminin sıkışma davranışı ve CBR değeri üzerinde hem granüler dane yapısının hem de ince dane içeriğinin etkili olabileceğini göstermektedir. Doğal zemin numunesine ait granülometri eğrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Doğal zemin numunesi ve katkı malzemelerine ait temel mühendislik özellikleri

Özellik	Değer	Standart
Doğal zemin Özgül yoğunluk, Gs	2.66	ASTM D854-14
Kırmataş Özgül yoğunluk, Gs	2.42	ASTM D854-14
Kiremit tozu Özgül yoğunluk, Gs	1.87	ASTM D854-14
Optimum su muhtevası, w_{opt} (%)	9.96	TS 1900-1; ASHTO T180
Maksimum kuru yoğunluk, ρ , g/cm ³	2.25	TS 1900-1; ASHTO T180
Çakıl (%)	1.25	ASTM D6913/D6913M-17
Kum (%)	64.62	ASTM D6913/D6913M-17
Silt (%)	9.8	ASTM D7928-17
Kil (%)	24.3	ASTM D7928-17



Şekil 3.2. Doğal zemin numunesine ait granülometri eğrisi

3.1.2. Kiremit tozu

Kiremit, killi toprağın ham toprakla karıştırılarak pişirilmesi veya sadece killi toprağın pişirilmesi ile oluşan bir yapı malzemesidir. Türkiye’de her yıl yaklaşık 250000 ton kiremit kırığı atığı oluşmaktadır. Kiremit kırıklarının bir kısmı üretime katılırken büyük bir kısmı depolanmaktadır. Çevre kirliliği yapan bu malzemelerin ekonomiye geri kazandırılması yararlı olacaktır. Bu çalışmada kiremit tozu, seramik esaslı ince daneli katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Kiremit tozu, atık kiremit parçalarının kırılması ile elde edilerek, deneysel çalışmada doğal zemine düşük oranlarda ilave edilmiştir. Deneysel çalışmada, katkı malzemesi olarak 0–5 mm dane boyutu aralığına sahip kiremit tozu kullanılmıştır.

Kiremit tozunun ince daneli yapısı nedeniyle doğal zemindeki boşluk yapısını, su ihtiyacını ve sıkışma davranışını etkileyebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle

kiremit tozu katkısının CBR davranışı üzerindeki etkisi, katkısız doğal zemin numunesi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

3.1.3. Kırmataş

Doğal agrega olarak bazalt kökenli kırmataş kullanılmıştır. Bazalt, doğada yaygın olarak bulunan volkanik kayalardan biri olup lav akıntıları şeklinde geniş alanlarda yayılım gösterebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan bazalt agregası, Çorlu ilçesindeki Karatepe taş ocaklarından temin edilmiştir.

Kırmataş, deneysel çalışmada granüler katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak 0–5 mm dane boyutu aralığına sahip kırmataş tercih edilmiştir. Kırmataşın köşeli ve pürüzlü dane yapısının, zemin içerisinde daneler arası kenetlenmeyi artırabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle kırmataş katkısı, doğal zeminin sıkışma ve taşıma davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla düşük oranlarda karışıma ilave edilmiştir.

3.2. Numune Hazırlama ve Karışım Oranları

Deney programında katkısız doğal zemin numunesi referans numune olarak kullanılmıştır. Katkılı numuneler hazırlanırken kiremit tozu ve kırmataş, doğal zemin numunesine kuru ağırlık esasına göre ilave edilmiştir. Karışımlar hazırlanırken katkı malzemelerinin zemin içerisinde homojen şekilde dağılmasına dikkat edilmiştir.

Numune kodlamasında DZ doğal zemini, KT kiremit tozunu ve KM kırmataşı ifade etmektedir. Deney programında hazırlanan numuneler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Hazırlanan numuneler, katkı türü ve katkı oranına göre gruplandırılmıştır. Böylece kiremit tozu ve kırmataş katkılarının doğal zemin üzerindeki etkileri, katkısız doğal zemin numunesi ile karşılaştırılabilecek şekilde düzenlenmiştir.

Çizelge 3.2. Deney programında hazırlanan numuneler

Numune Kodu	Numune İçeriği	Katkı oranı (%)
DZ	Doğal zemin	0
DZ+KT-1	Doğal zemin+kiremit tozu	1
DZ+KT-2	Doğal zemin+kiremit tozu	2
DZ+KT-3	Doğal zemin+kiremit tozu	3
DZ+KM-1	Doğal zemin+kırmataş	1
DZ+KM-2	Doğal zemin+kırmataş	2
DZ+KM-3	Doğal zemin+kırmataş	3

3.3. Deneysel Yöntem

Doğal zemin numunesinin temel mühendislik özelliklerini belirlemek ve katkılı numunelerin taşıma davranışını değerlendirmek amacıyla laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda doğal zemin numunesi üzerinde elek analizi, hidrometre analizi, özgül ağırlık ve kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra katkısız doğal zemin numunesi ile kiremit tozu ve kırmataş katkılı numuneler üzerinde CBR deneyleri yapılmıştır. Doğal zemin numunesinin kıvam limitlerini belirlemek amacıyla likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmaya çalışılmıştır. Ancak numune, deney sırasında yeterli plastik davranış göstermemiş; plastik limit deneyinde 3 mm çapında sürekli iplik oluşturulamamış ve likit limit deneyinde tekrarlanabilir kapanma davranışı elde edilememiştir. Bu nedenle zemin, kıvam limitleri açısından plastik olmayan veya düşük plastisiteli davranış gösteren bir malzeme olarak değerlendirilmiş ve Atterberg limitleri deneysel sonuçlar kapsamında kullanılmamıştır.

Deneysel süreç; doğal zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, katkılı numunelerin hazırlanması ve hazırlanan numunelerin taşıma davranışının değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Bu düzenleme ile katkı türü ve katkı oranının zeminin CBR davranışı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.3.1. Elek analizi ve hidrometre deneyi

Elek analizi, zeminlerin No.200 (0.075 mm) elek üzerinde kalan iri kısmına, hidrometre deneyi ise No.200 elek altında kalan ince kısmına uygulanır. Deneyde kullanılacak numune, öncelikle 1000 gr. alınarak, etüvde 110 °C sıcaklık altında kurutulup daha sonra sırasıyla 4, 10, 40, 60, 100, 150, 200 No'lu eleklerden elenmiş ve 200 No'lu elek altında kalan numune üzerinde hidrometre deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak doğal zeminin çakıl, kum, silt ve kil oranları belirlenmiş ve granülometri eğrisi oluşturulmuştur.

Dane boyutu dağılımına ait sayısal değerler Çizelge 3.1'de, granülometri eğrisi ise Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu veriler, doğal zemin numunesinin başlangıç özelliklerinin tanımlanmasında ve katkılı numunelerin davranışının yorumlanmasında referans alınmıştır.

3.3.2. Özgül ağırlık deneyi

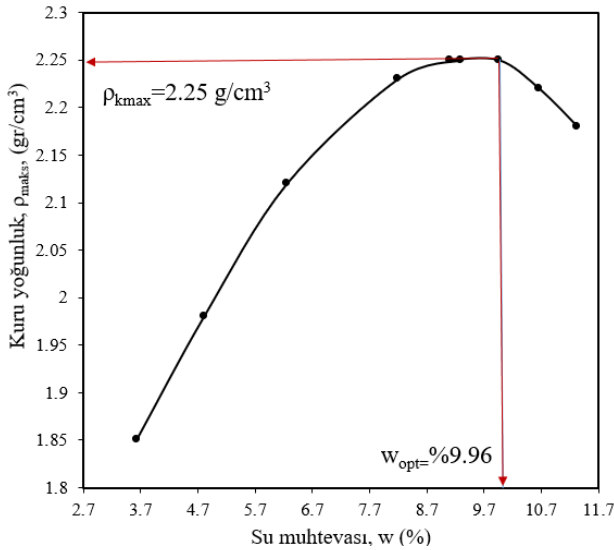
Özgül ağırlık (Gs), dane birim hacim ağırlığının suyun birim hacim ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. İnce daneli zeminler için küçük hacimli piknometre adı verilen cam şişeler kullanılır. Numuneler 110 °C sıcaklıkta kurutulmuş ve özgül ağırlık ASTM standartlarına uygun olarak piknometre yöntemiyle belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, doğal zeminin, kırmataş ve

kiremit tozunun özgül ağırlığı 20 °C’de sırasıyla 2.66, 2.42 ve 1.87 olarak bulunmuştur.

3.3.3. Kompaksiyon deneyi

Doğal zemin numunesinin sıkışma özelliklerini belirlemek amacıyla TS 1900-1 standardına uygun olarak Modifiye Proktor deneyi yapılmıştır. Deneyde farklı su muhtevalarında hazırlanan zemin numuneleri kompaksiyon kalıbına tabakalar halinde yerleştirilmiş ve her tabaka tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır. Her deneme sonunda numunenin yaş birim hacim ağırlığı ve su muhtevası belirlenmiş; bu değerler kullanılarak kuru birim hacim ağırlık hesaplanmıştır.

Farklı su muhtevalarına karşılık gelen kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak doğal zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğri yardımıyla doğal zeminin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Deney sonucunda optimum su muhtevası %9.96, maksimum kuru yoğunluk ise 2.25 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Doğal zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi Şekil 3.3’te verilmiştir.



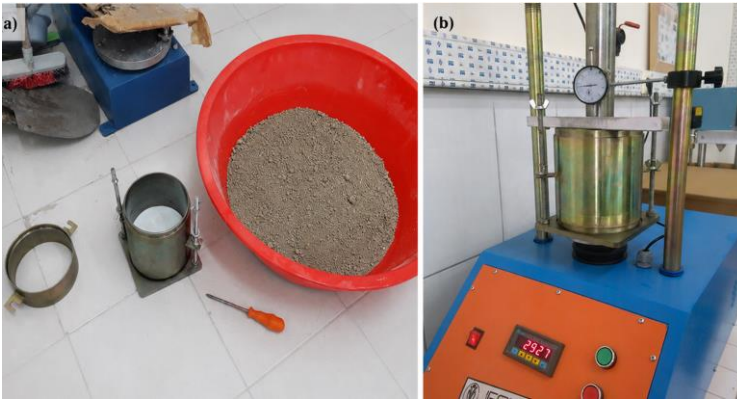
Şekil 3.3. Doğal zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi

3.3.4. CBR deneyi

Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), sıkıştırılmış zemin numunesinin standart bir piston altında gösterdiği penetrasyon direncinin değerlendirilmesine dayanan bir deneydir. Deneyde, belirli çapta bir pistonun zemin numunesine sabit hızla batırılması sırasında oluşan yük değerleri ölçülmekte ve yük–penetrasyon ilişkisi elde edilmektedir. CBR değeri, ölçülen yükün standart kırılma malzeme için

tanımlanan referans yüke oranlanmasıyla yüzde olarak hesaplanmaktadır. Katkısız ve katkılı zemin numunelerinin taşıma davranışını belirlemek amacıyla TS 1900-2 standardına uygun olarak California Bearing Ratio (CBR) deneyi yapılmıştır.

Deney programında katkısız doğal zemin numunesi ile %1, %2 ve %3 kiremit tozu katkılı ve %1, %2 ve %3 kırmataş katkılı numuneler hazırlanmıştır. Katkı malzemeleri doğal zemin ile homojen şekilde karıştırılmış, hazırlanan karışımlar CBR kalıbına yerleştirilerek sıkıştırılmış ve deney cihazında yük-penetrasyon ilişkileri elde edilmiştir. Şekil 3.4'te, CBR deneyine hazır hale getirilen numune örneği ve deneyde kullanılan CBR deney cihazı gösterilmiştir.

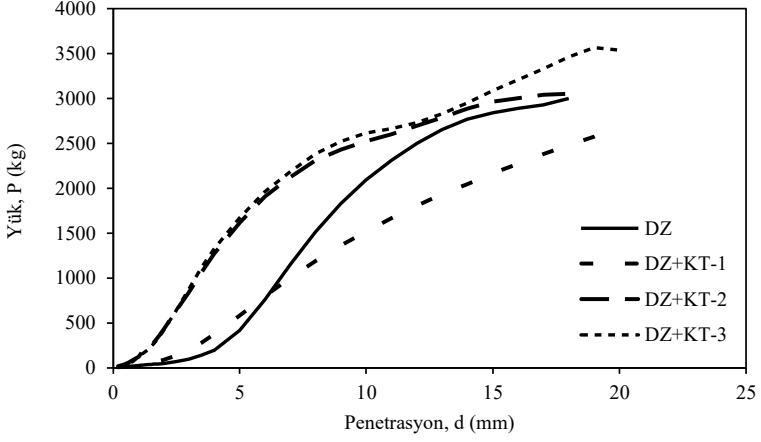


Şekil 3.4. a) Kompaksiyon deneyi için numune hazırlama ve deney kalıbı b) CBR deney aleti ve kalıp

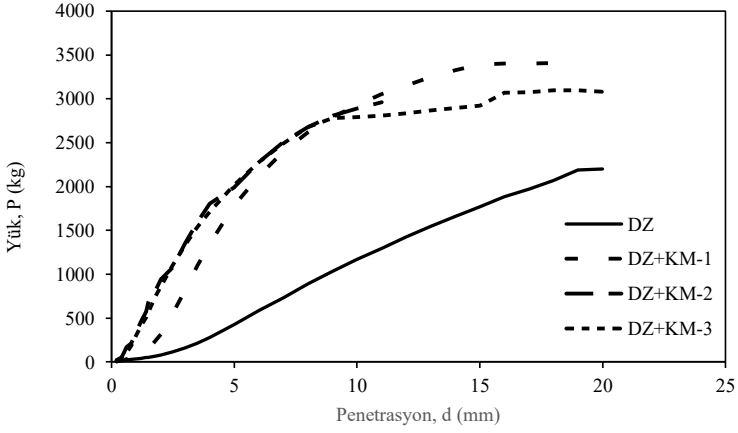
4. Bulgular ve Değerlendirme

Doğal zemin numunesine ait Modifiye Proktor deneyinden elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 3.3'te verilmiştir. Deney sonucunda doğal zeminin optimum su muhtevası %9,96, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ise 2,25 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu değerler, katkılı CBR numunelerinin hazırlanmasında referans alınmıştır. Bu nedenle çalışma kapsamında kompaksiyon deneyi, katkıların sıkışma parametreleri üzerindeki etkisini belirlemekten ziyade, CBR deneyleri için başlangıç sıkışma koşullarının tanımlanması amacıyla kullanılmıştır.

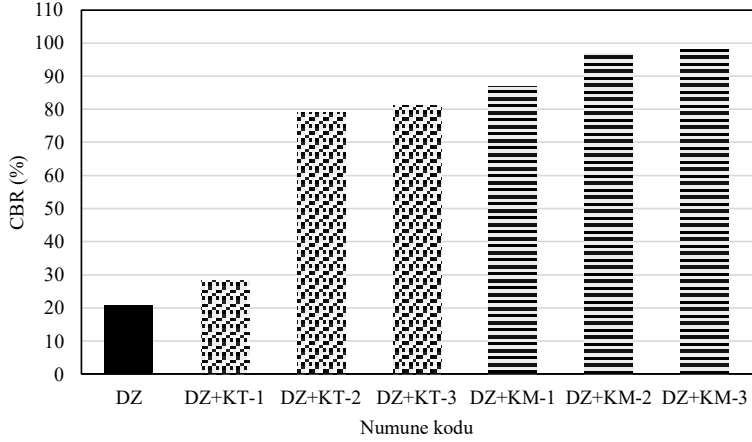
Katkısız doğal zemin numunesi ile kırmataş ve kiremit tozu katkılı numunelere ait yük-penetrasyon eğrileri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Katkısız ve katkılı numunelere ait CBR değerleri ise Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Doğal zemin ve kiremit tozu katkılı numunelere ait yük–penetrasyon eğrileri



Şekil 4.2. Doğal zemin ve kırmataş katkılı numunelere ait yük–penetrasyon eğrileri



Şekil 4.3. Katkısız ve katkılı numunelere ait CBR değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.1. Katkısız ve katkılı numunelere ait CBR değerleri

Numune kodu	Katkı oranı (%)	CBR (%)	Katkısız zemine göre artış (%)
DZ	0	20.80	-
DZ+KT-1	1	28.40	36.54
DZ+KT-2	2	79.00	279.81
DZ+KT-3	3	81.00	289.42
DZ+KM-1	1	87.00	318.27
DZ+KM-2	2	97.00	366.35
DZ+KM-3	3	98.00	371.15

Katkısız doğal zemin numunesinin CBR değeri %20,80 olarak belirlenmiştir. Kiremit tozu katkılı numunelerde CBR değeri %1 katkı oranında %28,40'a, %2 katkı oranında %79,00'a ve %3 katkı oranında %81,00'e yükselmiştir. Bu sonuç, kiremit tozu katkısının özellikle %2 oranından itibaren CBR davranışında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Ancak %2'den %3'e geçildiğinde CBR değerindeki artışın sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, kiremit tozu katkısının bu zemin için %2 oranından sonra CBR davranışına sağladığı ek etkinin azaldığını göstermektedir.

Blayı vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada da atık tuğla tozu katkısının CBR değerini artırdığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada kullanılan katkı oranları daha düşük olmasına rağmen, kiremit tozu katkısıyla CBR değerinde artış elde edilmesi, seramik esaslı atık malzemelerin zemin taşıma davranışını iyileştirebileceğini gösteren literatür bulgularıyla aynı yöndedir. Ancak zemin

türü, katkı oranı ve numune hazırlama koşulları farklı olduğundan sonuçlar sayısal büyüklük olarak değil, davranış eğilimi açısından karşılaştırılmalıdır.

Kırmataş katkılı numunelerde CBR değerleri %1, %2 ve %3 katkı oranları için sırasıyla %87,00, %97,00 ve %98,00 olarak elde edilmiştir. Kırmataş katkısının %1 oranında dahi CBR değerinde belirgin bir artış sağlaması, granüler katkının penetrasyon direnci üzerindeki etkisinin kiremit tozuna göre daha baskın olduğunu göstermektedir. Bu durum, kırmataşın köşeli ve pürüzlü dane yapısının zemin içinde mekanik kenetlenmeyi artırmasıyla açıklanabilir.

Mishra vd. (2019) çalışmasında taş tozu ve iri agrega ilavesiyle CBR değerlerinde artış elde edilmiş ve bu artış katkı malzemelerinin plastik olmayan, köşeli ve granüler yapısıyla ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada kırmataş katkısıyla elde edilen artış da aynı mekanik davranışla uyumludur. Bununla birlikte, Mishra vd. çalışmasında kullanılan katkı oranları ve zemin türleri farklı olduğundan, mevcut sonuçlar doğrudan sayısal karşılaştırma yerine mekanik davranış benzerliği açısından değerlendirilmelidir.

Kiremit tozu ve kırmataş katkıları birlikte değerlendirildiğinde, her iki katkının da katkısız doğal zemine göre CBR değerini artırdığı görülmektedir. Ancak kırmataş katkısı, düşük katkı oranlarında daha yüksek CBR artışı sağlamıştır. Kiremit tozu katkısında ise en belirgin artış %1'den %2'ye geçişte meydana gelmiş, %3 katkı oranında artış sınırlı kalmıştır. Bu sonuçlar, katkı türünün zeminin CBR davranışı üzerinde katkı oranı kadar etkili olduğunu göstermektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, doğal zemin numunesine düşük oranlarda kırmataş ve kiremit tozu ilave edilerek katkı türü ve katkı oranının CBR davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Dane boyutu dağılımına göre doğal zemin numunesinin kum ağırlıklı bir yapıya sahip olduğu ve yaklaşık %34 oranında ince dane içerdiği belirlenmiştir. Modifiye Proktor deneyi sonucunda doğal zeminin optimum su muhtevası %9,96, maksimum kuru yoğunluk ise 2,25 g/cm³ olarak elde edilmiştir.

Katkısız doğal zemin numunesinin CBR değeri %20,80 olarak belirlenmiştir. Kiremit tozu katkılı numunelerde CBR değeri %1, %2 ve %3 katkı oranları için sırasıyla %28,40, %79,00 ve %81,00 olarak elde edilmiştir. Kiremit tozu katkısında en belirgin artışın %1'den %2 katkı oranına geçişte meydana geldiği, %2'den %3'e geçildiğinde ise artışın sınırlı kaldığı görülmüştür.

Kırmataş katkılı numunelerde CBR değerleri %1, %2 ve %3 katkı oranları için sırasıyla %87,00, %97,00 ve %98,00 olarak belirlenmiştir. Kırmataş

katkısının düşük oranlarda dahi doğal zeminin CBR değerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür.

Katkı türleri karşılaştırıldığında, kırmataş katkısının CBR değeri üzerindeki etkisinin kiremit tozuna göre daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kırmataşın granüler, köşeli ve pürüzlü dane yapısının zemin içerisinde mekanik kenetlenmeyi artırmasıyla ilişkilendirilebilir.

Genel olarak, düşük oranlı kırmataş ve kiremit tozu katkılarının doğal zeminin CBR davranışını iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmada katkılı karışımlar için ayrı kompaksiyon eğrileri oluşturulmadığından, katkıların kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisi ayrıca değerlendirilmemiştir. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda farklı katkı oranları, farklı zemin türleri, katkılı karışımlara ait kompaksiyon özellikleri ve uzun dönem davranışın birlikte incelenmesi önerilmektedir.

Kaynakça

- AASHTO. (2018). Standard method of test for moisture–density relations of soils using a 4.54-kg rammer and a 457-mm drop (AASHTO T 180). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ASTM International. (2014). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer (ASTM D854-14). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2017a). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis (ASTM D6913/D6913M-17). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2017b). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis (ASTM D7928-17). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aatheesan, T., Arulrajah, A., Bo, M. W., Vuong, B., & Wilson, J. (2010). Crushed brick blends with crushed rock for pavement systems. *Waste and Resources Management*, 163, 29–35.
- Blayi, R. A., Sherwani, A. F. H., Ibrahim, H. H., & Abdullah, S. J. (2020). Stabilization of high-plasticity silt using waste brick powder. *SN Applied Sciences*, 2, Article 1989. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03814-8>
- Haas, R., & Rodway, B. L. (2001). Pavement design. In R. K. Rowe (Ed.), *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook* (pp. 361–393). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1729-0_13
- Jiménez, J. R. (2013). Recycled aggregates (RAs) for roads. In F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding, & J. de Brito (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 351–377). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.3.351>
- Kılıç, B. (2020). İnşaat ve yıkıntı atıklarının plent-miks temel tabakasında kullanılabilirliğinin deneysel olarak araştırılması [Yüksek lisans tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi].
- Mishra, S., Sachdeva, S. N., & Manocha, R. (2019). Subgrade soil stabilization using stone dust and coarse aggregate: A cost effective approach. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5, Article 20. <https://doi.org/10.1007/s40891-019-0171-0>
- Nicholson, P. G. (2015). *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Butterworth-Heinemann.

- Özbahçeci Gökdeniz, İ., & Bağrıaçık, B. (2024). Kiremit tozu ve biyopolimerle iyileştirilmiş kil zeminin mukavemet parametrelerinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 39(3), 771–784. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1560191>
- Poon, C. S., & Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. Construction and Building Materials, 20, 578–585.
- Rakh, A. A., Jadhav, A. A., & Deshmukh, A. A. (2025). Soil stabilization by using brick waste powder. Materials Research Proceedings, 48, 577–586. <https://doi.org/10.21741/9781644903414-63>
- Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M., & Nasri, M. (2021). Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste. KSCE Journal of Civil Engineering, 25, 1974–1984. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0953-5>
- Salimah, A., Hazmi, M., Hasan, M. F. R., Agung, P. A. M., & Yelvi. (2022). A comparative study of red brick powder and lime as soft soil stabilizer [version 2; peer review: 2 approved, 2 approved with reservations]. F1000Research, 10, Article 777. <https://doi.org/10.12688/f1000research.27835.2>
- Türk Standardları Enstitüsü. (2006a). TS 1900-1: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri — Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2006b). TS 1900-2: İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri — Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü.
- Vural, İ. (2019). İnşaat yıkıntı atıklarının zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği. Academic Platform - Journal of Engineering and Science, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.21541/apjes.437288>

6. Bölüm

Düşük Güçlü Entegre Devre Tasarım Teknikleri ve Uygulamaları

Muhammed Remzi SARIOĞLU¹, Mete ÖZBALTAN²

1. GİRİŞ

Günümüzde yarı iletken teknolojilerindeki hızlı gelişim, entegre devrelerin performansını önemli ölçüde artırmış ve daha karmaşık sistemlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler doğrultusunda, sistemlerin daha küçük boyutlarda, daha yüksek hızlarda ve daha düşük enerji tüketimi ile çalışması beklenmektedir. Günümüzde entegre devre tasarımında, yüksek doğruluk ve verimlilik sağlayan aynı zamanda düşük güç tüketen sistemlere olan ihtiyaç önemli ölçüde artmıştır (Baysal, 2025). Özellikle mobil cihazlar, haberleşme sistemleri ve gömülü uygulamaların yaygınlaşması, enerji verimliliğini tasarım sürecinin temel bir parçası haline getirmiştir. Bu durum, enerji tüketimi problemini yalnızca teknik bir konu olmaktan çıkararak sistem tasarımının merkezine yerleştirmiştir.

Teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak artan transistör yoğunluğu ve işlem kapasitesi, beraberinde güç tüketimi ve ısı yönetim gibi önemli problemleri de ortaya çıkarmıştır. Bu bağlamda, güç tüketimi modern entegre devrelerin en kritik sınırlayıcı faktörlerinden biri haline gelmiştir. CMOS teknolojisinin uzun yıllardır ölçeklenmesi, daha yüksek performans ve daha düşük güç tüketimi hedefleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir (Roy ve ark., 2003). Ancak bu ölçeklenme süreci, bazı yeni problemleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle eşik geriliminin düşürülmesi ile birlikte alt eşik sızıntı akımlarının önemli ölçüde arttığı görülmektedir (Roy ve ark., 2003). Bu durum, güç tüketiminin kontrol edilmesini daha zor hale getirmekte ve yeni tasarım yaklaşımlarını gerekli kılmaktadır.

Batarya ile çalışan ve taşınabilir ortamlarda yoğun hesaplama gerektiren uygulamaların ortaya çıkması, düşük güç tasarım yaklaşımlarına olan ilgiyi artırmıştır (Chandrakasan ve ark., 1992). Taşınabilir sistemlerin doğası gereği, cihazların boyut, ağırlık ve güç tüketimi açısından belirli kısıtlar altında

¹ İzmir Bakırçay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0001-9647-112X, e-posta: 6017094@bakircay.edu.tr

² Doç. Dr., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0002-3215-6363, e-posta: mete.ozbaltan@bakircay.edu.tr

çalışması gerekmektedir ve bu durum tasarım sürecini doğrudan etkilemektedir (Chandrakasan ve ark., 1992). Elektronik sistemlerin taşınabilir olarak kullanılabilme isteğinin artmasıyla birlikte, kullanılan batarya miktarının devrelerin güç tüketimine doğrudan bağlı olduğu görülmektedir (Chandrakasan ve Brodersen, 1995). Bu nedenle, güç tüketimi yalnızca teknik bir parametre değil, aynı zamanda sistemin kullanılabilirliğini belirleyen temel bir faktör haline gelmiştir. Günümüzde portatif cihazların sayısındaki artış, donanımsal olarak gerçekleştirilecek sistemlerde güç tüketiminin kritik bir tasarım kriteri haline gelmesine neden olmuştur (Yıldız, 2010).

Bununla birlikte, kablosuz sensör ağları gibi enerji kısıtlı sistemlerde her bir düğümün sınırlı enerji kaynağına sahip olması, düşük güç tüketimli tasarım yaklaşımlarının önemini daha da artırmaktadır. Günümüzde literatürde düşük güç tasarımına yönelik çalışmaların hem devre seviyesinde hem de sistem seviyesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle farklı mimari yaklaşımlar, adaptif güç yönetimi teknikleri ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik optimizasyon yöntemleri üzerine önemli araştırmalar yapılmaktadır. Ayrıca kablosuz sensör ağları gibi dağıtık sistemlerde, her bir düğümün sınırlı enerji kaynağına sahip olması, enerji verimliliğini ön plana çıkarmaktadır ve bu enerji kısıtı çoğunlukla batarya kapasitesi ile belirlenmektedir (Calhoun ve ark., 2005). Bu tür sistemlerde enerji tüketiminin azaltılması, yalnızca sistem ömrünü uzatmakla kalmayıp aynı zamanda sistemin sürdürülebilirliğini de doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve enerji kısıtlı uygulamaların yaygınlaşması, düşük güç tüketimli sistem-çip çözümlerine olan ihtiyacı daha da artırmıştır (Lanuzza ve ark., 2022). Bu gelişmeler doğrultusunda, literatürde yer alan çalışmaların büyük bir kısmı, enerji verimliliği ile performans arasındaki dengeyi sağlayacak yeni nesil tasarım teknikleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

Sonuç olarak, düşük güç tüketimli entegre devre tasarımı günümüzde yalnızca bir tercih değil, aynı zamanda zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle, hem devre seviyesinde hem de sistem seviyesinde güç optimizasyonuna yönelik çalışmalar giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, düşük güçlü entegre devre tasarım teknikleri ve uygulamaları detaylı bir şekilde incelenmekte ve farklı tasarım yaklaşımlarının performans ve enerji verimliliği üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, literatürde yer alan temel yaklaşımlar değerlendirilerek, düşük güç tasarımına yönelik güncel teknikler sistematik bir şekilde sunulmaktadır.

2. DÜŞÜK GÜÇ TASARIMINA İLİŞKİN TEMEL BİLGİLER

Entegre devrelerde güç tüketimi, sistem performansını ve enerji verimliliğini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. CMOS devrelerin toplam güç tüketimi genel olarak dinamik güç, kısa devre gücü ve sızıntı (statik) güç bileşenlerine ayrılabilir. Dinamik güç tüketimi ise devre içerisindeki kapasitif yüklerin sürekli olarak şarj ve deşarj edilmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. CMOS devrelerde güç kaybının en baskın bileşeni, özellikle anahtarlama faaliyetlerinin yoğun olduğu durumlarda ortaya çıkan kapasitif anahtarlama gücüdür. (Rabaey ve ark., 2003). Bu güç bileşeni, besleme gerilimi, anahtarlama frekansı, yük kapasitansı ve anahtarlama aktivite faktörü gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Burada anahtarlama aktivite faktörü, bir saat periyodu içerisinde gerçekleşen geçiş olasılığını temsil etmektedir. Ayrıca besleme geriliminin dinamik güç üzerinde karesel bir etkiye sahip olması, gerilim ölçekleme tekniklerinin güç azaltımında neden bu kadar etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Statik güç tüketimi ise devre herhangi bir anahtarlama gerçekleştirilmeden oluşan sızıntı akımlarından kaynaklanmakta olup, bu akımlar alt eşik sızıntısı, kapı oksit sızıntısı ve birleşim sızıntısı gibi bileşenleri içermektedir. Teknolojinin daha küçük boyutlara ölçeklenmesiyle birlikte bu sızıntı bileşenleri artış göstermiş ve toplam güç tüketimi içerisinde önemli bir paya sahip hale gelmiştir (Roy ve ark., 2003). Bu sızıntı akımları; alt eşik sızıntısı, kapı oksit sızıntısı ve birleşim sızıntısı gibi farklı mekanizmalarla ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle düşük güç tasarımında yalnızca dinamik bileşenlerin değil, aynı zamanda sızıntı akımlarının da detaylı şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

CMOS devrelerde güç tüketimi genel olarak dinamik ve statik bileşenler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Dinamik güç tüketimi, devre içerisindeki kapasitif yüklerin anahtarlama faaliyetleri sırasında şarj ve deşarj edilmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında, kısa devre gücü ise giriş sinyallerinin geçiş anlarında hem NMOS hem de PMOS transistörlerin aynı anda iletimde bulunması nedeniyle oluşmaktadır. Bu durum özellikle geçiş sürelerinin uzun olduğu durumlarda güç kayıplarını artırabilmektedir (Pedram, 1996). Kısa devre gücü çoğu zaman dinamik güce göre daha küçük bir bileşen olsa da, yüksek frekanslı devrelerde ve kötü tasarlanmış giriş geçişlerinde önemli hale gelebilmektedir. Bununla birlikte, teknolojinin ölçeklenmesi ile birlikte besleme geriliminin azaltılması dinamik gücü düşürse de, sızıntı akımlarının artması toplam güç tüketimi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu durum, modern entegre devre tasarımında güç optimizasyonunun çok boyutlu bir problem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, güç tüketiminin yalnızca devre seviyesinde değil, aynı zamanda zamanlama ve

sinyal bütünlüğü gibi diğer tasarım parametreleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Düşük güç tasarımına yönelik yaklaşımlar incelendiğinde, güç tüketimini azaltmaya yönelik tekniklerin farklı soyutlama seviyelerinde ele alındığı görülmektedir. Bu teknikler genel olarak devre seviyesi, mimari seviye ve sistem seviyesi olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Varala, 2025). Devre seviyesinde uygulanan yöntemler, transistör düzeyinde gerçekleştirilen gerilim ve eşik ayarlamaları gibi doğrudan fiziksel parametreler üzerinde etkili olan teknikleri içermektedir. Bu seviyede yapılan iyileştirmeler, güç tüketiminin temel bileşenlerini doğrudan hedef alması açısından önemli avantaj sağlamaktadır.

Mimari seviyede ise veri yolu düzenlemeleri, paralelleştirme ve işlem sıralamasının yeniden yapılandırılması gibi yöntemler kullanılarak daha düşük enerji ile aynı işlemlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşımlar, sistemin çalışma mantığını değiştirerek güç verimliliğini artırmaya odaklanmaktadır. Sistem seviyesinde ise dinamik voltaj ve frekans ölçekleme, güç kapama ve uyku modları gibi teknikler kullanılarak enerji tüketimi çalışma koşullarına bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. Bu tür teknikler, özellikle düşük güç gereksinimi olan uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır (Chandrakasan ve Brodersen, 1995). Bu teknikler özellikle işlemci ve gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılmakta ve önemli enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu noktada tasarımcılar genellikle farklı seviyelerdeki teknikleri birlikte kullanarak en iyi sonucu elde etmeye çalışmaktadır.

Enerji verimliliği kavramı, düşük güç tasarım yaklaşımlarının temelini oluşturan önemli bir kriter olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde özellikle işlem başına harcanan enerji miktarı, sistem performansının değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca toplam güç tüketimine odaklanmak yerine, gerçekleştirilen işlem miktarı ile tüketilen enerji arasındaki ilişkiyi dikkate alarak daha kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır (Horowitz, 2014). Enerji verimliliğinin artırılması, özellikle batarya ile çalışan sistemlerde daha uzun çalışma süresi sağlarken, enerji hasadı tabanlı sistemlerde de sürdürülebilirliği artırmaktadır. Bununla birlikte, düşük güç tasarımında performans ve enerji tüketimi arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Çok düşük güç tüketimi hedeflendiğinde sistem performansı düşebilirken, yüksek performans hedefi ise güç tüketimini artırabilmektedir. Bu nedenle tasarım sürecinde çok kriterli optimizasyon yöntemleri kullanılmakta ve farklı tasarım hedefleri arasında denge kurulmaktadır. Ayrıca günümüzde enerji verimliliği, yalnızca donanım seviyesinde değil, yazılım ve algoritma seviyesinde de ele alınmaktadır.

Modern entegre devre tasarımında güç tüketimi, yalnızca teknik bir parametre değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel etkileri olan bir faktör olarak da değerlendirilmektedir. Yüksek güç tüketimi, enerji maliyetlerini artırmakta ve özellikle büyük ölçekli veri merkezlerinde önemli bir problem haline gelmektedir. Bunun yanı sıra, artan enerji tüketimi çevresel sürdürülebilirlik açısından da olumsuz etkiler doğurmaktadır. Bu nedenle düşük güç tasarım yaklaşımları, yalnızca mühendislik açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda geliştirilen yeni nesil teknolojiler, daha az enerji ile daha fazla işlem yapabilen sistemlerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak, düşük güç tasarımı günümüzde çok disiplinli bir araştırma alanı haline gelmiş ve farklı mühendislik alanlarının ortak çalışma konusu olmuştur.

3. DÜŞÜK GÜÇLÜ ENTEGRE DEVRE TASARIM TEKNİKLERİ ve UYGULAMALARI

Düşük güç VLSI devreleri, son yıllarda hem akademik çalışmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle enerji verimliliğine olan ihtiyacın artması, düşük güç tasarım tekniklerinin daha fazla önem kazanmasına neden olmuştur (Harika ve ark., 2024). Bu bağlamda, düşük güç tasarım yaklaşımları yalnızca teorik olarak değil, aynı zamanda gerçek devre uygulamalarında da aktif olarak kullanılmaktadır.

Birçok modern uygulama, enerji açısından bağımsız ve küçük boyutlu sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Bu tür sistemlerde, güç tüketiminin azaltılması doğrudan sistemin çalışma süresi ve performansı ile ilişkilidir (Alioto, 2012). Bu nedenle, düşük güç tasarımı yalnızca bir optimizasyon problemi değil, aynı zamanda sistem gereksinimlerini belirleyen temel bir faktör olarak değerlendirilmektedir.

Düşük güç tasarım teknikleri uygulama alanına göre farklılık göstermekle birlikte, genellikle devre ve sistem seviyesinde birlikte ele alınmaktadır. Devre seviyesinde gerçekleştirilen optimizasyonlar, güç tüketiminin temel bileşenlerini doğrudan hedef alırken, sistem seviyesinde uygulanan teknikler enerji yönetimini daha geniş bir perspektifte ele almaktadır. Bu çok katmanlı yaklaşım, farklı tekniklerin birlikte kullanılması ile daha etkili sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Özellikle düşük güç analog ve sayısal devre tasarımlarında, toplam güç tüketiminin devre blokları arasında dengeli bir şekilde dağıtılması hedeflenmektedir. Tasarım sürecinde her bir alt bloğun dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, sistemin genel güç performansını doğrudan etkilemektedir.

(Parsnejad, 2014). Benzer şekilde, bellek devrelerinde güç tüketiminin azaltılması, özellikle batarya ile çalışan sistemlerde kritik bir gereksinim olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür devrelerde kullanılan yapıların ve alt bileşenlerin güç açısından optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır (Üstündağ, 2015).

Güncel düşük güç tasarım yaklaşımlarında, voltage scaling, clock gating ve power gating gibi teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler sayesinde, kullanılmayan devre bloklarının devre dışı bırakılması ve anahtarlama faaliyetlerinin azaltılması mümkün olmaktadır (Harika ve ark., 2024). Ayrıca mimari seviyede gerçekleştirilen optimizasyonlar ve paralel yapıların kullanımı, güç tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayan önemli yaklaşımlar arasında yer almaktadır (Mohaghegh, 2020).

3.1. Devre Seviyesi Teknikler

Entegre devrelerde güç tüketimini azaltmaya yönelik en temel yaklaşımlar devre seviyesinde gerçekleştirilmektedir. Çünkü güç tüketimi doğrudan transistörlerin çalışma prensiplerine bağlıdır ve bu seviyede yapılan değişiklikler sistemin genel enerji performansını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle düşük güç tasarımında ilk olarak devre düzeyinde kullanılan tekniklerin incelenmesi gerekmektedir.

Devre seviyesinde güç tüketimi genel olarak dinamik güç, statik güç ve kısa devre gücü olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. Özellikle dijital CMOS devrelerde dinamik güç tüketimi çoğu durumda baskın bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden birçok düşük güç tekniği doğrudan dinamik güç tüketimini azaltmaya odaklanmaktadır. Bunun yanında, teknoloji boyutlarının küçülmesiyle birlikte sızıntı akımlarının artması da statik gücün önemini artırmıştır. Bu durum, devre seviyesinde birden fazla tekniğin birlikte kullanılmasını gerekli hale getirmiştir.

3.1.1. Gerilim Ölçekleme (Voltage Scaling)

Devre seviyesinde güç tüketimini azaltmak için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri besleme geriliminin düşürülmesidir. CMOS devrelerde güç tüketiminin önemli bir kısmı, transistörlerin anahtarlama sırasında kapasitif yükleri şarj ve deşarj etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, özellikle yüksek frekansta çalışan dijital devrelerde daha belirgin hale gelmektedir.

Dinamik güç tüketimi literatürde genel olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Rabaey ve ark., 2003):

$$P = a \cdot C_L \cdot V_{dd}^2 \cdot f \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

- a anahtarlama aktivite faktörünü,
- C_L yük kapasitansını,
- V_{dd} besleme gerilimini,
- f çalışma frekansını temsil etmektedir.

Eşitlik (3.1)'de açıkça görüldüğü gibi, güç tüketimi besleme geriliminin karesi ile orantılıdır. Bu nedenle gerilimde yapılacak küçük bir azalma bile güç tüketiminde önemli bir düşüş sağlamaktadır.

Gerilim ölçeklemenin en etkili düşük güç tekniklerinden biri olduğu belirtilmektedir. Özellikle ultra düşük güç tasarımlarda, sistemlerin çok düşük gerilim seviyelerinde çalıştırılması hedeflenmektedir. Ancak gerilim düşürüldüğünde devrenin çalışma hızı da azalmaktadır. Bu nedenle gerilim ölçekleme uygulanırken performans ve güç tüketimi arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Alioto, 2012).

Ayrıca bazı çalışmalarda, gerilim ölçeklemenin diğer tekniklerle birlikte kullanıldığında daha verimli sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Örneğin dinamik gerilim ve frekans ölçekleme (DVFS) yöntemi, sistem yüküne bağlı olarak gerilim ve frekans birlikte ayarlayarak enerji tasarrufu sağlamaktadır (Harika ve ark., 2024). Bu tür yaklaşımlar, özellikle taşınabilir sistemlerde ve enerji kısıtlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.2. Transistör Boyutlandırma (Transistor Sizing)

Devre seviyesinde güç tüketimini etkileyen önemli faktörlerden biri de transistör boyutlandırmasıdır. CMOS devrelerde kullanılan transistörlerin genişlik (W) ve uzunluk (L) değerleri, devrenin hem ne kadar hızlı çalışacağını hem de ne kadar güç tüketeceğini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden düşük güç tasarımı yapılırken sadece gerilim değil, transistör boyutları da dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Transistör boyutu arttıkça, devrenin akım sürme kapasitesi artar ve bu da anahtarlama işlemlerinin daha hızlı gerçekleşmesini sağlar. Yani daha büyük transistörler kullanıldığında devre daha hızlı çalışır. Ancak bu durumun bir dezavantajı vardır. Transistör boyutu büyüdükçe kapasitans da artar ve bu da dinamik güç tüketiminin yükselmesine neden olur.

CMOS devrelerde dinamik güç tüketimi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir (Rabaey ve ark., 2003):

$$P = a \cdot C \cdot V^2 \cdot f \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2)'de yer alan C kapasitansı, transistör boyutları ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla transistör boyutlandırması, güç tüketimini belirleyen temel parametrelerden biri olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca teknoloji ölçeklendikçe sızıntı akımlarının artması, transistör boyutlandırmasının statik güç üzerinde de etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle modern tasarımlarda hem dinamik hem de statik güç bileşenleri birlikte değerlendirilerek boyutlandırma yapılmaktadır (Roy ve ark., 2003).

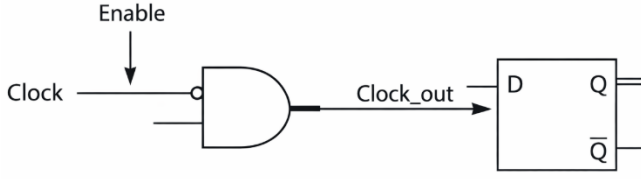
3.1.3. Saat Darbesi Kesme (Clock Gating)

Devre seviyesinde güç tüketimini azaltmak için kullanılan önemli tekniklerden biri clock gating yöntemidir. Dijital CMOS devrelerde, saat sinyali genellikle tüm devre boyunca sürekli olarak dağıtılır ve bu durum, devre aktif olmasa bile anahtarlama faaliyetlerinin devam etmesine neden olur. Bu gereksiz anahtarlama, dinamik güç tüketiminin artmasına yol açmaktadır (Weste ve Harris, 2011).

Clock gating tekniğinde temel amaç, ihtiyaç duyulmayan devre bloklarında clock sinyalini durdurarak gereksiz anahtarlama faaliyetlerini önlemektir. Yani devrede sadece aktif olarak çalışan kısımlar clock sinyali alır, diğer bloklar ise geçici olarak devre dışı bırakılır. Bu yaklaşım sayesinde, özellikle büyük dijital sistemlerde önemli miktarda güç tasarrufu sağlanabilmektedir.

Saat sinyalinin devre boyunca sürekli yayılması, güç tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle clock sinyalinin kontrol edilmesi, düşük güç tasarımında temel stratejilerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemle, anahtarlama aktivitesi azaltılarak dinamik güç tüketimi düşürülmektedir (Weste ve Harris, 2011).

Clock gating tekniğinin çalışma mantığı, saat sinyalinin bir kontrol sinyali (enable) ile birlikte bir mantık kapısından geçirilmesine dayanmaktadır. Enable sinyali aktif olduğunda clock sinyali devreye iletilirken, pasif olduğunda clock sinyali kesilerek gereksiz anahtarlama faaliyetleri engellenir. Bu yapının temel gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1. *Clock gating tekniğinin temel çalışma yapısı*
(Weste ve Harris, 2011)

Bu tekniğin uygulanması tamamen sorunsuz değildir. Clock gating için ek kontrol mantıkları kullanılmaktadır ve bu durum devreye ek karmaşıklık getirebilir. Ayrıca clock sinyalinin yanlış zamanlarda kesilmesi, zamanlama problemlerine yol açabilir. Bu yüzden clock gating tasarımında dikkatli olunması ve uygun kontrol mekanizmalarının kullanılması gerekmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, clock gating tekniği hem akademik çalışmalarda hem de endüstride yaygın olarak kullanılan etkili bir güç azaltma yöntemidir. Özellikle büyük ölçekli dijital devrelerde, doğru uygulandığında ciddi enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir.

3.1.4. Güç Kesme (Power Gating)

Devre seviyesinde güç tüketimini azaltmak için kullanılan bir diğer önemli teknik de power gating yöntemidir. Bu yöntem, özellikle statik güç tüketimini azaltmaya yönelik olarak kullanılmaktadır. Günümüzde teknoloji boyutlarının küçülmesiyle birlikte sızıntı akımları artmış ve bu durum statik güç tüketimini önemli hale getirmiştir. Bu nedenle yalnızca dinamik güç değil, statik güç bileşeninin de azaltılması gerekmektedir.

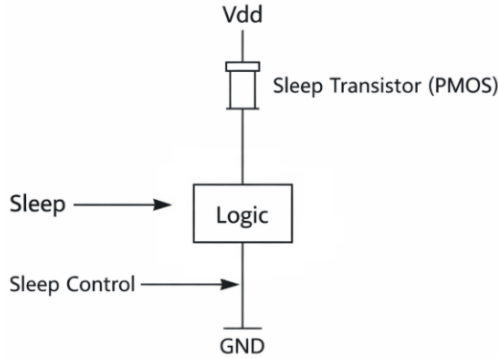
Power gating tekniğinde temel amaç, kullanılmayan devre bloklarının besleme bağlantısını keserek bu blokların tamamen devre dışı bırakılmasını sağlamaktır. Bu işlem genellikle “sleep transistor” adı verilen ek transistörler kullanılarak gerçekleştirilir. Devre aktif durumda iken bu transistörler iletimde olur ve normal çalışma sağlanır. Ancak devre kullanılmadığında bu transistörler kesime alınarak ilgili blok güç kaynağından ayrılır.

Bu yöntem sayesinde, devre kullanılmadığı zamanlarda oluşan sızıntı akımları büyük ölçüde azaltılabilmektedir. Özellikle büyük ve karmaşık sistemlerde, bazı blokların sürekli aktif olmasına gerek olmadığından, power gating tekniği ciddi enerji tasarrufu sağlayabilmektedir (Roy ve ark., 2003).

Ancak power gating tekniğinin uygulanması da bazı zorluklar içermektedir. Örneğin, devre tekrar aktif hale getirildiğinde bir gecikme süresi oluşabilmektedir. Ayrıca eklenen sleep transistörler devre alanını artırmakta ve tasarım karmaşıklığını yükseltebilmektedir. Bu nedenle power gating

uygulanırken hem enerji kazancı hem de performans kaybı birlikte değerlendirilmelidir.

Power gating tekniğinin temel yapısı, devre ile güç kaynağı arasına yerleştirilen bir kontrol transistörü üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu yapı sayesinde devre bloklarının besleme bağlantısı kontrol edilebilmekte ve kullanılmadıkları durumlarda güç tüketimi azaltılmaktadır. Bu yapının temel gösterimi aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.2. Power gating tekniğinin temel çalışma yapısı

Genel olarak bakıldığında, power gating tekniği özellikle düşük güç tasarımında statik güç tüketimini azaltmak için oldukça etkili bir yöntemdir. Clock gating ile birlikte kullanıldığında, hem dinamik hem de statik güç tüketiminin kontrol altına alınmasına yardımcı olmaktadır.

3.1.5. Çoklu Eşik Gerilimli CMOS (Multi-Threshold CMOS-MTCMOS)

Günümüzde düşük güç tasarımında karşılaşılan en önemli problemlerden biri sızıntı akımlarının artmasıdır. Özellikle teknoloji boyutlarının küçülmesiyle birlikte, eşik geriliminin düşmesi alt eşik sızıntı akımlarını artırmakta ve bu durum statik güç tüketiminin önemli bir bileşen haline gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle modern tasarımlarda yalnızca dinamik güç değil, statik güç tüketiminin de azaltılması hedeflenmektedir (Pedram, 1996).

Bu probleme çözüm olarak geliştirilen yöntemlerden biri Multi-Threshold CMOS (MTCMOS) tekniğidir. Bu yöntemde farklı eşik gerilimlerine sahip transistörler aynı devre içerisinde birlikte kullanılmaktadır. Düşük eşik gerilimli transistörler yüksek performans gerektiren bölgelerde tercih edilirken, yüksek eşik gerilimli transistörler sızıntı akımlarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

Bu yaklaşım, güç tüketimi ile performans arasında bir denge kurulmasını sağlamaktadır (Alioto, 2012).

MTCMOS yapısında genellikle düşük eşik gerilimli transistörler ana mantık bloğunu oluştururken, yüksek eşik gerilimli transistörler kontrol amaçlı kullanılmaktadır. Bu kontrol elemanları, devre ile güç kaynağı arasına yerleştirilerek devrenin aktif ve uyku modları arasında geçiş yapmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede devre aktif olmadığında sızıntı akımları önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Alioto, 2012).

MTCMOS tekniği, power gating yaklaşımına benzer şekilde kullanılmayan devre bloklarının güç tüketimini azaltmayı amaçlamaktadır. Farklı eşik gerilimli transistörlerin birlikte kullanılması sayesinde özellikle statik güç tüketimi düşürülebilmektedir. Ancak bu yöntem tasarım karmaşıklığını ve üretim maliyetini artırabilmektedir. Genel olarak devre seviyesinde kullanılan düşük güç teknikleri, dinamik ve statik güç tüketimini azaltmaya yönelik olup birlikte kullanıldıklarında daha verimli sonuçlar sağlamaktadır.

Tablo 3.1. Devre seviyesinde kullanılan güç azaltma tekniklerinin genel karşılaştırması

Teknik	Ne için kullanılır	Avantajı	Dezavantajı
Gerilim Ölçekleme	Gerilimi düşürmek	Gücü çok azaltır	Hız düşebilir
Transistör Boyutlandırma	Boyut ayarlamak	Dengeli tasarım sağlar	Ayarlaması zor
Saat Darbesi Kesme	Gereksiz çalışma engellenir	Gereksiz güç tüketimi önlenir	Ek devre gerekir
Güç Kesme	Devreyi kapatmak	Sızıntı azalır	Açılma gecikmesi
MTCMOS	Farklı transistör kullanmak	Güç ve hız dengelenir	Tasarım zorlaşır

3.2. Sistem Seviyesi Teknikler

Devre seviyesinde uygulanan düşük güç teknikleri, güç tüketimini azaltmada önemli katkılar sağlasa da, modern sistemlerde tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle düşük güç tasarımında sistem seviyesinde gerçekleştirilen optimizasyonlar da büyük önem taşımaktadır. Sistem seviyesinde yapılan iyileştirmeler, yalnızca donanım parametrelerini değil, aynı zamanda sistemin çalışma şekli ve görev dağılımını da kapsayarak daha geniş bir etki alanı sunmaktadır (Benini ve De Micheli, 2000).

Sistem seviyesinde kullanılan teknikler, genellikle donanım ve yazılımın birlikte ele alınmasını gerektirmektedir. Bu yaklaşım sayesinde sistemin aktif olduğu süre, işlem yoğunluğu ve kaynak kullanımı kontrol altına alınarak enerji tüketimi azaltılabilmektedir. Gömülü sistemlerde donanım ve yazılım bileşenlerinin birlikte çalışması gerektiğinden, sistemin genel yapısı ve çalışma şekli güç tüketimi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Marwedel, 2011). Özellikle gömülü sistemler, mobil cihazlar ve IoT tabanlı uygulamalar, sistem seviyesinde güç optimizasyonunun en yoğun uygulandığı alanlar arasında yer almaktadır.

3.2.1. Dinamik Gerilim ve Frekans Ölçekleme

Dinamik gerilim ve frekans ölçekleme (DVFS), sistem seviyesinde en yaygın kullanılan güç azaltma tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, işlemcinin çalışma frekansı (hızı) ve besleme gerilimi, sistemin anlık iş yüküne bağlı olarak dinamik bir şekilde ayarlanmakta; böylece ihtiyaç duyulan performans seviyesine göre enerji tüketimi optimize edilmektedir (Pillai ve Shin, 2001).

Gerilim ve frekans ölçekleme teknikleri, sistemde güç tüketimini azaltmak amacıyla kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır (Brooks ve Martonosi, 2001). Sistem ihtiyaca göre farklı frekans ve gerilim değerlerinde çalıştırılarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ancak gerilim ve frekansın düşürülmesi performansı olumsuz etkileyebileceğinden, güç tüketimi ile performans arasında denge kurulması gerekmektedir.

3.2.2. Uyku Modları (Sleep Modes)

Sistem seviyesinde enerji tasarrufu sağlamak için kullanılan bir diğer yöntem uyku modlarıdır. Donanımın farklı çalışma modları bulunmakta ve bu modlar farklı güç tüketimi ve tepki sürelerine sahiptir (Mittal, 2014). Bu yöntemde sistem, aktif olarak kullanılmadığı zamanlarda düşük güç tüketimli çalışma modlarına geçirilmektedir.

Uyku modları genellikle farklı seviyelerde uygulanmaktadır. Hafif uyku modlarında sistem hızlı bir şekilde tekrar aktif hale gelebilirken, derin uyku modlarında daha fazla enerji tasarrufu sağlanmakta ancak sistemin yeniden aktif hale gelmesi daha uzun sürebilmektedir. Bu durum, enerji tasarrufu ile tepki süresi arasında bir denge kurulmasını gerektirmektedir.

Özellikle kablosuz sensör ağları ve IoT uygulamalarında, düğümlerin büyük bir kısmı zamanlarının çoğunu uyku modunda geçirerek enerji tüketimini minimum seviyeye indirmektedir. Sensör düğümleri enerji tasarrufu sağlamak için kullanılmadıkları zamanlarda düşük güç modlarına geçmeli ve güç tasarrufu modları desteklenmelidir (Akyildiz ve ark., 2002).

3.2.3. Görev Zamanlama (Task Scheduling)

Sistem seviyesinde güç tüketimini etkileyen önemli faktörlerden biri de görevlerin zamanlanma şeklidir. Zamanlama algoritmaları, işlemci frekansı ve geriliminin uygun şekilde seçilmesini sağlayarak enerji tüketiminin azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Zhu ve Mueller, 2005).

Örneğin, benzer işlemler belirli zamanlarda gruplanarak işlemcinin kısa süreli yoğun çalışması sağlanabilir. Bu sayede sistem daha uzun süre uyku modunda kalabilir ve enerji tüketimi azaltılabilir. Ayrıca bazı görevlerin ertelenmesi veya önceliklendirilmesi de gereksiz güç tüketimini azaltmaktadır. Gerçek zamanlı sistemlerde görev zamanlama algoritmalarının doğru seçilmesi, hem performans hem de enerji verimliliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

3.2.4. Kaynak Yönetimi ve Donanım Kullanımı

Sistem seviyesinde güç tüketimini azaltmanın bir diğer yolu, donanım kaynaklarının verimli kullanılmasıdır. Sistemlerde kullanılmayan bileşenlerin kapatılması veya düşük güç modlarına alınması, enerji tüketimini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Mittal, 2014).

Örneğin, işlem sırasında ihtiyaç duyulmayan çevre birimleri kapatılarak sistemin toplam güç tüketimi düşürülebilir. Aynı şekilde, donanım hızlandırıcıların kullanılması işlemlerin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlayarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık sistemlerde güç yönetiminin daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

3.2.5. Genel Değerlendirme

Sistem seviyesinde uygulanan düşük güç teknikleri, devre seviyesindeki yöntemlerle birlikte kullanıldığında daha etkili sonuçlar vermektedir. Devre seviyesindeki optimizasyonlar temel güç tüketimini azaltırken, sistem seviyesindeki iyileştirmeler donanımın daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Bu durum özellikle karmaşık sistemlerde güç yönetimini daha dengeli hale getirmektedir.

Bu nedenle modern düşük güç tasarımında farklı seviyelerdeki teknikler birlikte kullanılmaktadır. Yalnızca tek bir seviyeye odaklanmak yerine, devre ve sistem seviyesinin birlikte değerlendirilmesi daha verimli sonuçlar sağlamaktadır. Bu yaklaşım sayesinde güç tüketimi ile performans arasında daha dengeli bir yapı elde edilmektedir.

Tablo 3.2. *Sistem seviyesinde kullanılan güç azaltma tekniklerinin genel karşılaştırması*

Teknik	Ne için kullanılır	Avantajı	Dezavantajı
DVFS	Frekans ve gerilimi ayarlamak	Güç tüketimi azalır.	Performans düşebilir
Uyku Modları	Sistemi geçici kapatmak	Enerji tasarrufu	Uyanma gecikmesi
Görev Zamanlama	İşleri planlamak	Verimli çalışma	Karmaşık olabilir
Kaynak Yönetimi	Donanımı kontrol etmek	Gereksiz güç önlenir	Ek kontrol gerekir

3.3. Performans ve Enerji Odaklı Tasarımlar

Modern VLSI (Very Large Scale Integration) sistemlerde temel mühendislik problemi, yüksek hesaplama performansı sağlanırken enerji verimliliğinin korunabilmesidir. Geleneksel tasarım yaklaşımlarında performans artışı genellikle daha yüksek güç tüketimi ile sonuçlanırken, günümüzde geliştirilen yeni nesil mimari yaklaşımlar bu iki parametreyi birlikte optimize etmeye odaklanmaktadır. Bu nedenle performans ve enerji tüketimi arasında dengeli bir yapı kurulması, modern entegre devre tasarımının temel gereksinimlerinden biri haline gelmiştir.

Bu bağlamda, sistemlerin yalnızca toplam güç tüketimi üzerinden değerlendirilmesi yeterli olmamakta, aynı zamanda işlem süresi ve enerji verimliliği birlikte ele alınmaktadır.

3.3.1. Enerji Performans Metrikleri

Performans ve enerji arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli yaklaşımlardan biri, enerji ve gecikme kavramlarının birlikte ele alınmasıdır. Bu doğrultuda geliştirilen metrikler, sistemin yalnızca ne kadar enerji tükettiğini değil, bu enerjiyi ne kadar sürede kullandığını da dikkate almaktadır.

Enerji-gecikme çarpımı (EDP) gibi ölçütler, düşük güç tüketimi ile yüksek performans arasında denge kurulmasını sağlamaktadır. Bu tür metrikler sayesinde yalnızca güç tüketiminin azaltılması değil, aynı zamanda işlem süresinin de optimize edilmesi hedeflenmektedir.

3.3.2. Paralel İşleme

Performans ve enerji optimizasyonunda kullanılan önemli yöntemlerden biri, işlemlerin paralel olarak yürütülmesidir. Paralleleştirme yaklaşımı sayesinde aynı işlem birden fazla donanım birimi üzerinde eş zamanlı olarak

gerçekleştirilebilmekte ve işlem süresi azaltılmaktadır. Bu durum, sistemin daha düşük frekanslarda çalıştırılmasına olanak tanıyarak güç tüketiminin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Esmailzadeh ve ark., 2011).

Bunun yanı sıra, çok çekirdekli sistemlerde iş yükünün dinamik olarak dağıtılması da enerji verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Sistem yüküne bağlı olarak aktif çekirdek sayısının ayarlanması, gereksiz güç tüketiminin önüne geçilmesini sağlamaktadır.

3.3.3. Yaklaşık Hesaplama

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik geliştirilen yenilikçi yaklaşımlardan biri yaklaşık hesaplama teknikleridir. Bu yöntemde, hata toleransı bulunan uygulamalarda hesaplama doğruluğu kontrollü bir şekilde azaltılarak donanım karmaşıklığı ve güç tüketimi düşürülmektedir (Han ve Orshansky, 2013).

Özellikle görüntü işleme, multimedya uygulamaları ve yapay zeka sistemleri gibi alanlarda küçük doğruluk kayıpları sistem performansını ciddi şekilde etkilememektedir. Bu nedenle yaklaşık hesaplama yöntemleri kullanılarak enerji tüketiminde iyileştirmeler sağlanabilmektedir. Bunun yanında, literatürde yaklaşık hesaplamanın yalnızca donanım seviyesinde değil, aynı zamanda yazılım, mimari ve veri işleme seviyelerinde de uygulanabildiği belirtilmektedir (Mittal, 2016). Bu kapsamda farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem genelinde enerji verimliliği artırılabilir.

Ayrıca, yaklaşık hesaplama yaklaşımında önemli olan nokta, doğruluk kaybının uygulama gereksinimleri çerçevesinde kontrol altında tutulmasıdır. Bu sayede sistem performansı korunurken enerji tüketiminde anlamlı iyileştirmeler elde edilebilmektedir (Mittal, 2016).

3.3.4. Donanım Hızlandırıcılar

Genel amaçlı işlemciler (CPU), esneklik sunmalarına rağmen enerji verimliliği açısından sınırlıdır. Performans odaklı tasarımlarda, belirli algoritmaları yürütmek için optimize edilmiş donanım hızlandırıcıların kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu hızlandırıcılar, veri akışını ve bellek erişimini ilgili görev için özelleştirerek gereksiz veri transferlerini engeller. Özellikle derin öğrenme ve sinyal işleme görevlerinde, uygulamaya özel entegre devreler (ASIC), genel amaçlı işlemcilerle göre watt başına çok daha yüksek işlem kapasitesi sunarak performans-enerji dengesini donanımsal seviyede optimize etmektedir.

3.3.5. Yazılım ve Donanım Uyumu

Performans ve enerji optimizasyonu yalnızca donanım düzeyinde değil, aynı zamanda yazılım düzeyinde de ele alınmaktadır. Algoritmaların daha verimli hale getirilmesi, gereksiz işlem adımlarının azaltılması ve veri erişimlerinin optimize edilmesi, sistemin toplam enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle donanım ve yazılımın birlikte optimize edilmesi, özellikle gömülü sistemlerde enerji verimliliğini artıran önemli bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

3.3.6. Genel Değerlendirme

Performans ve enerji odaklı tasarım yaklaşımları, modern entegre devre sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu bölümde ele alınan yöntemler, farklı seviyelerde uygulanabilen ve birbirini tamamlayan teknikler olarak öne çıkmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, bu tekniklerin birlikte kullanılması daha etkili sonuçlar vermektedir. Bu nedenle modern tasarım süreçlerinde çok katmanlı ve dengeli bir yaklaşım benimsenmekte, performans ile enerji verimliliği arasında optimum bir denge kurulmaya çalışılmaktadır.

3.4. Modern Düşük Güç Tasarım Teknikleri

Gelişen yarı iletken teknolojileri ve artan hesaplama ihtiyaçları, enerji verimliliğini entegre devre tasarımında daha önemli hale getirmiştir. Geleneksel düşük güç teknikleri belirli ölçüde etkili olsa da, modern sistemlerde performans ve enerji dengesini sağlamak için daha yenilikçi tasarım yaklaşımları geliştirilmektedir.

Modern düşük güç tasarım teknikleri, yalnızca devre ve sistem seviyesindeki iyileştirmelerle sınırlı kalmayıp mimari tasarım ve adaptif kontrol mekanizmalarını da kapsamaktadır. Bu yaklaşımlar sayesinde sistemler çalışma koşullarına göre dinamik davranarak gereksiz enerji tüketimini azaltabilmektedir. Bu bölümde güncel düşük güç tasarım teknikleri ele alınmaktadır.

3.4.1. Eşik Gerilimi Yakınında Çalışma (Near-Threshold Computing)

Eşik gerilimi yakınında çalışma (Near-Threshold Computing - NTC), düşük güç tüketimi sağlamak amacıyla besleme geriliminin transistör eşik gerilimine yakın seviyelere düşürülmesine dayanan bir tasarım yaklaşımıdır (Dreslinski ve ark., 2010). Bu yöntem, özellikle enerji kısıtlı sistemlerde güç tüketimini azaltmak için etkili bir çözüm sunmaktadır.

Besleme geriliminin azaltılması, CMOS devrelerde dinamik güç tüketimini doğrudan düşürmektedir. Bu nedenle near-threshold çalışma, enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Dreslinski ve ark., 2010). Ayrıca bu yaklaşım, eşik altı çalışmaya göre daha dengeli bir performans-enerji ilişkisi sunmakta ve farklı uygulamalarda kullanılabilir hale gelmektedir.

Bununla birlikte, gerilim seviyesinin düşmesi devre gecikmelerinin artmasına ve performansın azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca düşük gerilim seviyelerinde çalışan devreler, varyasyonlara karşı daha hassas hale gelmekte ve bu durum tasarım sürecini zorlaştırmaktadır (Alioto, 2012). Sonuç olarak NTC, enerji verimliliği açısından avantajlı bir yöntem olmakla birlikte, performans ve kararlılık açısından dikkatli değerlendirilmesi gereken bir yaklaşımdır.

3.4.2. Veri Yerelliği ve Veri Taşıma

Veri yerelliği, verinin mümkün olduğunca işlem yapılacağı birime yakın tutulmasını ifade eden önemli bir tasarım yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, sık kullanılan verilerin yerel belleklerde saklanarak tekrar kullanılması sağlanmakta ve böylece veri erişim maliyetleri azaltılmaktadır (Sze ve ark., 2017). Özellikle veri yoğun uygulamalarda, veri akışının doğru planlanması ve veri yeniden kullanımının artırılması, sistem performansını yükseltirken enerji tüketiminin düşürülmesine katkı sağlamaktadır (Sze ve ark., 2017).

Bununla birlikte, modern sistemlerde enerji tüketiminin önemli bir kısmı hesaplama işlemlerinden ziyade veri taşınmasından kaynaklanmaktadır (Horowitz, 2014). İşlemci ile bellek arasındaki veri transferlerinin enerji maliyeti, basit bir hesaplama işlemine kıyasla oldukça yüksek olabilmektedir. Bu durum, sistem tasarımında veri hareketinin minimize edilmesini ve veri erişim desenlerinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesini gerekli kılmaktadır (Horowitz, 2014).

Sonuç olarak, veri yerelliğinin artırılması ve veri taşıma maliyetlerinin azaltılması, modern düşük güç tasarımında önemli bir rol oynamakta ve enerji verimliliğinin artırılmasında etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

3.4.3. Adaptif Güç Yönetimi

Adaptif güç yönetimi, sistemin çalışma koşullarına ve iş yüküne bağlı olarak güç tüketimini dinamik şekilde ayarlayan bir tasarım yaklaşımıdır (Benini ve De Micheli, 2000). Geleneksel statik güç yönetimi yöntemleri sabit ayarlar üzerinden çalıştığı için değişken iş yükleri altında verimsiz kalmakta ve gereksiz enerji tüketimine yol açabilmektedir (Benini ve De Micheli, 2000). Bu nedenle modern sistemlerde, çalışma anına uyum sağlayabilen adaptif yöntemler daha fazla tercih edilmektedir.

Dinamik güç yönetiminde, kullanılmayan sistem bileşenleri düşük güç modlarına alınarak enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Bu yöntemde amaç, güç tüketimini azaltırken performansı korumaktır. Özellikle değişken iş yüküne sahip sistemlerde, sabit yöntemler yerine adaptif karar mekanizmalarının daha etkili olduğu belirtilmektedir (Ren ve ark., 2005).

Modern adaptif güç yönetimi yaklaşımlarında sistemin çalışma durumu sürekli izlenmekte ve elde edilen verilere göre güç yönetim politikaları güncellenmektedir (Karthikeyan ve ark., 2025). Özellikle çok çekirdekli VLSI sistemlerde, iş yüküne bağlı olarak çekirdeklerin aktifliği ile voltaj ve frekans değerleri dinamik şekilde ayarlanabilmektedir. Bu amaçla DVFS ve çekirdek seviyesinde güç kapama teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Karthikeyan ve ark., 2025).

Buna ek olarak, güncel çalışmalarda adaptif güç yönetimi sistem davranışını önceden tahmin edebilen yapılar da içermektedir. Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler sayesinde sistem, iş yüküne göre güç dağılımını ayarlayarak enerji verimliliğini artırabilmektedir. Ayrıca geri besleme mekanizmaları ile değişen koşullara uyum sağlayabilmektedir (Ren ve ark., 2005).

Sonuç olarak adaptif güç yönetimi, modern entegre devre tasarımında enerji verimliliğini artırmak için önemli tekniklerden biri haline gelmiştir. Gerçek zamanlı izleme ve dinamik kontrol yöntemleri sayesinde sistemler daha dengeli çalışabilmektedir.

4. ANALİZ VE TARTIŞMA

Yapılan incelemeler sonucunda, düşük güç tasarımının tek bir yöntemle çözülebilecek bir problem olmadığı, aksine farklı seviyelerdeki tekniklerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok boyutlu bir konu olduğu anlaşılmıştır.

Devre seviyesinde uygulanan tekniklerin, güç tüketiminin temel bileşenlerini doğrudan hedef aldığı görülmektedir. Özellikle gerilim ölçekleme, clock gating ve power gating gibi yöntemler güç tüketimini azaltmada etkili olmaktadır. Ancak güç tüketimi azalırken performansın da etkilenebilmesi, tasarım sürecinde denge kurulmasını gerekli hale getirmektedir. Bu durum, düşük güç tasarımının aynı zamanda bir optimizasyon problemi olduğunu göstermektedir.

Sistem seviyesinde ele alınan teknikler ise donanımın daha verimli kullanılmasına olanak sağlamaktadır. DVFS, uyku modları ve görev zamanlama gibi yöntemler sayesinde sistemin çalışma şekli doğrudan kontrol edilebilmekte ve gereksiz enerji tüketimi azaltılabilmektedir. Bu tekniklerin en önemli avantajı, sistemin anlık ihtiyaçlara göre davranabilmesidir. Ancak burada da dikkat edilmesi gereken nokta, bu yöntemlerin doğru şekilde uygulanmadığında

performans kaybına yol açabilmesidir. Bu nedenle sistem seviyesinde yapılan optimizasyonların, uygulama gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanması gerektiği söylenebilir.

Performans ve enerji odaklı yaklaşımlar değerlendirildiğinde, modern sistemlerde bu iki parametrenin artık ayrı ayrı değil birlikte ele alındığı görülmektedir. Paralel işlem ve donanım hızlandırıcılar gibi teknikler, performansı artırırken enerji tüketimini kontrol altında tutabilmektedir. Özellikle yaklaşık hesaplama yöntemleri, bu çalışmada dikkat çeken yaklaşımlardan biri olmuştur. Çünkü bu yöntem, klasik tasarım anlayışından farklı olarak “her zaman maksimum doğruluk gerekli midir?” sorusunu gündeme getirmektedir. Bu açıdan bakıldığında, belirli uygulamalarda küçük doğruluk kayıpları karşılığında önemli enerji kazançları elde edilebilmesi, bu yaklaşımın gelecekte daha yaygın kullanılabileceğini göstermektedir.

Modern düşük güç tasarım teknikleri incelendiğinde ise sistemlerin artık daha akıllı ve adaptif hale geldiği görülmektedir. Near-threshold computing, veri yerelliği ve adaptif güç yönetimi gibi yaklaşımlar, klasik yöntemlere göre daha esnek çözümler sunmaktadır. Özellikle veri hareketinin azaltılması ve sistemin iş yüküne göre kendini ayarlaması, enerji verimliliği açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte bu tekniklerin uygulanması, daha karmaşık kontrol mekanizmaları ve detaylı tasarım süreçleri gerektirmektedir. Bu da modern düşük güç tasarımının sadece donanım değil, aynı zamanda algoritma ve sistem düzeyinde de düşünülmesi gerektiğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük güç tasarımında en etkili yaklaşımın farklı tekniklerin birlikte kullanılması olduğu söylenebilir. Tek bir seviyeye odaklanmak yerine devre, sistem ve mimari seviyelerin birlikte ele alınması daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen yöntemler, modern entegre devre tasarımında enerji verimliliğinin sağlanabilmesi için çok katmanlı bir yaklaşımın gerekli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, düşük güç tüketimli entegre devre tasarımına yönelik farklı yaklaşımlar incelenmiş ve bu alandaki temel teknikler sistematik bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, güç tüketiminin azaltılmasının Çalışma boyunca ele alınan yöntemler incelendiğinde, düşük güç tasarımında kesin ve tek bir çözüm yaklaşımının bulunmadığı açıkça görülmektedir. Bunun yerine, tasarım sürecinde uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak farklı tekniklerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durum, düşük güç

tasarımının sabit kurallara dayanan bir yapıdan ziyade, esnek ve duruma bağılı bir yaklaşım gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Özellikle modern sistemlerde enerji verimliliği, yalnızca donanım seviyesinde yapılan iyileştirmelerle değil, aynı zamanda sistem davranışının doğru yönetilmesi ile sağlanabilmektedir. Bu nedenle gelecekte düşük güç tasarımında, adaptif ve veri odaklı yaklaşımların daha fazla önem kazanacağı düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük güç tasarımının temel amacının yalnızca enerji tüketimini azaltmak olmadığı, aynı zamanda performans, verimlilik ve sistem kararlılığı arasında dengeli bir yapı kurmak olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu doğrultuda geliştirilecek yeni nesil tasarım tekniklerinin, daha akıllı, daha uyumlu ve uygulamaya özel çözümler sunması beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422.
- Alioto, M. (2012). Ultra-low power VLSI circuit design demystified and explained: A tutorial. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 59(1), 3–17.
- Baysal, E., Reyhan, U., Ersöz, B., Sungur, E. B., Zini, Y., & Tanrikulu, M. Y. (2025). Design and simulations of a stable oscillator circuit in 90 nm CMOS technology. *Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University Journal of Science*, 1(2), 50–61.
- Benini, L., & De Micheli, G. (2000). System-level power optimization: Techniques and tools. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 5(2), 115–192.
- Brooks, D., & Martonosi, M. (2001). Dynamic thermal management for high-performance microprocessors. *Proceedings of the IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA)*, 171–182.
- Calhoun, B. H., Daly, D. C., Verma, N., Finchelstein, D. F., Wentzloff, D. D., Wang, A., Cho, S.-H., & Chandrakasan, A. P. (2005). Design considerations for ultra-low energy wireless microsensor nodes. *IEEE Transactions on Computers*, 54(6), 727–740.
- Chandrakasan, A. P., Sheng, S., & Brodersen, R. W. (1992). Low-power CMOS digital design. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 27(4), 473–484.
- Chandrakasan, A. P., & Brodersen, R. W. (1995). Minimizing power consumption in digital CMOS circuits. *Proceedings of the IEEE*, 83(4), 498–523.
- Dreslinski, R. G., Wieckowski, M., Blaauw, D., Sylvester, D., & Mudge, T. (2010). Near-threshold computing: Reclaiming Moore’s law through energy efficient integrated circuits. *IEEE Micro*, 30(4), 20–34.
- Esmailzadeh, H., Blem, E., Amant, R. S., Sankaralingam, K., & Burger, D. (2011). Dark silicon and the end of multicore scaling. *Proceedings of the International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*.
- Han, J., & Orshansky, M. (2013). Approximate computing: An emerging paradigm for energy-efficient design. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 32(11), 1609–1622.
- Harika, B., Kumar, D. R. V. A. S., & Kavva, K. (2024). Revolutionizing the future: Exploring the potential of low-power VLSI technologies. *Journal of Basic Science and Engineering*, 21(1), 1762–1764.

- Horowitz, M. (2014). *Computing's energy problem (and what we can do about it)*. Stanford University.
- Karthikeyan, M., Aravinth, P., & Heiner, A. J. (2025). Adaptive power management techniques in multi-core VLSI systems for enhanced energy efficiency. *Proceedings of the International Conference on Futuristic Technology (INCOFT)*.
- Lanuzza, M., De Rose, R., & Strangio, S. (2022). Design of ultra-low voltage/power circuits and systems. *Electronics*, 11(4), 607.
- Marwedel, P. (2011). *Embedded system design*. Springer.
- Mittal, S. (2014). A survey of techniques for improving energy efficiency in embedded computing systems. *International Journal of Computer Applications*, 97(12), 7–18.
- Mittal, S. (2016). A survey of techniques for approximate computing. *ACM Computing Surveys*, 48(4), 1–33.
- Mohaghegh, S. (2020). *Low-power and area-efficient finite field arithmetic architecture based on irreducible all-one polynomials* (Master's thesis). Middle East Technical University Northern Cyprus Campus.
- Parsnejad, S. (2014). *Design of low power continuous time sigma-delta analog to digital converters* (Master's thesis). Boğaziçi University.
- Pedram, M. (1996). Power minimization in IC design: Principles and applications. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 1(1), 3–56.
- Rabaey, J. M., Chandrakasan, A., & Nikolić, B. (2003). *Digital integrated circuits: A design perspective* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Ren, Z., Krogh, B. H., & Marculescu, R. (2005). Hierarchical adaptive dynamic power management. *IEEE Transactions on Computers*, 54(4), 409–420.
- Roy, K., Mukhopadhyay, S., & Mahmoodi-Meimand, H. (2003). Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits. *Proceedings of the IEEE*, 91(2), 305–327.
- Sze, V., Chen, Y.-H., Yang, T.-J., & Emer, J. S. (2017). Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey. *Proceedings of the IEEE*, 105(12), 2295–2329.
- Üstündağ, M. C. B. (2015). *A low-power memory CMOS integrated circuit for image sensors* (Master's thesis). Middle East Technical University.
- Varala, C. R. (2025). Low-power VLSI design for next-generation devices. *Science Letters*.
- Weste, N. H. E., & Harris, D. (2011). *CMOS VLSI design: A circuits and systems perspective* (4th ed.). Pearson.

- Yıldız, M., Özoğuz, S., & Minaei, S. (2010). Düşük güçlü çok seviyeli CMOS sınıflandırıcı devresi. *İTÜ Dergisi/d*, 9(1), 57–64.
- Zhu, D., & Mueller, F. (2005). Feedback EDF scheduling exploiting dynamic voltage scaling. *Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)*, 84–93.

Dijital İkiz Teknolojisinin Mühendislik Sistemlerinde Kullanımı: Üretim, Lojistik ve Afet Yönetimi Uygulamaları

Zeynep Nur KÖSTEPEN¹

ÖZET

Dijital ikiz teknolojisi, fiziksel varlıkların, süreçlerin veya sistemlerin sanal ortamda dinamik biçimde temsil edilmesini sağlayan ve gerçek zamanlı veri, modelleme, simülasyon, tahminleme ve optimizasyon yeteneklerini bir araya getiren önemli bir mühendislik yaklaşımıdır. Endüstri 4.0 ile birlikte görünürlüğü artan dijital ikiz kavramı, günümüzde üretim sistemlerinden lojistik ağlara, akıllı şehirlerden afet yönetimine kadar farklı alanlara karar destek altyapısı olarak değerlendirilmektedir. Bu teknolojinin temel gücü, fiziksel sistemdeki değişimleri dijital ortamda izleyebilmesi, olası senaryoları risk oluşturmadan test edebilmesi ve karar vericilere zamanında, veri temelli ve bütünlük bilgisi sağlayabilmesidir. Bu nedenle dijital ikizler hem güçlü bir görselleştirme aracı hem de sistemlerin izlenmesi, teşhis edilmesi, öngörülmesi ve iyileştirilmesi için kullanılan bütünlük bir mühendislik platformu olarak ele alınmalıdır.

Bu çalışmada dijital ikiz teknolojisinin mühendislik sistemlerinde kullanımı, üretim, lojistik ve afet yönetimi uygulamaları özelinde incelenmektedir. Çalışma kapsamında öncelikle dijital ikiz kavramı, dijital model ve dijital gölge kavramlarından ayrıştırılarak açıklanmaktadır. Ardından dijital ikiz mimarisini oluşturan bileşenler ele alınmaktadır. Daha sonra üretim sistemlerinde kestirimci bakım, süreç optimizasyonu, kalite yönetimi ve sanal devreye alma, lojistik sistemlerinde görünürlük, ağ tasarımı, rota planlama ve risk izleme, afet yönetiminde ise tehlike modelleme, altyapı dayanıklılığı, tahliye planlama ve acil müdahale koordinasyonu gibi kullanım alanları tartışılmaktadır. Bölümün sonunda uygulama yol haritası, performans göstergeleri, veri yönetimi, etik ve güvenlik sorunları ile gelecek araştırma yönleri değerlendirilmektedir. Çalışma, dijital ikiz teknolojisinin mühendislik sistemlerinde dayanıklılık, sürdürülebilirlik ve operasyonel verimlilik hedeflerini destekleyen stratejik bir dönüşüm aracı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte teknolojinin yalnızca teknik bir çözüm olmadığını, yönetim, etik ve kurumsal kapasite boyutlarıyla da ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital ikiz, mühendislik sistemleri, üretim sistemleri, lojistik, afet yönetimi, karar destek sistemleri, Endüstri 4.0.

¹ Arş. Gör., İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
ORCID: 0000-0001-5773-2411

1. Giriş

Dijitalleşme, mühendislik sistemlerinin tasarlanma, işletilme ve iyileştirilme biçimini köklü şekilde dönüştürmektedir. Nesnelerin interneti, sensör teknolojileri, bulut bilişim, yapay zekâ, büyük veri analitiği ve simülasyon tekniklerindeki gelişmeler, fiziksel sistemlerin daha görünür, ölçülebilir ve yönetilebilir hale gelmesini sağlamaktadır. Bu dönüşümün en dikkat çekici kavramlarından biri dijital ikiz teknolojisidir (Fuller vd., 2020). Dijital ikiz, bir fiziksel varlığın, sürecin veya sistemin dijital ortamda temsil edilmesiyle sınırlı olmayan, fiziksel sistemden sürekli veri alabilen, bu veriyi modelleme ve analitik süreçlerle işleyebilen ve karar süreçlerini destekleyen dinamik bir yapıdır (Dihan vd., 2024; Osama, 2024).

Mühendislik sistemleri çoğu zaman karmaşık, çok değişkenli, belirsizlik içeren ve farklı alt sistemlerin etkileşimiyle çalışan yapılardır. Üretim hatlarında makine arızaları, kalite sapmaları ve kapasite darboğazları, lojistik ağlarda talep dalgalanmaları, rota kesintileri ve tedarikçi gecikmeleri, afet yönetiminde ise altyapı hasarı, tahliye kapasitesi, kaynak yetersizliği ve bilgi eksikliği gibi sorunlar sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Geleneksel yönetim yaklaşımlarında bu tür sorunlar çoğu zaman olay gerçekleştikten sonra analiz edilmektedir. Dijital ikiz yaklaşımı ise sistemin güncel durumunu izleme, alternatif senaryoları önceden değerlendirme ve karar vericilere öngörüye dayalı bilgi sağlama potansiyeli taşımaktadır (Zaidi vd., 2024).

Mevcut literatür incelendiğinde, dijital ikiz araştırmalarının büyük bölümünün üretim sistemlerine odaklandığı görülmektedir. Buna karşın lojistik ve afet yönetimi gibi sosyo-teknik açıdan daha karmaşık sistemlerdeki uygulamalar görece sınırlı kalmaktadır (Lagap & Ghaffarian, 2024; Benhamou vd., 2025). Bu çalışma, söz konusu araştırma boşluğunu ele alarak üç farklı uygulama alanını bütüncül bir çerçeve içinde değerlendirmektedir. Böylece alanlar arasındaki yapısal benzerlikler, farklılıklar ve ortak zorluklar karşılaştırmalı biçimde analiz edilmektedir.

Çalışma kapsamında, özellikle üç uygulama alanına odaklanılmıştır. Bu odak alanlar üretim, lojistik ve afet yönetimidir. Bu alanların birlikte seçilmesinin nedeni, her üçünde de fiziksel sistemlerin karmaşık yapıya sahip olması, veri temelli karar vermeye ihtiyaç duyulması ve operasyonel performans ile dayanıklılık hedeflerinin kritik önem taşımasıdır. Üretim alanı, dijital ikizlerin en erken ve en yaygın uygulama alanlarından biridir. Lojistik alanı, ağ yapısı ve belirsizlikler nedeniyle dijital ikizlerden önemli fayda sağlayabilecek bir alandır. Afet yönetimi ise dijital ikizlerin sadece verimlilik değil, can güvenliği, risk azaltma ve toplumsal dayanıklılık açısından da değer üretebileceğini göstermektedir (Lagap & Ghaffarian, 2024).

Bu çalışma, öncelikle dijital ikiz kavramının kapsamını ve benzer kavramlardan farkını açıklamakta, ardından dijital ikiz mimarisi ve etkinleştirici teknolojileri ele almaktadır. Üretim, lojistik ve afet yönetimi uygulamaları ayrı başlıklar altında tartışıldıktan sonra, modelleme ve karar destek yaklaşımları değerlendirilmektedir. Çalışma, karşılaştırmalı bir sentez ile zorluklar, yönetim gereksinimleri ve gelecek araştırma yönlerine ilişkin önerilerle tamamlanmaktadır. Bölümün temel katkısı, dijital ikiz teknolojisini yalnızca üretim sistemleriyle sınırlı ele almak yerine, lojistik ve afet yönetimi gibi daha karmaşık ve çok paydaşlı mühendislik sistemleri bağlamında karşılaştırmalı olarak değerlendirmesidir.

2. Dijital İkiz Kavramı ve Kavramsal Çerçeve

Dijital ikiz kavramı, genel olarak fiziksel bir varlığın, sürecin veya sistemin dijital ortamda oluşturulan dinamik karşılığı olarak tanımlanabilmektedir. Ancak bu tanım tek başına yeterli değildir. Dijital ikizi ayırt eden temel özellik, fiziksel sistem ile dijital temsil arasında veri alışverişine dayalı bir bağlantı bulunması ve dijital ortamın karar destek, tahminleme veya optimizasyon amacıyla kullanılabilmesidir (Fuller vd., 2020; Garro & Sorrenti, 2026).

Literatürde dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz kavramları arasında önemli bir ayırım yapılmaktadır (Fuller vd., 2020). Dijital model, fiziksel sistemin dijital ortamda oluşturulmuş statik veya sınırlı etkileşimli temsildir, fiziksel sistemden otomatik veri akışı yoktur. Dijital gölge, fiziksel sistemden dijital modele veri akışının olduğu ancak geri beslemenin sınırlı kaldığı yapıdır. Dijital ikiz ise fiziksel sistem ile dijital sistem arasında daha güçlü, güncel ve mümkün olduğunda çift yönlü ilişki içeren yapıdır. Bu çift yönlü ilişki, dijital ortamda yapılan analizlerin fiziksel sistemdeki kararları etkileyebilmesini sağlamaktadır (Iliuta vd., 2024).

Dijital ikizlerin gelişimi, ürün yaşam döngüsü yönetimi, akıllı üretim ve siber-fiziksel sistemler gibi alanlarla yakından ilişkilidir (Leirimo, 2024). Ürün tasarımından kullanım sonrası bakıma kadar uzanan süreçlerde verinin sürekli kullanılması, dijital ikizlerin değerini artırmaktadır. Dijital ikiz kavramı, farklı ölçeklerde uygulanabilmektedir. Tek bir makine düzeyinden üretim hattı, tedarik zinciri veya şehir ölçeğine kadar farklı büyüklüklerde sistemler temsil edilebilmektedir. Ölçek büyüdükçe modelin veri gereksinimi, hesaplama ihtiyacı, belirsizlik düzeyi ve yönetim karmaşıklığı artmaktadır.

Dijital ikiz kavramının daha doğru konumlandırılabilmesi için, dijital model ve dijital gölge gibi yakın kavramlarla arasındaki farkların açık biçimde ortaya konulması önemlidir. Bu ayırım özellikle veri akışının yönü, fiziksel sistemle kurulan ilişkinin niteliği ve karar destek kapasitesi açısından belirginleşmektedir. Bu doğrultuda Tablo 1’de dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz kavramları veri ilişkisi, temel özellikler ve örnek kullanım alanları bakımından karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Dijital model, dijital gölge ve dijital ikiz kavramlarının karşılaştırılması

Kavram	Veri İlişkisi	Temel Özellik	Örnek Kullanım
Dijital Model	Otomatik veri akışı yoktur.	Fiziksel sistemin statik veya sınırlı güncellenen dijital temsildir.	Bilgisayar destekli tasarım modeli, statik simülasyon, tasarım çizimi
Dijital Gölge	Fiziksel sistemden dijital ortama tek yönlü veri akışı vardır.	Fiziksel sistemin durumu izlenebilir ancak geri besleme sınırlıdır.	Makine performans panosu, sensör izleme sistemi
Dijital İkiz	Veri akışı dinamik ve mümkün olduğunda çift yönlüdür.	İzleme, simülasyon, tahminleme ve karar desteği birlikte çalışır.	Üretim optimizasyonu, tedarik zinciri senaryoları, afet karar desteği

Kaynak: Yazar tarafından Fuller vd. (2020) ve Garro & Sorrenti, (2026) çalışmalarından yararlanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 1’de görüldüğü üzere dijital ikizi dijital model ve dijital gölgeden ayıran temel unsur, fiziksel sistemle kurulan ilişkinin dinamik, güncel ve mümkün olduğunda çift yönlü bir yapıya sahip olmasıdır. Bu yapı, verinin izlenmesini ve analiz, simülasyon, tahminleme ve karar destek süreçlerinin bütünleşik biçimde yürütülmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla dijital ikizin işlevsel hâle

gelebilmesi, farklı teknolojik katmanların ve bileşenlerin uyumlu biçimde bir araya getirilmesine bağlı olmaktadır. Bu nedenle izleyen başlıkta dijital ikiz mimarisinin temel bileşenleri ele alınmaktadır.

3. Dijital İkiz Mimarisinin Temel Bileşenleri

Dijital ikiz teknolojisi, tek bir yazılım ya da tek bir modelden oluşmamaktadır. Başarılı bir dijital ikiz, farklı teknolojik ve yönetsel bileşenlerin bütünleşik çalışmasıyla ortaya çıkmaktadır (Dihan vd., 2024). Bu bileşenler genel olarak fiziksel sistem, veri toplama katmanı, bağlantı ve entegrasyon katmanı, dijital model, analitik ve simülasyon katmanı, görselleştirme arayüzü ve karar destek mekanizması olarak sınıflandırılabilir (Leirmo, 2024).

Fiziksel sistem, dijital ikizin temsil etmeyi amaçladığı gerçek varlık veya süreçtir. Dijital ikizin güvenilirliği, fiziksel sistemin hangi sınırlar içinde ele alındığına bağlıdır. Sistem sınırları belirsiz olduğunda model karmaşıklaşabilmekte ve karar desteği zayıflayabilmektedir. Veri toplama katmanı, dijital ikizin gerçek zamanlı veya belirli aralıklarla güncellenmesini sağlayan bilgi kaynaklarını içermektedir. Sensörler, IoT cihazları, üretim yürütme sistemleri, kurumsal kaynak planlama sistemleri (ERP), coğrafi bilgi sistemleri, uydu görüntüleri, araç takip sistemleri, bakım kayıtları ve insan kaynaklı gözlemler bu katmanın parçası olabilmektedir. Veri kalitesi dijital ikizin başarısını doğrudan etkilemekte ve eksik, hatalı veya gecikmeli veri model çıktılarının güvenilirliğini azaltabilmektedir (Ahn & Kim, 2023).

Bu bileşenler, dijital ikizin veri toplayan veya fiziksel sistemi temsil eden statik bir yapı olmasının yanı sıra fiziksel sistemden başlayarak veri toplama, entegrasyon, modelleme, analiz ve karar desteğine uzanan katmanlı bir mimariye sahip olduğunu göstermektedir. Katmanlar arasındaki veri akışı, dijital ikizin güncel kalmasını sağlarken geri besleme mekanizması, elde edilen analiz ve karar destek çıktılarının fiziksel sisteme yansıtılmasına imkan tanımaktadır.

Bağlantı ve entegrasyon katmanı, farklı veri kaynaklarının ortak bir yapı içinde birleştirilmesini sağlamaktadır. Mühendislik sistemlerinde veri çoğu zaman farklı formatlarda, farklı zaman çözünürlüklerinde ve farklı yazılım ortamlarında bulunmaktadır. Dijital model katmanı ise fiziksel sistemin davranışını temsil eden matematiksel, simülasyon tabanlı, veri odaklı veya hibrit modelleri içermektedir. Analitik ve simülasyon katmanı, dijital ikizin karar destek işlevini güçlendiren bölümdür, durum izleme, anomali tespiti, performans tahmini, senaryo analizi, risk değerlendirmesi ve optimizasyon bu katmanda gerçekleştirilebilmektedir. Son olarak karar destek ve geri besleme mekanizması, dijital ikizi pasif bir izleme aracından aktif bir yönetim aracına dönüştürmektedir. Otomasyon düzeyi yükseldikçe siber güvenlik, etik ve insan denetimi konuları daha önemli hale gelmektedir (Leirmo, 2024).

4. Dijital İkizi Etkinleştiren Teknolojiler

Dijital ikiz teknolojisinin gelişimi, birden fazla dijital teknolojinin aynı sistem içinde birlikte kullanılmasına bağlıdır (Fuller vd., 2020). Bu nedenle dijital ikiz, tek başına bağımsız bir teknoloji olarak değil, farklı teknolojileri bir araya getiren bütünleşik bir yaklaşım olarak görülmelidir. Nesnelerin interneti, sensör teknolojileri, bulut ve uç bilişim, yapay zekâ, simülasyon, coğrafi bilgi sistemleri ve siber güvenlik çözümleri dijital ikiz ekosisteminin temel bileşenleridir.

Nesnelerin interneti ve sensör teknolojileri, dijital ikizin gerçek sistemle bağ kurmasını sağlamaktadır. Bulut bilişim büyük miktarda verinin depolanması ve işlenmesi için ölçeklenebilir altyapı sağlarken, uç bilişim verinin kaynağa yakın noktada işlenmesini sağlamaktadır. Üretim kontrolü ve acil afet kararları gibi

düşük gecikme gerektiren uygulamalarda uç bilişim büyük öneme sahiptir (Kondo vd., 2024). Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, dijital ikizlerin mevcut ve gelecekteki durumları tahmin etmesini mümkün kılmaktadır. Ancak kritik mühendislik uygulamalarında model açıklanabilirliği ve insan denetimi vazgeçilmezdir. Siber güvenlik ise tüm bu bileşenlerin güvenli çalışması için tasarımın temel parçası olmalıdır (Kumaş, 2024).

Dijital ikiz mimarisinin etkin biçimde çalışabilmesi, katmanların doğru tanımlanmasına ve bu katmanları destekleyen teknolojilerin birlikte kullanılmasına bağlıdır. Sensörler ve IoT cihazları fiziksel sistemden veri elde edilmesini sağlarken, bulut ve uç bilişim bu verilerin depolanması, işlenmesi ve düşük gecikmeyle analiz edilmesine katkı sunmaktadır. Yapay zekâ, siber güvenlik ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojiler ise dijital ikizin tahminleme, karar destek, güvenilirlik ve kullanıcı etkileşimi boyutlarını güçlendirmektedir (Kobayashi & Alam, 2024). Bu çerçevede Tablo 2’de dijital ikiz teknolojisini destekleyen temel teknolojiler, dijital ikize katkıları ve örnek kullanım alanları açısından özetlenmektedir.

Tablo 2. Dijital ikiz teknolojisini destekleyen temel teknolojiler ve katkıları (Iliuță vd., 2024)

Teknoloji	Dijital İkize Katkısı	Örnek Kullanım Alanı
IoT ve Sensörler	Fiziksel sistemden sürekli veri toplar.	Makine durumu izleme, araç takip, altyapı sensörleri
Bulut ve Uç Bilişim	Verinin depolanması ve düşük gecikmeli analizini destekler.	Gerçek zamanlı üretim kontrolü, acil durum karar desteği
Yapay Zekâ	Tahmin, sınıflandırma, anomali tespiti ve optimizasyon sağlar.	Arıza tahmini, talep tahmini, risk sınıflandırması
Simülasyon	Alternatif senaryoların risksiz test edilmesini sağlar.	Üretim planlama, tedarik zinciri kesintisi, tahliye senaryosu
CBS ve Uzaktan Algılama	Mekânsal analiz ve harita tabanlı karar desteği sunar.	Rota planlama, risk haritalama, afet bölgesi izleme
Siber Güvenlik	Veri bütünlüğünü ve sistem güvenliğini korur.	Erişim kontrolü, kritik altyapı koruması, güvenli veri paylaşımı

Dijital ikiz teknolojisinin etkin biçimde uygulanabilmesi yapıyı destekleyen temel teknolojik bileşenlerin birlikte çalışmasına bağlıdır. Tablo 2’de özetlenen sensörler, IoT, yapay zekâ, bulut sistemleri, CBS ve siber güvenlik gibi unsurlar, dijital ikizin veri toplama, analiz etme, görselleştirme ve karar destek üretme işlevlerini mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik altyapı farklı sektörlerde değişen önceliklerle kullanılsa da dijital ikiz uygulamalarının en olgun ve yaygın örneklerinden biri üretim sistemlerinde görülmektedir. Bu nedenle, çalışmanın devamında üretim sistemlerinde dijital ikiz uygulamaları ele alınmaktadır.

5. Üretim Sistemlerinde Dijital İkiz Uygulamaları

Üretim sistemleri, dijital ikiz teknolojisinin en yaygın ve en gelişmiş uygulama alanlarından biridir. Bunun temel nedeni, üretim ortamlarında sensör verisinin giderek artması, makine ve süreç performansının sayısal olarak ölçülebilmesi ve operasyonel iyileştirmelerin doğrudan ekonomik sonuç üretmesidir. Dijital ikizler üretim sistemlerinde tasarım, planlama, işletme, bakım ve kalite yönetimi gibi farklı aşamalarda kullanılabilir (Ivanov vd., 2025).

Sanal devreye alma, dijital ikiz uygulamalarının üretimdeki ilk önemli alanlarından biridir. Yeni bir üretim hattı, robotik hücre veya otomasyon sistemi fiziksel olarak kurulmadan önce dijital ortamda test edilebilmekte, böylece tasarım hataları azaltılabilmekte, kurulum süresi kısaltılabilmekte ve yatırım riski düşürülebilmektedir. Süreç optimizasyonu açısından ise üretim hatlarında işlem

süreleri, beklentiler, ara stoklar, makine kullanım oranları ve iş gücü dağılımı dijital ikiz aracılığıyla izlenebilmektedir.

Kestirimci bakım, üretimde dijital ikizlerin en yüksek katma değer ürettiği alanlardan biridir. Geleneksel bakım yaklaşımlarında bakım ya arıza oluşuktan sonra yapılmakta ya da belirli zaman aralıklarına göre planlanmaktadır (Abd Wahab vd., 2024). Kestirimci bakımda ise sensör verileri ve analitik modeller kullanılarak arızanın oluşma olasılığı önceden tahmin edilmektedir. Bu yaklaşım plansız duruşları azaltabilmekte ve bakım kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlayabilmektedir. Kalite yönetimi de dijital ikiz uygulamalarından önemli ölçüde yararlanabilmektedir. Kalite yönetiminde sıcaklık, basınç, hız gibi proses parametreleri ile ürün kalite sonuçları arasındaki ilişkiler analiz edilerek sapmaların erken tespiti mümkün kılınabilmektedir (Nguyen vd., 2025).

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim açısından dijital ikizler, üretim planlarının enerji maliyetleri ve karbon emisyonu üzerindeki etkisini değerlendirmek için de kullanılabilir, bu yönüyle teknoloji, yeşil dönüşüm ve kaynak verimliliği hedefleriyle de örtüşmektedir. Üretim sistemlerinde dijital ikiz uygulamalarının başarılı olabilmesi için veri altyapısının olgun olması ve üretim personelinin dijital ikiz çıktılarını doğru yorumlayabilmesi gerekmektedir (Arshad vd., 2025).

6. Lojistik ve Tedarik Zinciri Sistemlerinde Dijital İkiz

Lojistik ve tedarik zinciri sistemleri, çok sayıda aktör, tesis, araç, rota, stok noktası ve bilgi akışından oluşan karmaşık ağlardır. Talep belirsizliği, teslimat gecikmeleri, kapasite kısıtları, doğal afetler, jeopolitik riskler, enerji maliyetleri ve iklim kaynaklı kesintiler bu ağların performansını etkileyebilmektedir. Dijital ikiz teknolojisi, lojistik sistemlerin görünürlüğünü artırarak karar vericilere ağınc güncel durumunu ve olası gelecek senaryoları değerlendirme imkânı sağlamaktadır (Benhamou vd., 2025).

Lojistik sistemlerde dijital ikiz yaklaşımının daha somut biçimde anlaşılabilmesi için fiziksel akış, izleme katmanı ve karar destek mekanizması arasındaki ilişkinin birlikte ele alınması gerekmektedir. Tedarikçiden üretim tesisine, dağıtım merkezinden müşterilere uzanan lojistik ağ, malzeme, bilgi ve geri dönüş akışlarıyla sürekli değişen dinamik bir yapı oluşturmaktadır. Dijital ikiz teknolojisi bu yapıyı sanal ortamda temsil ederek sistemin mevcut durumunun izlenmesini, olası aksaklıkların önceden değerlendirilmesini ve karar vericilere destek sağlayacak çıktılar üretilmesini mümkün kılmaktadır.

Gerçek zamanlı görünürlük, lojistikte dijital ikizlerin temel kullanım alanlarından biridir. Araçların konumu, yüklerin durumu, depo stokları ve teslimat performansı dijital ikiz ortamında izlenebilmektedir. Özellikle soğuk zincir, ilaç lojistiği ve gıda dağıtımı gibi alanlarda sıcaklık ve nem verilerinin izlenmesi oldukça önemlidir. Rota planlama ve ağ optimizasyonu açısından ise trafik yoğunluğu, yol kapanmaları, hava koşulları, araç kapasitesi ve teslimat zaman pencereleri dijital ikiz ortamında birlikte değerlendirilebilmektedir. Böylece maliyet, süre, emisyon ve hizmet kalitesi dengelenerek en uygun rota seçilebilmektedir (Akçacı & Tanır, 2025; Ivanov vd., 2025).

Tedarik zinciri dayanıklılığı açısından dijital ikizlerin değeri, Covid-19 salgını gibi küresel kesintilerin ardından önemli ölçüde artmıştır. Dayanıklılık; sistemin kesintilere karşı hazırlıklı olması, kesinti sırasında temel işlevlerini sürdürebilmesi ve kesinti sonrasında hızlı toparlanabilmesi anlamına gelmektedir. Dijital ikizler, risk senaryolarını önceden test etmek için uygun bir platform sağlamaktadır. Sürdürülebilir lojistik açısından da taşıma rotalarının

optimize edilmesi, boş araç kilometrelerinin azaltılması ve karbon emisyonlarının hesaplanması dijital ikiz ortamında yapılabilmektedir. Ancak tedarik zinciri dijital ikizlerinin uygulanması, çok sayıda bağımsız işletmeyi kapsadığından ve veri paylaşımı her zaman kolay olmadığından, üretim sistemlerine göre daha karmaşık bir yönetim yapısı gerektirmektedir (Bhandal vd., 2022).

Dijital ikiz teknolojisi, farklı yönetim alanlarında izleme, analiz ve karar destek süreçlerini bütünleştiren esnek bir yapı sunmaktadır. Üretimden bakıma, depodan taşımaya ve tedarik zincirine kadar birçok süreçte sistemin mevcut durumu dijital ortamda temsil edilerek olası problemler önceden değerlendirilebilmektedir. Tablo 3'te dijital ikiz uygulamalarının farklı kullanım alanları, beklenen faydaları ve örnek karar problemleri özetlenmektedir.

Tablo 3. Üretim ve lojistik sistemlerinde dijital ikiz kullanım alanları (Leirmo, 2024; Benhamou vd., 2025; Ivanov & Dolgui 2021)

Alan	Kullanım Amacı	Beklenen Fayda	Örnek Karar Problemi
Üretim hattı	Süreç izleme ve darboğaz analizi	Kapasite kullanımının artması, bekleme sürelerinin azalması	Parti büyüklüğü ve makine atama kararı
Bakım yönetimi	Arıza tahmini ve bakım planlama	Plansız duruşların azalması	Hangi makineye ne zaman bakım yapılmalı?
Kalite yönetimi	Proses-kalite ilişkisini izleme	Hata oranının azalması, erken uyarı üretimi	Hangi parametre kalite sapmasına yol açıyor?
Depo yönetimi	Yerleşim ve sipariş toplama analizi	Toplama süresinin azalması	Ürünler hangi raf düzeniyle yerleştirilmeli?
Taşıma yönetimi	Rota ve filo kararlarını destekleme	Maliyet ve emisyonun azalması	Hangi araç hangi rotayı izlemeli?
Tedarik zinciri	Kesinti senaryolarını değerlendirme	Dayanıklılığın artması	Tedarikçi gecikirse stok nasıl etkilenir?

Tablo 3'te görüldüğü üzere dijital ikiz uygulamaları, süreçlerin izlenmesine ve operasyonel kararların daha verimli ve risk odaklı biçimde alınmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle kapasite kullanımı, bakım planlama, kalite sapmaları, depo yerleşimi, rota seçimi ve tedarik kesintileri gibi karar problemlerinde dijital ikizler, senaryo değerlendirme ve erken uyarı mekanizmalarıyla yöneticilere önemli bir karar desteği sunmaktadır.

7. Afet Yönetiminde Dijital İkiz Uygulamaları

Afet yönetimi, dijital ikiz teknolojisinin toplumsal fayda üretme potansiyelinin en güçlü biçimde görülebileceği alanlardan biridir (Lagap & Ghaffarian, 2024). Deprem, sel, yangın, heyelan, fırtına ve endüstriyel kazalar gibi afetler, fiziksel altyapı, ulaşım ağları, sağlık hizmetleri, enerji sistemleri, haberleşme altyapısı ve lojistik kaynaklar üzerinde eş zamanlı baskı oluşturmaktadır. Afet anında karar vericiler çoğu zaman eksik veya gecikmeli bilgiyle hareket etmek zorunda kalabilmektedirler. Dijital ikiz yaklaşımı, farklı veri kaynaklarını birleştirerek afet öncesi hazırlık, afet sırası müdahale ve afet sonrası iyileştirme süreçlerinde karar desteği sağlayabilmektedir.

Risk azaltma ve hazırlık aşamasında bir kentin dijital ikizi, bina envanteri, nüfus dağılımı, yol ağı, hastaneler, toplanma alanları, kritik altyapı ve tehlike haritalarını içerebilmektedir. Bu verilerle farklı afet senaryoları analiz edilerek kaynak ön konumlandırma, tahliye planı ve müdahale ekiplerinin yerleşimi daha bilinçli planlanabilmektedir. Afet sırasında ise saha bildirimleri, sosyal medya verileri, insansız hava aracı görüntüleri, uydu görüntüleri ve sensör verileri dijital

ikiz ortamında birleştirilerek gerçek zamanlı durum farkındalığı sağlanabilmektedir, böylece müdahale kaynaklarının önceliklendirilmesi kolaylaşmaktadır (Shaharuddin vd., 2022).

Tahliye planlama, afet yönetiminde dijital ikizlerin önemli kullanım alanlarından biridir. Tahliye davranışı, yol kapasitesi, toplanma alanları ve zaman baskısı gibi faktörler birlikte değerlendirildiğinde hangi güzergâhlarda tıkanma oluşacağı önceden analiz edilebilmektedir. Afet lojistiği açısından dijital ikizler, yardım malzemelerinin tedarik, depolama, taşıma ve dağıtım süreçlerini destekleyebilmekte, değişen talep ve yol koşullarına göre alternatif dağıtım planları sunabilmektedir (Lagap & Ghaffarian, 2024). Kritik altyapı dayanıklılığı da önemli bir kullanım alanıdır, elektrik, su, haberleşme ve ulaşım altyapılarındaki kademeli bağımlılıklar dijital ikiz ile modellendiğinde zincirleme etkiler önceden anlaşılabilir. Afet yönetiminde dijital ikiz uygulamalarının en önemli zorluğu veri güvenilirliği ve zaman baskısıdır, bu nedenle afet dijital ikizleri belirsizlik altında çalışabilen, sade arayüzlere sahip ve insan karar vericilerle uyumlu sistemler olarak tasarlanmalıdır.

8. Dijital İkiz Geliştirme İçin Uygulama Yol Haritası

Dijital ikiz projeleri, yüksek potansiyel taşımaya rağmen yanlış tanımlandığında başarısız olabilmektedir. Bu nedenle uygulama süreci aşamalı ve problem odaklı biçimde yürütülmelidir. Dijital ikiz geliştirme, yazılım kurulumu ve fiziksel sistemin anlaşılması, karar probleminin tanımlanması, veri altyapısının hazırlanması, modelin kurulması, doğrulanması ve organizasyonel süreçlere entegre edilmesi gibi süreçleri içermektedir (Jeong vd., 2022).

Birinci aşama olan amaç ve kapsam tanımında dijital ikizin hangi problemi çözeceği açıkça belirlenmeli, karar vericilerin ihtiyaçları ve başarı göstergeleri netleştirilmelidir. İkinci aşamada sistem sınırları tanımlanmalıdır. Üçüncü aşamada veri envanteri ve veri kalitesi değerlendirilerek entegrasyon planı hazırlanmalıdır. Dördüncü aşamada problem türüne uygun modelleme yaklaşımı seçilmelidir. Beşinci aşamada model doğrulama ve geçişleme gerçekleştirilmelidir. Altıncı aşamada kullanıcı arayüzleri karar vericilerin ihtiyaçlarına göre tasarlanmalı, gereksiz karmaşıklıktan kaçınılmalıdır. Yedinci aşamada fiziksel sistem değiştiğinde, yeni veri geldikçe ve karar ihtiyaçları farklılaştıkça dijital ikizin de güncellenmesi için kurumsal mekanizmalar oluşturulmalıdır (Osama, 2024). Tüm aşamalar Tablo 4’te temel soru ve beklenen çıktılar ile birlikte detaylandırılmıştır.

Tablo 4. Dijital ikiz uygulama yol haritası

Aşama	Temel Soru	Beklenen Çıktı
1. Amaç Tanımı	Hangi karar problemi çözülecek?	Kapsam ve başarı ölçütleri
2. Sistem Sınırı	Hangi varlıklar ve süreçler dahil edilecek?	Sistem haritası ve paydaş listesi
3. Veri Envanteri	Hangi veri mevcut, hangisi eksik?	Veri kalitesi ve entegrasyon planı
4. Model Seçimi	Hangi yöntem problemi en iyi temsil eder?	Modelleme yaklaşımı ve araç seçimi
5. Doğrulama	Model gerçek sistemi yeterince temsil ediyor mu?	Test sonuçları ve güvenilirlik değerlendirmesi
6. Entegrasyon	Çıktılar karar süreçlerine nasıl aktarılacak?	Rapor, uyarı ve geri besleme mekanizması
7. Sürekli İyileştirme	Model nasıl güncellenecek?	Bakım, yönetim ve öğrenme süreci

Tablo 4'te görüldüğü üzere dijital ikiz uygulamalarının başarılı biçimde hayata geçirilebilmesi, modelin oluşturulmasına ve amacın doğru tanımlanmasına, sistem sınırlarının belirlenmesine, uygun veri altyapısının kurulmasına ve modelin düzenli olarak doğrulanmasına bağlıdır. Bu aşamalar birbirini tamamlayan bir yol haritası niteliği taşımakta ve dijital ikiz çıktılarının karar süreçlerine güvenilir biçimde aktarılmasını sağlamaktadır. Özellikle entegrasyon ve sürekli iyileştirme aşamaları, dijital ikizin statik bir model olmaktan çıkarak değişen sistem koşullarına uyum sağlayan dinamik bir karar destek aracı hâline gelmesine katkı sunmaktadır.

9. Performans Göstergeleri ve Değerlendirme Ölçütleri

Dijital ikiz uygulamalarının başarısını değerlendirmek için yalnızca teknolojik yeterliliklere odaklanmak yeterli değildir. Teknik performans göstergeleri veri doğruluğu, güncellik, model hata oranı, sistem gecikmesi ve model güvenilirliğini kapsamaktadır. Gerçek zamanlı karar desteği beklenen uygulamalarda veri gecikmesi önemli bir göstergedir, afet müdahalesinde birkaç dakikalık gecikme bile karar kalitesini etkileyebilmektedir (Leirmo, 2024).

Operasyonel performans göstergeleri uygulama alanına göre değişmektedir. Üretimde makine kullanılabilirliği, üretim çevrim süresi, fire oranı, bakım maliyeti ve enerji tüketimi, lojistikte teslimat süresi, araç doluluk oranı, servis seviyesi ve karbon emisyonu, afet yönetiminde ise müdahale süresi, kaynak ulaştırma oranı ve kritik altyapı hizmet sürekliliği izlenebilmektedir. Ekonomik göstergeler dijital ikiz yatırımının maliyet-fayda dengesini değerlendirmek için önemlidir. Çevresel göstergeler ise enerji tüketimi, yakıt kullanımı ve sera gazı emisyonu gibi sürdürülebilirlik hedeflerine katkıyı göstermektedir. Yönetimsel boyutta kullanıcı memnuniyeti, sistemin benimsenme düzeyi ve organizasyonel öğrenme de dijital ikiz uygulamasının sürdürülebilirliğini belirlemektedir (Benhamou vd., 2025; Lagap & Ghaffarian, 2024).

10. Zorluklar, Riskler ve Yönetişim Gereksinimleri

Dijital ikiz teknolojisi önemli fırsatlar sunmasına rağmen uygulamada teknik, ekonomik, kurumsal, etik ve güvenlik boyutlarında çeşitli zorluklar içermektedir. Veri kalitesi en temel zorluklardan biridir, eksik, hatalı veya tutarsız veri dijital ikiz performansını zayıflatmaktadır. Birlikte çalışabilirlik de kritik bir sorundur; üretim tesislerinde eski makineler ile yeni sensörler, lojistikte farklı işletmelere ait yazılımlar, afet yönetiminde farklı kurumların veri sistemleri bir arada çalışmak zorundadır, ISO 23247 gibi standartlaşma girişimleri bu açıdan önem taşımaktadır.

Model doğruluğu ve güvenilirlik de dikkat edilmesi gereken konulardır, dijital ikiz gerçek sistemi yanlış temsil ederse karar vericileri hatalı yönlendirebilmektedir. Siber güvenlik riski, fiziksel sistemlerle doğrudan bağlantılı dijital ikiz uygulamalarında daha önemli hâle gelmektedir. Üretim hattının durdurulması, lojistik verilerin bütünlüğünün bozulması veya afet yönetimi süreçlerinde yanlış bilgi üretilmesi gibi durumlar, operasyonel aksaklıkların ötesinde ciddi güvenlik, maliyet ve karar hatalarına yol açabilmektedir (Kumaş, 2024).

11. Üç Uygulama Alanının Karşılaştırmalı Analizi

Üretim, lojistik ve afet yönetimi uygulamaları, dijital ikiz teknolojisinin farklı güçlük ve olgunluk düzeylerini temsil etmektedir. Bu bölümde söz konusu üç alan, veri altyapısı, yönetim karmaşıklığı, modelleme gereksinimleri ve uygulama olgunluğu açısından karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmektedir.

Üretim sistemleri, dijital ikiz uygulamaları açısından en olgun ve uygulanabilir alanlardan biridir. Sensör altyapısı kurulu, performans ölçütleri belirlenmiş ve ekonomik geri dönüş hesaplanabilir. Bunun yanında tedarik zinciri ve lojistik uygulamaları daha karmaşıktır çünkü bu alanlarda çok sayıda bağımsız aktör, belirsiz çevresel koşullar ve veri paylaşım sorunları söz konusudur (Benhamou vd., 2025; Židek vd., 2020). Afet yönetimi ise tüm bu zorluklara ek olarak zamansal baskı, belirsiz veri kalitesi ve insani boyut nedeniyle en karmaşık uygulama alanı olarak öne çıkmaktadır (Lagap & Ghaffarian, 2024). Öte yandan afet yönetimindeki başarılı dijital ikiz uygulamaları, toplumsal fayda açısından en yüksek potansiyeli barındırmaktadır.

Üç alan arasındaki ortak nokta, karar vericilere sistemin bütününe görme imkânı sağlamasıdır. Üretimde bu bütünlük makine, hat, iş gücü ve kalite ilişkilerinde, lojistikte tedarikçi, depo, araç ve müşteri ilişkilerinde, afet yönetiminde ise tehlike, maruziyet, altyapı ve müdahale kapasitesi ilişkilerinde kendini göstermektedir. Bu nedenle dijital ikizler sistem düşüncesini teknik bir altyapıyla destekleyen araçlar olarak değerlendirilebilmektedir (Fuller vd., 2020). Temel farklılık ise üretimde tek organizasyonun kontrolünde bir altyapı söz konusuken, lojistikte çok paydaşlı ve afet yönetiminde çok kurumlu yapılar ortaya çıkmaktadır. Bu durum, veri paylaşım protokolleri ve ortak karar mekanizmaları açısından farklı tasarım gereksinimlerine yol açmaktadır.

Dijital ikiz uygulamalarının etkisi ve tasarım gereksinimleri, kullanıldıkları alana göre önemli ölçüde farklılaşmaktadır. Üretim sistemlerinde daha çok süreç verimliliği, kapasite kullanımı ve kestirimci bakım ön plana çıkarken, lojistikte ağ yapısı, rota optimizasyonu, stok yönetimi ve teslimat performansı daha belirleyici olmaktadır (Židek vd., 2020). Afet yönetiminde ise belirsizlik, çok paydaşlı yapı, zaman baskısı ve insani sonuçlar nedeniyle dijital ikiz uygulamaları daha karmaşık bir karar destek çerçevesi gerektirmektedir. Bu farklılıkları sistematik biçimde göstermek amacıyla Tablo 5'te üretim, lojistik ve afet yönetimi alanları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Tablo 5. Üç uygulama alanının karşılaştırmalı analizi (Benhamou vd. (2025), Lagap & Ghaffarian (2024), Leirimo (2024), Ozturk vd., (2024) temel alınarak yazar tarafından oluşturulmuştur.)

Boyut	Üretim	Lojistik	Afet Yönetimi
Uygulama Olgunluğu	Yüksek	Orta	Gelişmekte
Veri Altyapısı	Genellikle kurulu (sensörler, ERP)	Kısmen kurulu, veri paylaşımı zordur	Kurulu değil, afet anında kesintiye uğrayabilir
Yönetişim Karmaşıklığı	Tek organizasyon, görece düşük	Çok paydaşlı, orta-yüksek	Çok kurumlu, yüksek
Temel Modelleme Yöntemi	Simülasyon, makine öğrenmesi	Optimizasyon, sistem dinamiği	CBS, simülasyon, sistem dinamiği
Zamansal Baskı	Orta	Orta-yüksek	Çok yüksek
Toplumsal Fayda Potansiyeli	Ekonomik verimlilik	Ekonomik + çevresel	İnsani + toplumsal dayanıklılık

Tablo 5'te görüldüğü üzere üretim alanında dijital ikiz uygulamaları daha olgun ve veri altyapısı bakımından daha yerleşik bir yapı sergilerken, lojistik ve afet yönetimi alanlarında veri paylaşımı, paydaş koordinasyonu ve zaman baskısı daha belirgin zorluklar oluşturmaktadır. Özellikle afet yönetiminde verinin dağınık, dinamik ve kesintiye açık olması modelleme sürecinde CBS, simülasyon ve sistem dinamiği gibi yöntemlerin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu durum, dijital ikizlerin afet yönetiminde teknik bir izleme aracı olmasının yanında aynı zamanda hızlı karar alma, kaynak tahsisi ve toplumsal

dayanıklılığı artırma açısından stratejik bir karar destek mekanizması olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir.

12. Sonuç ve Öneriler

Dijital ikiz teknolojisi, mühendislik sistemlerinde izleme, simülasyon, tahminleme, optimizasyon ve karar destek işlevlerini bütünleştiren güçlü bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu bölümde gerçekleştirilen karşılaştırmalı inceleme teknolojinin üretim, lojistik ve afet yönetimi alanlarında farklı olgunluk düzeylerinde yer aldığını, ancak her üç alanda da fiziksel sistemlerin daha dayanıklı, verimli ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesine katkı sunabileceğini ortaya koymaktadır.

Uygulayıcılar ve araştırmacılar açısından dijital ikiz teknolojisinin etkin biçimde kullanılabilmesi, öncelikle bu teknolojinin teknik bir altyapı yatırımı ve belirli bir karar problemi etrafında yapılandırılan bütünleşik bir karar destek yaklaşımı olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Bu nedenle dijital ikiz projeleri teknoloji odaklı bir başlangıçtan ziyade, açıkça tanımlanmış problem alanları, performans hedefleri ve karar ihtiyaçları doğrultusunda tasarlanmalıdır. Veri altyapısının, veri kalitesinin ve veri yönetim süreçlerinin erken aşamada planlanması model doğrulama adımlarının sistematik biçimde yürütülmesi, geliştirilen dijital ikizin güvenilirliği açısından büyük öneme sahiptir. Bununla birlikte kullanıcı arayüzlerinin karar vericilerin gerçek bilgi ihtiyaçlarına uygun biçimde tasarlanması, karar süreçlerinde kullanılabilirliği artırmakta ve gereksiz model karmaşıklığının önüne geçmektedir. Ayrıca siber güvenlik, etik ilkeler ve mahremiyet konuları, dijital ikiz tasarımının sonradan eklenen unsurları olarak değil, başlangıç aşamasından itibaren dikkate alınması gereken temel tasarım bileşenleri olarak değerlendirilmelidir. Lojistik ve tedarik zinciri uygulamalarında ise teknik modelleme kapasitesinin yanında, paydaşlar arası güven, veri paylaşım protokolleri ve kurumsal yönetim mekanizmaları da uygulamanın başarısını doğrudan etkileyen belirleyici faktörler arasında yer almaktadır.

Araştırmacılar açısından dijital ikiz teknolojisi, mühendislik, veri bilimi, yönetim bilimleri, afet yönetimi, lojistik ve kamu politikası gibi farklı disiplinleri bir araya getiren güçlü bir araştırma alanı sunmaktadır. Özellikle tedarik zinciri dayanıklılığı, afet lojistiği, kritik altyapılar arasındaki karşılıklı bağımlılıklar, insan odaklı dijital ikiz tasarımı ve sürdürülebilirlik göstergelerinin dijital ikiz modellerine entegrasyonu, gelecek çalışmalar için önemli araştırma başlıkları olarak öne çıkmaktadır. Türkiye bağlamında değerlendirildiğinde ise aktif deprem kuşağında yer alan kentler, limanlar, lojistik koridorlar ve yoğun sanayi bölgeleri, dijital ikiz teknolojisinin uygulanabilirliği açısından stratejik öneme sahiptir. Bu nedenle dijital ikiz yaklaşımının ulusal afet yönetimi, kentsel dayanıklılık, lojistik planlama ve sanayi politikalarıyla ilişkilendirilmesi hem akademik araştırmalar hem de uygulamaya dönük politika geliştirme süreçleri açısından önemli bir gereklilik olarak değerlendirilebilmektedir. Sonuç olarak dijital ikiz teknolojisi, mühendislik sistemlerinin dijital ortamda temsil edilmesinin yanında daha akıllı, dayanıklı, verimli ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesini sağlayabilecek stratejik bir dönüşüm aracıdır. Ancak bu potansiyelin gerçekleşmesi için teknik altyapı, veri yönetimi, model güvenilirliği, kullanıcı kabulü ve etik ilkelerin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Kaynakça

- Abd Wahab, N. H., Hasikin, K., Lai, K. W., Xia, K., Bei, L., Huang, K., & Wu, X. (2024). Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices. *PeerJ Computer Science*, *10*, e1943.
- Ahn, E. Y., & Kim, S. Y. (2023). Digital twin application and bibliometric analysis for digitization and intelligence studies in geology and deep underground research areas. *Data*, *8*(4), 73.
- Akçacı, T., & Tanır, Y. M. (2025). Lojistik Sektöründe Dijital İkiz Uygulamaları. *Econder Uluslararası Akademik Dergi*, *9*(1), 96-115.
- Arshad, H. T., Wang, Z., Ji, T., & Peng, T. (2025). Digital Twin-driven carbon emissions management in manufacturing. *Manufacturing Letters*, *44*, 1718-1730.
- Benhamou, L., Giard, V., & Lamouri, S. (2025). Digital twins in supply chain management: Scope and methodological issues. *International Journal of Production Economics*, 109842.
- Bhandal, R., Meriton, R., Kavanagh, R. E., & Brown, A. (2022). The application of digital twin technology in operations and supply chain management: a bibliometric review. *Supply Chain Management: An International Journal*, *27*(2), 182-206.
- Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., ... & Hasan, M. M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*, *10*(5).
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, *8*, 108952-108971.
- Garro, A., & Sorrenti, A. (2026). Designing an ISO 23247-compliant Hybrid Digital Twin Architecture for industry. *Information and Software Technology*, 108039.
- Iliuță, M. E., Moisescu, M. A., Pop, E., Ionita, A. D., Caramihai, S. I., & Mitulescu, T. C. (2024). Digital twin—a review of the evolution from concept to technology and its analytical perspectives on applications in various fields. *Applied Sciences*, *14*(13), 5454.
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, *32*(9), 775-788.
- Ivanov, D., Dolgui, A., Das, A., & Sokolov, B. (2025). Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility. In *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain* (pp. 407-432). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Jeong, D. Y., Baek, M. S., Lim, T. B., Kim, Y. W., Kim, S. H., Lee, Y. T., ... & Lee, I. B. (2022). Digital twin: Technology evolution stages and implementation layers with technology elements. *Ieee Access*, *10*, 52609-52620.
- Kobayashi, K., & Alam, S. B. (2024). Explainable, interpretable, and trustworthy AI for an intelligent digital twin: A case study on remaining useful life. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *129*, 107620.
- Kondo, R. E., Andrade, W. J., de Mello Henequim, C., Lazzaretti, A. E., Junior, A. D. S. B., Loures, E. D. F. R., ... & Reynoso-Meza, G. (2024). An industrial edge computing architecture for Local Digital Twin. *Computers & Industrial Engineering*, *193*, 110257.

- Kumaş, E. (2024). International standards for digital twins. *Acta Infologica*, 8(2), 274-286.
- Lagap, U., & Ghaffarian, S. (2024). Digital post-disaster risk management twinning: A review and improved conceptual framework. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104629.
- Leirimo, T. L. (2024). Digital twins for Industry 5.0: Unlocking the human potential. *Procedia CIRP*, 130, 761-766.
- Nguyen, P., Kim, M., Nichols, E., & Yoon, H. S. (2025). AI-Driven Digital Twins for Manufacturing: A Review Across Hierarchical Manufacturing System Levels. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 26(1), 124.
- Osama, Z. (2024). The digital twin framework: A roadmap to the development of user-centred digital twin in the built environment. *Journal of Building Engineering*, 98, 111081.
- Ozturk, G. B., Brilakis, I., Ozen, B., Celenk, O., & Soygazi, F. (2024). Digital twins for knowledge management during earthquake emergency. In *8th International Project and Construction Management Conference Proceedings Book (IPCMC2024)*. Yıldız Technical University
- Shaharuddin, S., Abdul Maulud, K. N., Syed Abdul Rahman, S. A. F., & Che Ani, A. I. (2022). Digital twin for indoor disaster in smart city: A systematic review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 315-322.
- Zaidi, S. A. H., Khan, S. A., & Chaabane, A. (2024). Unlocking the potential of digital twins in supply chains: A systematic review. *Supply Chain Analytics*, 7, 100075.
- Židek, K., Pitel, J., Adámek, M., Lazorík, P., & Hošovský, A. (2020). Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept. *Sustainability*, 12(9), 3658.