TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

Editör
Prof. Dr. Ayhan AKYOL



DUVAR

TARIM, ORMAN VE SU BİLİMLERİNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR VE BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

Editör

Prof. Dr. Ayhan AKYOL*

* https://orcid.org/0000-0001-6442-0256

Tarım, Orman ve Su Bilimlerinde Yenilikçi Yaklaşımlar ve Bilimsel Çalışmalar

Editör
Prof. Dr. Ayhan AKYOL

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan BALPETEK
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN
Basım Tarihi: Ekim 2026
Yayıncı Sertifika No: 49837
E-ISBN: 978-625-5471-62-8

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvaryayinlari.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

Balık Beslemede Taurinin Değişen Rolü:
Gereksinimden Metabolik Düzenleyiciliğe
Derya GÜROY

2. Bölüm 46

Su Ayak İzi: Kavramsal Çerçeve ve Türkiye Perspektifi
Banu KUTLU, Ayşegül PALA

3. Bölüm 67

Yoğunlaştırılmış Ahşap Kavelaların Üretimi ve Yapısal Kullanım Alanları
Oğuzhan YÜKSEL, Hüseyin PELİT

4. Bölüm 88

Orman-Kent Arayüzleri, İklim Değişikliği ve
Afet Dirençliliği
Saadet Gökçen KARADUMAN, Ufuk ÖZKAN

5. Bölüm 106

Orman Ürünleri Sektöründe Odun Açığını Kapatmak
Arz Güvenliği, Döngüsel Kullanım ve Ekosistem Hizmetleri Bağlamında Bir Değerlendirme
Hikmet YAZICI, Vedat HEKİMOĞLU, Hakan ÇETİN

1. Bölüm

Balık Beslemede Taurinin Değişen Rolü: Gereksinimden Metabolik Düzenleyiciliğe

Derya GÜROY[1]

Özet

Balık ununun alternatif protein kaynaklarıyla ikame edilmesi, yemlerin doğal taurin içeriğini azaltarak taurinin modern balık beslemesindeki önemini artırmıştır. Proteinlerin yapısına katılmayan bu amino sülfonik asit; safra asidi konjugasyonu, lipidlerden yararlanma, hücresel ozmotik denge ve metabolik düzenlemeyle ilişkili işlevler üstlenmektedir. Bu kitap bölümünde taurinin biyosentezi ve türe özgü besinsel gereksinimleri, alternatif protein içeren yemlerdeki amino asit dengesiyle birlikte değerlendirilmektedir. Metiyonin, sistein, serin, glisin ve lizinle ilişkileri ele alınarak, taurin yanıtının hammadde bileşiminden bağımsız olarak yorumlanamayacağı ortaya konmaktadır. Gökkuşağı alabalığı, çipura, Avrupa levreği ve granyözde yürütülen çalışmalar, farklı yaşam evreleri ve yem koşullarında incelenen taurin düzeyleri açısından karşılaştırılmaktadır. Mevcut bulgular, uygun taurin takviyesinin bazı koşullarda büyüme ve yemden yararlanmayı destekleyebildiğini; karaciğer lipid birikimi, bağırsak bütünlüğü, bağışıklık ve redoks göstergeleri üzerinde etkili olabildiğini göstermektedir. Bağırsak mikrobiyotası ve safra asidi etkileşimleri, mitokondri işlevi, besin ve enerji algılama yolları ile endoplazmik retikulum stresi, deneysel kanıtların kapsamı gözetilerek tartışılmaktadır. Gen ifadesi ve omik ilişkiler, doğrudan fizyolojik ölçümlerden ve nedenselliği sınayan müdahalelerden ayrılır. Taurin gereksiniminin tür, yaşam evresi, temel yemin taurin içeriği, kükürtlü amino asit yeterliliği ve çevresel koşullara bağlı olması, tek bir evrensel takviye düzeyinin önerilmesini zorlaştırmaktadır. Biyolojik açıdan etkili düzey ile ekonomik optimumun farklılaşabileceği; sürdürülebilirlik değerlendirmesinin yem dönüşüm oranı, tamamlanmış yem maliyeti, besin tutulumu ve hammadde üretiminin çevresel yüklerini birlikte içermesi gerektiği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, taurin dengeli yem formülasyonu içinde değerlendirilmesi gereken,

[1] Yalova Üniversitesi, Armutlu Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Yalova, Türkiye
ORCID ID: 0000-0002-8254-1403

besinsel yeterlilik ile metabolik dayanıklılık arasında bağlantı kuran işlevsel bir bileşendir.

Anahtar kelimeler: Taurin; balık besleme; alternatif protein kaynakları; amino asit dengesi; safra asidi metabolizması; metabolik dayanıklılık.

1. Modern Balık Beslemede Taurinin Önemi

Balık yemlerinde balık unu kullanımının azaltılması, yemin ham protein düzeyinin ötesinde besinsel değişiklikleri beraberinde getirmektedir. Balık unu, protein ve diğer besin maddelerinin yanı sıra taurin de sağlarken, birçok bitkisel protein kaynağı çok düşük miktarda taurin içermekte veya taurin içermemektedir. Dolayısıyla benzer protein ve enerji düzeylerine sahip yemlerde bile balık ununun alternatif hammaddelerle ikame edilmesi, taurinin yemle sağlanan miktarını değiştirebilmektedir. Bu durum, denizel hammaddelere bağımlılığı azaltılmış yemlerin geliştirilmesinde taurini önemli bir formülasyon bileşeni hâline getirmiştir (Salze ve Davis, 2015). Besleme açısından temel mesele, hammadde karışımının hedef türün gereksinimlerini hangi ölçüde karşıladığının, ham protein düzeyiyle sınırlı kalmadan değerlendirilmesidir.

Taurin, ribozomal protein sentezi sırasında proteinlerin yapısına katılmayan, kükürt içeren bir amino sülfonik asittir. Serbest taurin havuzu; safra tuzu konjugasyonu, hücre hacminin düzenlenmesi ve metabolik homeostazla ilişkilidir. Ma ve ark. (2026), bu genel biyolojik işlevleri redoks dengesi, inflamasyon ve enerji metabolizmasıyla birlikte değerlendirmektedir. Derlemenin başlıca kanıt tabanı memeli ve klinik modellerden oluştuğundan, bu çerçeve balıklardaki gereksinim veya yem dozunun doğrudan kanıtı olarak kullanılmamalıdır. Balık türlerinin sentez kapasitesi ve besleme yanıtları, ilgili türün deneyleriyle değerlendirilmelidir.

Taurin takviyesine verilen yanıtın anlaşılmasında, yemin bütünündeki değişikliklerin dikkate alınması gerekir. Balık unu düzeyinin azaltılması; amino asit dengesi, lipid bileşimi, sindirilebilirlik ve diğer besinsel bileşenleri eş zamanlı olarak değiştirebilir. Bu nedenle taurin takviyesi, özellikle metiyonin ve sistein arzını kapsayan amino asit matrisi içinde değerlendirilmelidir. Sarıağız (*Argyrosomus regius*) üzerinde yürütülen çalışmalar bu yaklaşımı desteklemektedir. De Moura ve ark. (2018), bitkisel protein ağırlıklı bir yemde taurin ilavesiyle büyümenin iyileştiğini, ancak incelenen koşullarda büyüme açısından anlamlı bir metiyonin × taurin etkileşimi bulunmadığını bildirmiştir. Farklı bir yem bileşimi ve başlangıç balık büyüklüğüyle yürütülen çalışmada ise Saavedra ve ark. (2022), uygulanan taurin takviyesinin düşük metiyoninli gruptaki performans kaybını telafi etmediğini; daha yüksek metiyonin takviyesi içeren yemlerde taurin ilavesinin artırılmasının da ek büyüme avantajı

sağlamadığını göstermiştir. Bu bulgular, taurin yanıtının her denemenin besinsel koşulları içinde yorumlanması gerektiğine işaret etmektedir.

Tekil denemelerin değişken sonuçlarını birlikte değerlendiren Li ve ark. (2022), 86 yayını kapsayan meta-analizde 43 balık türünü incelemiştir. Balık alt grubunda taurin takviyesi son vücut ağırlığı ve protein etkinlik oranındaki artışla, FCR'deki düşüşle ilişkili bulunmuştur. Tür ve kontrol yeminin başlangıç taurin içeriği, yanıtı açıklayan önemli değişkenlerdir; temel yemin taurin düzeyi yükseldikçe, takviyenin sağladığı ek yarar azalmıştır. Bu sonuçlar, taurinin düşük balık unlu yemlerdeki rolünü desteklerken, bütün balıklarda aynı etkinin veya aynı dozun beklenmemesi gerektiğini de göstermektedir.

Büyüme ve yemden yararlanma, taurinin besinsel etkilerinin değerlendirilmesinde temel göstergeler olmakla birlikte, altta yatan fizyolojik süreçleri bütünüyle açıklamaz. Sarıağızda taurin takviyesiyle lipidlerin görünür sindirilebilirliğinin ve plazma ile ön bağırsaktaki toplam safra asidi düzeylerinin artması, taurin arzı ile lipidlerden yararlanma arasındaki ilişkiyi desteklemektedir (de Moura ve ark., 2019). Bu tür ölçümler, yem bileşimi ile fizyolojik işlev arasında bağlantı kurulmasını sağlar. Bununla birlikte, toplam safra asidi düzeyindeki değişimden hareketle safra asidi sentez hızının, mikrobiyal dönüşümlerin veya enterohepatik geri dönüşümün değiştiği doğrudan söylenemez. Bağırsak sinyallemesi, mikrobiyota ve konak metabolizmasına ilişkin mekanizmalar değerlendirilirken, ölçülen bulgular ile bu bulgulardan geliştirilen açıklamalar arasındaki ayrım korunmalıdır.

Bu bölümde taurin biyolojisi ve türe özgü besinsel gereksinimlerden başlayarak hammadde ve amino asit matrisi, lipid ve bağırsak fizyolojisi, hücresel korunma, çevresel strese verilen yanıtlar ele alınmaktadır. Omik yaklaşımlardan elde edilen bulgular, taurine verilen yanıtların anlaşılmasına katkıları doğrultusunda ilgili biyolojik başlıklara yerleştirilmektedir. Son kısımlarda ise bu bilgiler ekonomik formülasyon ve sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendirilmektedir. Biyolojik açıdan etkili bir takviye düzeyi her zaman ekonomik açıdan en uygun düzey olmayabileceği gibi, balık unu kullanımının azaltılması da tek başına çevresel ayak izinin azaldığını göstermez. Bu nedenle taurinin yem tasarımındaki değeri, biyolojik performans, üretim maliyetleri ve bütün besleme stratejisinin çevresel sonuçları birlikte dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

2. Taurin Biyolojisi ve Türe Özgü Besinsel Gereksinimler

2.1. Kimyasal yapı doku dağılımı ve taşınma

Taurin (2-aminoetansülfonik asit), karboksil grubu yerine sülfonik asit grubu taşıyan, kükürt içeren bir amino sülfonik asittir. Proteinlerin yapısına katılmaz ve

dokularda büyük ölçüde serbest formda bulunur. Bu özellik taurini protein sentezinde kullanılan amino asitlerden ayırırken, hücre içi serbest amino asit havuzunun önemli bileşenlerinden biri hâline getirir. Taurinin kas, karaciğer, beyin, retina ve diğer dokulardaki konsantrasyonu; tür, doku, gelişme dönemi, yem bileşimi ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir (Sampath ve ark., 2020).

Taurin, hücre içinde yüksek miktarda bulunabilen organik bir ozmolittir. Hücrenin su ve iyon dengesine uyum sağlanmasına katkıda bulunarak hücre hacminin korunmasını destekler. Steinberg (2022), farklı tuzluluklara uyum sağlayan balıklarda doku taurin havuzu ile taşıyıcı yanıtlarının bu işlev çerçevesinde değerlendirilmesini önermektedir. Bununla birlikte hücre içi ozmotik düzenleme, bütün balığın tuzluluk toleransıyla aynı ölçüt değildir; yem takviyesinin etkisi ilgili türde ayrıca sınanmalıdır.

Doku taurin düzeyi yalnızca endojen sentezin sonucu değildir. Yemle alınan taurin, bağırsaktan emilim, dokular arası dağılım, hücresel alım, safra tuzlarıyla kayıp ve geri kazanım ile atılım arasındaki denge tarafından belirlenir. Hücresel taşınmada sodyum ve klorüre bağımlı taurin taşıyıcısı (TauT)[2] temel rol oynar. TauT, düşük hücre içi taurin koşullarında alımı ve doku havuzunun korunmasını sağlayan düzenleyici sistemlerden biridir. Bununla birlikte, taurin taşıyıcısını kodlayan genin ifadesinin ölçülmesi tek başına gerçek taşıma hızını veya bütün vücut taurin durumunu göstermez; taşıyıcı proteinin miktarı, membrana yerleşimi, iyon gradyanları ve dokuya özgü metabolik koşullar da sonucu etkiler. Bu taşıma ve homeostaz çerçevesi genel taurin biyolojisinde tanımlanmıştır; balıklarda dokuya özgü nicel katkılar ayrıca sınanmalıdır (Ma ve ark., 2026).

Karaciğerdeki taurin havuzu, safra asitlerinin konjugasyonu ve enterohepatik dolaşım ile yakından ilişkilidir. Konjuge safra bileşikleri bağırsak lümenine salındıktan sonra bunların bir kısmı geri emilerek karaciğere geri döner. Bu nedenle plazma, karaciğer, safra veya bağırsakta ölçülen taurin ve toplam safra asidi değerleri farklı fizyolojik havuzları temsil eder. Herhangi bir bölmedeki konsantrasyon değişimi, sentez akışı ya da enterohepatik geri kazanım hızıyla eşanlamlı değildir. Bu ayrım, taurinin lipid sindirimi ve safra asidi metabolizmasındaki rolü ele alınırken özellikle önemlidir.

[2] TauT, sodyum ve klorüre bağımlı taurin taşıyıcısı proteinidir. Bu taşıyıcıyı kodlayan gen, çalışmalarda *taut* veya *slc6a6* olarak adlandırılmaktadır. Gen ifadesi, taşıyıcı proteinin etkinliği veya gerçek taurin taşıma hızıyla eş anlamlı değildir (Aragão ve ark., 2023; Ma ve ark., 2026).

2.2. Metiyonin sistein taurin biyosentez yolu

Taurinin başlıca endojen öncüleri kükürtlü amino asitler olan metiyonin ve sisteindir. Metiyonin, transmetilasyon ve transsülfürasyon tepkimeleri aracılığıyla sistein oluşumuna katkıda bulunabilir. Yaygın olarak kabul edilen sistein sülfinat yolunda sistein, sistein dioksijenaz (CDO) aracılığıyla sistein sülfinik aside dönüştürülür. Sistein sülfinik asit daha sonra sistein sülfinat dekarboksilaz (CSD veya CSAD) tarafından hipotaurine çevrilir; hipotaurinin oksidasyonu sonucunda taurin oluşur (Salze ve Davis, 2015).

Sistein sülfinat yolu, öncü amino asit arzını taurin oluşumuna bağlar; ancak bu bağlantı her koşulda aynı miktarda ürün oluştuğu anlamına gelmez. Ma ve ark. (2026), genel biyosentez çerçevesinde sisteaminin oksidasyonu üzerinden ilerleyen alternatif yolu da ele almaktadır. Balıklarda bu yolların göreli katkısı tür ve dokuya göre belirlenmelidir. Juvenil kalkan deneyinde öncü amino asit takviyesiyle CDO etkinliği ve doku taurininin değişmesi, CSD yanıtının ise aynı yönde olmaması bu ayrımın besinsel önemini göstermektedir (Wang ve ark., 2014).

Juvenil kalkan balığında metiyonin ve sistein takviyesi karaciğer CDO etkinliğini ve karaciğer taurin konsantrasyonunu artırmış, fakat CSD etkinliğini anlamlı biçimde değiştirmemiştir. Aynı çalışmada araştırmacılar, türün taurin sentezleme kapasitesi bulunduğunu ancak bunun fizyolojik gereksinimi karşılamak için yetersiz kalabileceğini belirtmiştir (Wang ve ark., 2014). Gökkuşağı alabalığında ise tamamen bitkisel proteinlere dayalı yemlerde metiyonin takviyesinin taurinin yerini almadığı gösterilmiştir (Gaylord ve ark., 2007). Bu bulgular, öncü amino asit miktarının artırılmasının doku taurin düzeyini veya büyümeyi her zaman yeterli ölçüde desteklemeyeceğini göstermektedir. Metiyoninin protein sentezi ve metil metabolizması gibi diğer görevleri ile sisteinin glutatyon sentezi ve oksidatif metabolizmadaki kullanımı, taurine yönelen metabolik akışı sınırlayabilir.

2.3. Tür yaşam evresi ve çevreye bağlı sentez kapasitesi

Balıklarda taurin sentez kapasitesi ve takviyeye verilen yanıt türler arasında değişmektedir. Deniz–tatlı su veya karnivor–omnivor ayrımı, araştırmaya yararlı bir başlangıç olsa da türün gereksinimlerini tek başına belirlemez. Li ve ark. (2022) meta-analizinde deniz balıklarının ortalama yanıtının tatlı su balıklarından daha yüksek olduğu bulunmuş; aynı zamanda tür ve temel yem taurininin önemli moderatörler olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle beslenme alışkanlığı veya habitat üzerinden sabit doz atanması yerine türün yaşam evresi, yemin analiz edilmiş bileşimi ve hedeflenen yanıt birlikte değerlendirilmelidir.

Endojen sentez kapasitesi statik değildir. Balığın yaşı ve büyüklüğü, büyüme hızı, gelişim dönemi, üreme durumu, tuzluluk ve hormonal düzenleme; biyosentez enzimlerini, TauT ifadesini ve doku taurin havuzlarını etkileyebilir. Erken yaşam evrelerinde hızlı doku oluşumu, sınırlı sentez kapasitesi ve canlı yemlerin farklı serbest amino asit profilleri nedeniyle yemle taurin arzı daha kritik olabilir. Buna karşın daha büyük balıklarda mutlak gereksinim artsa bile, birim yem veya kuru madde başına gerekli konsantrasyon farklılaşabilir. Bu nedenle bir büyüklük grubunda belirlenen optimum düzeyin larva, juvenil ve büyütme dönemlerine doğrudan aktarılması uygun değildir.

Erken gelişimde taurin yanıtı yalnızca ağırlık artışıyla değerlendirilmemelidir. Steinberg (2022), retinal gelişim ve başkalaşım dönemindeki taurin taşınmasını da vurgulamaktadır. Çipura larvalarında taurinle zenginleştirilmiş canlı yemlerin retina opsinleri ve bazı görme göstergeleriyle ilişkisi, besinsel yanıtın gelişim evresine göre değişebildiğini göstermektedir (Gaon ve ark., 2021). Opsinler, ışığın algılanmasında görev alan görsel pigment proteinleridir. Bu bulgular, larva yemlerinin değerlendirilmesinde büyümenin yanında duyu gelişiminin de izlenmesini desteklemektedir.

Gökkuşağı alabalığı yem matrisine bağlı yanıtları gösteren iyi bir örnektir. Tamamen bitkisel protein içeren ve taurini saptama sınırının altında kalan yemlerde taurin takviyesi büyüme, yemden yararlanma, protein tutulumu ve enerji tutulmasını iyileştirirken, balık unu içeren yemlerde aynı yanıt görülmemiştir (Gaylord ve ark., 2006). Sonraki çalışmada metiyonin fazlasının taurini ikame etmediği bildirilmiştir (Gaylord ve ark., 2007). Bu sonuçlar, bir türün endojen sentez yeteneği bulunmasının bütün yem koşullarında yeterli taurin statüsü sağlayacağını göstermediğini ortaya koymaktadır.

2.4. Taurinin zorunlu ve işlevsel besin olarak değerlendirilmesi

Bir besin maddesi, endojen üretimi belirli bir fizyolojik hedefi karşılamaya yetmediğinde yemle sağlanması gereken bir bileşen hâline gelir. Taurin açısından **esansiyel** terimi, hedef türün incelenen yaşam evresinde endojen sentez ve geri kazanım yoluyla yeterli taurin sağlayamaması nedeniyle yemle alıma ihtiyaç duymasını ifade eder. Bu tanım, taurinin protein yapısına katılmasını gerektirmez.

Koşullu esansiyel terimi ise sentez kapasitesinin normal koşullarda yeterli olabildiği, ancak hızlı büyüme, erken gelişim, üreme, hastalık veya çevresel stres gibi belirli biyolojik durumlarda gereksinimi karşılayamadığı koşulları tanımlar. Yemde balık ununun azaltılması doğrudan balığın biyolojik gereksinimini değiştirmeyebilir; daha çok yemin sağladığı taurin miktarını ve biyoyararlanımı değiştirir. Bu nedenle düşük balık unu içeren bir yemde takviye gereksinimi

ortaya çıkması ile yaşam evresine bağlı koşullu esansiyellik kavramsal olarak ayrılmalıdır.

İşlevsel besin maddesi ifadesi, taurinin asgari büyüme gereksiniminin ötesinde safra tuzu konjugasyonu, hücre hacminin düzenlenmesi, membran bütünlüğü, redoks dengesi ve stres yanıtları gibi süreçleri etkileyebilmesini anlatır. Ancak bu terim her dozda yarar sağlandığı anlamına gelmez. Bir türde büyüme yanıtının görülmemesi de taurinin hiçbir fizyolojik etkisi olmadığı sonucunu doğurmaz. Örneğin juvenil ot sazanında taurin takviyesi büyümeyi iyileştirmemiş, buna karşılık akut hipoksiye dayanma süresi ve eritrosit ozmotik stabilitesiyle ilişkili yanıtlar göstermiştir (Yang ve ark., 2013). Böylece büyüme gereksinimi, sağlıkla ilişkili yeterlilik ve stres koşullarındaki işlevsel yanıt için farklı ölçütler gerekebilir.

2.5. Gereksinimin belirlenmesi ve yorumlanması

Taurin gereksinimi tek bir sabit yüzde olarak ele alınamaz. Öncelikle hedef değişken tanımlanmalıdır: maksimum büyüme, en iyi yem değerlendirme oranı, azot tutulumu, normal doku taurin düzeyi, karaciğer sağlığı veya stres toleransı farklı doz–yanıt eşikleri verebilir. Avrupa levreği juvenilleriyle yürütülen bir doz–yanıt çalışmasında, bitkisel yem hammaddelerinin ağırlıkta olduğu koşullarda büyüme ve azot tutulumu temelli modelleme sonucunda taurin gereksinimi kuru madde üzerinden %0,47–0,50 olarak tahmin edilmiştir. Bununla birlikte maksimum yem ve protein kullanım göstergeleri daha yüksek yem taurin düzeylerinde elde edilmiştir (Martins ve ark., 2018). Bu örnek, "gereksinim" ve "en iyi gözlenen performans" ifadelerinin kullanılan yanıt ölçütü ve modele göre ayrılması gerektiğini göstermektedir.

Li ve ark. (2022), toplam yem taurini ile son ağırlık arasındaki kırık çizgi regresyonunda yanıt eğrisindeki kırılma noktasının %0,79 toplam taurin, yani 7,9 g/kg düzeyinde olduğunu bildirmiştir. Bu değer, farklı takson ve yem koşullarını birleştiren bir veri setinden türetilmiştir; yalnızca balıklara veya belirli bir Akdeniz türüne ait doğrulanmış bir gereksinim değildir. Yüksek çalışmalar arası heterojenlik ve yayın yanlılığı bulguları da dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla bu tahmin, tür bazlı doz denemelerini yönlendiren karşılaştırmalı bir ölçüt olarak kullanılabilir; ancak pratik yemlere evrensel bir takviye önerisi olarak aktarılamaz.

Gereksinim denemelerinin yorumlanmasında yemlerin **analiz edilmiş toplam taurin düzeyi** esas alınmalı; yalnızca ilave edilen kristal taurin miktarı kullanılmamalıdır. Başlangıç balık büyüklüğü, deneme süresi, yem alımı, protein kaynakları, metiyonin ve sistein düzeyleri, lipid bileşimi, replikasyon ve doz aralığı da raporlanmalıdır. En yüksek performansın denenen en yüksek dozda

ortaya çıkması, optimum değerin belirlendiği anlamına gelmez. Benzer biçimde, gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmaması gerçek biyolojik eşdeğerliği kanıtlamaz; denemenin istatistiksel gücü ve güven aralıkları dikkate alınmalıdır.

Bu çerçevede taurinin besinsel konumu üç ayrı soruyla değerlendirilmelidir: Balık, taurini endojen olarak üretebilmekte midir? Yemin toplam taurin arzı hedef fizyolojik işlev için yeterli midir? Daha yüksek bir düzey belirli bir üretim veya stres koşulunda ek işlevsel yarar sağlamakta mıdır? Bu soruların ayrılması, türe özgü gereksinim ile formülasyona bağlı takviye düzeyinin birbirine karıştırılmasını önler ve sonraki bölümde ele alınacak hammadde × taurin × kükürtlü amino asit ilişkilerinin temelini oluşturur.

2.6. Türkiye ve Akdeniz için önemli türlerde çalışılmış düzeyler

Türkiye'de 2025 yılında yetiştiricilik üretimi 626.591 tona ulaşmıştır. Türün ayrıntılı resmî tablosunda gökkuşağı alabalığı üretimi iç sularda 185.127 ton, denizde 74.888 ton ve toplamda 260.015 tondur. Aynı yıl çipura 164.643 ton, Avrupa levreği 174.859 ton ve granyöz (sarıağız) 9.657 ton olarak bildirilmiştir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2026). Alabalık için bütün *Salmo* türlerini de içeren toplu değer yerine *Oncorhynchus mykiss* verisinin kullanılması, üretim istatistikleriyle besleme deneylerinin aynı tür üzerinden karşılaştırılmasını sağlar. Üretim hacmi, bu türlerdeki yem verimliliği iyileştirmelerinin ülkemiz açısından önemini ortaya koymaktadır.

Gökkuşağı alabalığında bitkisel proteinli yemlere verilen yanıt, temel yem taurininin önemini göstermektedir (Gaylord ve ark., 2006, 2007). Çipurada larval görme ve gelişim bulguları ile juvenil bağışıklık yanıtları farklı yaşam evrelerini temsil eder; bunlardan ortak bir doz çıkarılamaz (Gaon ve ark., 2021; Ramos-Pinto ve ark., 2021). Avrupa levreğinde büyüme ve azot tutulumuna dayalı doz–yanıt tahminleri bulunurken, granyözde hem metiyonin–taurin ilişkisi hem de düşük balık unlu yemlerde tekil ve birleşik amino asit desteği araştırılmıştır (Martins ve ark., 2018; de Moura ve ark., 2018; Güroy ve ark., 2024, 2025) (Tablo 1).

Tablo 1. Gökkuşağı alabalığı çipura Avrupa levreği ve granyözde çalışılmış **taurin düzeyleri**

Tür ve çalışma	Yem koşulu ve deneme	Taurin düzeyi g/kg	Bildirilen etkiler ve sonuçlar
Gökkuşağı alabalığı *Oncorhynchus mykiss* Gaylord ve ark. 2006	26,8 g; 9 hafta. %23 balık unlu ve tamamen bitkisel yem serileri.	İlave 0, 5, 10, 15; kuru yem. Temel yem: balık unlu 2; bitkisel <0,1.	Bitkisel yemlerde büyüme, FCR ve protein/enerji tutulumu iyileşti; balık unlu seride aynı yarar görülmedi.
Gökkuşağı alabalığı Gaylord ve ark. 2007	18,4 g; 12 hafta. Tamamen bitkisel yem; 3 × 3 taurin–metiyonin düzeni.	İlave 0, 5, 10; kuru yem. Taurinsiz takviye grubunda toplam 3,6.	Büyüme için taurin eğilimi P = 0,096; FCR etkisi yok. Fazla metiyonin taurinin yerini almadı.
Çipura *Sparus aurata* Gaon ve ark. 2021	Larva; rotifer 2–13, *Artemia* 14–31. günlerde. Canlı yem zenginleştirmesi.	Canlı yemde toplam, kuru madde: rotifer 1,7; 6,6; 11,0. *Artemia* 36,6; 51,5; 61,9.	Rotifer tauriniyle erken büyüme ve bazı görme göstergeleri ilişkiliydi.
Çipura Ramos-Pinto ve ark. 2021	Juvenil; 4 hafta, 2. ve 4. hafta örnekleme. %12 balık unu.	İlave 0 veya 5 g/kg yem. Analiz tablosu taurini ham proteine göre verir; toplam yem dozu gibi okunmamalı.	Son ağırlık ve göreli büyüme değişmedi. Mukus bakterisidal etkinliği ve *mIgT* gen ifadesi örnekleme zamanına göre değişti.
Avrupa levreği *Dicentrarchus labrax* Martins ve ark. 2018	55 g; 10 hafta. Proteinin %80'i bitkisel kaynaklı.	Toplam 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 17; kuru madde. İlave 0–15.	Büyüme için 5,0; azot tutulumu için 4,7 g/kg KM toplam yem taurini modelle tahmin edildi.
Avrupa levreği Kotzamanis ve ark. 2020	78 g; 12 hafta. %15 balık unlu yemler; %30 balık unlu referans.	Düşük balık unlu yemlere ilave 0, 5, 10, 20 g/kg.	20 g/kg ilave grubunda büyüme, %30 balık unlu referansla benzerdi.
Granyöz veya sarıağız *Argyrosomus regius* de Moura ve ark. 2018	50 g; 65 gün. %8 balık unu + %2 çözünür balık proteini; metiyonin × taurin.	İlave 0 veya 10. Analiz edilmiş toplam 1,3 veya 12,4; kuru madde.	Taurin ana etkisiyle büyüme arttı; büyümede metiyonin × taurin etkileşimi anlamlı değildi.

Tür ve çalışma	Yem koşulu ve deneme	Taurin düzeyi g/kg	Bildirilen etkiler ve sonuçlar
Granyöz Matias ve ark. 2020	3,2 g; 38 gün. Balık unsuz, jelatin/kazein içeren yarı saf yemler.	Analiz edilmiş toplam 0,7; 5,2; 9,8; 14,6; 21,1; kuru madde.	En yüksek büyüme en yüksek test düzeyinde görüldü; doku proteoliz göstergeleri değişti.
Granyöz Güroy ve ark. 2024	23,5 g; 12 hafta. %38,5 veya %11 balık unu; her seride dört doz.	İlave 0, 5, 10, 20. Düşük balık unlu seride toplam 0,8; 6,1; 11,1; 20,4 g/kg KM.	Düşük balık unlu seride 5 g/kg ilave grubunda büyüme ve yayımlanmış FCR öne çıktı.
Granyöz Güroy ve ark. 2025	32,4 g; 12 hafta. %11 balık unlu yemlerde taurin/lizin/metiyonin kombinasyonları.	Taurin ilavesi 5; lizin 9; metiyonin 2,5. Taurinli gruplarda toplam taurin 6,2–6,5.	Üçlü amino asit desteği sayısal olarak en yüksek büyümeyi ve en düşük FCR'yi verdi.

Not: Güroy ve ark. (2024) çalışmasında genel taurin FCR ana etkisi anlamlı değildir; ilgili yem serisindeki grup karşılaştırmaları esas alınmalıdır. Güroy ve ark. (2025) tam faktöriyel değildir; birleşik destek tek başına taurin etkisini veya sinerjiyi kanıtlamaz.
Not: %1 = 10 g/kg; KM kuru maddeyi gösterir. İlave taurin miktarı ile analiz edilmiş toplam taurin farklıdır. Canlı yem için mg/g KM ve g/kg KM sayısal olarak eşdeğerdir; canlı yem konsantrasyonu kuru yeme katılan miktarla doğrudan karşılaştırılamaz. Düzeyler incelenen deneylere aittir ve ticari doz önerisi değildir.

3. Alternatif Protein İçeren Yemler ve Amino Asit Matrisi

3.1. Balık unu ikamesinin taurin arzına etkisi

Balık ununun azaltılması, yemde yalnızca bir protein kaynağının değiştirilmesi anlamına gelmez. Balık unu; dengeli esansiyel amino asit profili, yüksek sindirilebilirlik ve çeşitli mikrobesinlerin yanı sıra doğal taurin sağlar. Bitkisel proteinlerin çoğu ise çok az taurin içerir veya ölçülebilir miktarda taurin içermez. Bu nedenle soya ürünleri, tahıl proteinleri ve baklagil kökenli konsantrelerin kullanımının artması, yemlerin analiz edilmiş toplam taurin düzeyini düşürebilir. Aynı ham protein ve enerji düzeyine sahip iki yem, taurin ve diğer işlevsel bileşenler bakımından belirgin biçimde farklı olabilir.

Alternatif protein kaynakları tek bir besinsel kategori oluşturmaz. Bitkisel hammaddeler taurin bakımından fakir olmanın yanı sıra metiyonin ve lizin gibi esansiyel amino asitler bakımından sınırlayıcı olabilir; lif, nişasta ve antinutrisyonel bileşen miktarları da hammaddeye ve işleme yöntemine göre değişir. İşlenmiş karasal hayvansal proteinlerin taurin içeriği bitkisel proteinlerden yüksek olabilmekle birlikte kullanılan dokulara ve üretim sürecine bağlı olarak geniş değişkenlik gösterebilir. Böcek, alg, maya ve bakteriyel tek

hücre proteinleri de amino asit profili, hücre duvarı, nükleik asit içeriği, lipid bileşimi ve taurin arzı açısından birbirinin yerine kullanılabilecek homojen hammaddeler değildir. Formülasyonda "alternatif protein" ifadesi yerine her hammaddenin analiz edilmiş besin profili ve kullanım düzeyi esas alınmalıdır.

Gökkuşağı alabalığında tamamen bitkisel protein içeren yemler bu ilkeyi açık biçimde göstermiştir. Gaylord ve ark. (2006), taurin düzeyi belirleme sınırının altında olan bitkisel yemlerde taurin takviyesinin büyüme, FCR, protein tutma etkinliği ve enerji tutma etkinliğini iyileştirdiğini; balık unu içeren ve doğal taurin sağlayan yemlerde ise aynı takviyenin bu göstergeleri etkilemediğini bildirmiştir. Buradaki yanıt, taurinin bütün yemlerde genel bir büyütme etkisi oluşturmasından çok, belirli bir yem matrisindeki sınırlılığın giderilmesiyle uyumludur.

3.2. Hammadde taurin etkileşimi

Bir taurin takviyesinin etkisi, çıkarılan balık unu miktarı kadar onun yerine kullanılan hammaddenin besinsel özelliklerine de bağlıdır. Senegal dil balığında denizel proteinin %85'inin bitkisel kaynaklarla ikame edildiği yemlerde yapılan kısa süreli izleme çalışması, düşük taurin içeren gruplarda triaçilgliserol sindirim kapasitesinin daha zayıf olduğunu göstermiştir. Artan taurin düzeyi, yemdeki amino asitlerden kas dokusunda tutulan fraksiyonu da artırmıştır. Bununla birlikte çalışma kısa süreli metabolik izleme tasarımına dayandığından, uzun dönem büyüme yararı doğrudan gösterilmemiştir (Richard ve ark., 2017). Bu örnek, mekanistik bir bulgunun üretim dönemi performansına otomatik olarak dönüştürülmemesi gerektiğini gösterir.

Yeni protein kaynaklarında tek bir eksikliğin giderilmesi de her zaman yeterli değildir. *Clostridium autoethanogenum* proteinini yüksek düzeyde içeren kalkan yemlerinde hidroksiprolin, taurin ve kolesterolün birlikte verilmesi bazı balık unu ikame düzeylerinde büyüme ve kas tekstürü göstergelerini iyileştirmiştir (Pan ve ark., 2024). Ancak üç bileşen tek bir karışım olarak uygulandığı için gözlenen etkinin ne kadarının taurinden kaynaklandığı belirlenemez. Çalışmanın asıl katkısı, yeni bir hammaddenin kullanım sınırının taurin, kolesterol ve bağ dokusu metabolizmasıyla ilişkili besinler gibi birden fazla bileşen tarafından birlikte belirlenebileceğini göstermesidir.

Atlantik somonunda düşük balık unlu bir yeme taurin, taurokolat, metiyonin, sistein, kolesterol, kolin veya fosfatidilkolinin ayrı ayrı eklendiği çalışma da benzer bir uyarı sunmaktadır. Bu modelde enterositlerdeki aşırı lipid birikimini taurin ortadan kaldırmamış; belirgin düzelme kolin ve fosfatidilkolin takviyeleriyle görülmüştür (Krogdahl ve ark., 2020). Dolayısıyla düşük balık

unlu yemlerde gözlenen her lipid veya bağırsak bozukluğu taurin eksikliğine bağlanamaz. Önce hangi besinsel sınırlılığın söz konusu olduğu belirlenmelidir.

Japon levreğinde uygulanan 3 × 3 faktöriyel deneme, hammadde düzeyiyle taurin dozunu aynı tasarım içinde karşılaştıran güncel bir örnektir. Balık unu %25, %20 ve %15 düzeylerine düşürülmüş; ikamede soya küspesi ve soya protein konsantresi kullanılmış ve her düzeyde %0, %0,5 veya %1 taurin denenmiştir. En yüksek büyüme %20 balık unu ve %1 taurin kombinasyonunda bildirilmiş, taurin yanıtının balık unu düzeyine göre değişebildiği görülmüştür (Xu ve ark., 2026). Bu sonuç, en yüksek taurin dozunun en düşük balık unu düzeyindeki bütün sınırlılıkları mutlaka giderdiği biçiminde yorumlanmamalıdır.

3.3. Taurin metiyonin ve sistein dengesi

Metiyonin, sistein ve taurin metabolik olarak bağlantılıdır; ancak besinsel görevleri birbirinin aynısı değildir. Metiyonin protein sentezi için esansiyeldir, metil gruplarının aktarımında görev alır ve transsülfürasyon yoluyla sistein oluşumuna katkıda bulunur. Sistein protein ve glutatyon sentezinde kullanılırken taurin biyosentezinin doğrudan öncüsüdür. Taurin ise protein yapısına katılmaz. Bu nedenle toplam kükürtlü amino asit arzı yeterli görünse bile metiyonin gereksinimi, sistein arzı ve taurin statüsü ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Kükürtlü amino asitler arasındaki ikame veya koruyucu etki türe ve yem matrisine göre değişmektedir. Tamamen bitkisel proteinle beslenen gökkuşağı alabalığında gereksinimin üzerinde metiyonin ilavesi taurinin yerini almamış ve büyümeyi desteklememiştir (Gaylord ve ark., 2007). Buna karşılık juvenil sarıkuyruk kral balığında iki metiyonin ve yedi taurin düzeyini içeren ortogonal doz–yanıt çalışması, yüksek metiyonin düzeyinde yem taurin ihtiyacının azaldığını göstermiştir. Yaklaşık 10,9 g/kg metiyonin içeren yemlerde büyüme için 7,7 g/kg taurin tahmin edilirken, yaklaşık 17,2 g/kg metiyonin ve en az 1,6 g/kg bazal taurin içeren yemlerde ek taurin gerekmemiştir (Candebat ve ark., 2020). Denemenin planlanandan önce bir sistem arızası nedeniyle sonlandırıldığı ve bazı kompozisyon analizlerindeki replikasyonun azaldığı dikkate alınmalıdır; büyüme tasarımının metiyonin × taurin bağını doğrudan sınaması ise çalışmayı yine de önemli kılmaktadır.

Sarıağız çalışmalarında da taurin ve metiyonin ilişkisi bağlama göre değişmiştir. De Moura ve ark. (2018), bitkisel protein ağırlıklı yemlerde taurinin büyümeyi artırdığını, metiyoninin ve metiyonin × taurin etkileşiminin büyüme üzerinde anlamlı olmadığını bildirmiştir. Saavedra ve ark. (2022) ise düşük metiyonin içeren yemlerde taurinin performans kaybını telafi etmediğini ve daha yüksek metiyonin düzeyinde taurinin artırılmasının ek büyüme yararı sağlamadığını göstermiştir. Bu iki çalışma çelişkili kabul edilmeden önce balık

büyüklüğü, temel yem bileşimi, analiz edilmiş amino asit düzeyleri ve deneme tasarımlarındaki farklılıklar dikkate alınmalıdır.

Bu kanıtlar, "metiyonin taurini korur" veya "taurin metiyonin yetersizliğini giderir" biçimindeki genel ifadelerin bütün türlere uygulanamayacağını göstermektedir. Koruyucu etkinin ortaya çıkabilmesi için endojen sentez yolunun yeterli kapasiteye sahip olması, metiyoninin protein sentezi ve diğer zorunlu metabolik işlevlerden sonra taurine yönlendirilebilmesi ve sisteinden taurine uzanan enzimatik basamakların sınırlayıcı olmaması gerekir.

3.4. Serin glisin ve genişletilmiş amino asit matrisi

Serin, homosisteinle birleşerek sistatiyonin oluşumuna katıldığı için transsülfürasyon yolu ile dolaylı biçimde kükürtlü amino asit metabolizmasına bağlanır. Bununla birlikte serin doğrudan taurin öncüsü olarak tanımlanmamalıdır. Yüksek bitkisel proteinli yemle beslenen juvenil kalkanda %3 serin ilavesi yem tüketimini, bütün vücut taurin düzeyini ve bazı karaciğer histolojisi göstergelerini iyileştirmiş; büyüme ve yemden yararlanma üzerinde ise anlamlı bir artış oluşturmamıştır. Karaciğer CSD ve ADO etkinliği ile karaciğer ve serum taurin düzeyleri değişmemiştir (Qi ve ark., 2026). Bu nedenle çalışma, serinin taurin sentezine katkıda bulunabileceği hipotezini desteklese de serinden taurine metabolik akışı doğrudan göstermemektedir. İzotopla işaretli serin ve dokuya özgü akış analizleri olmadan dönüşümün büyüklüğü belirlenemez.

Glisin de taurin sentez yolunun doğrudan bir öncüsü değildir. Bununla birlikte düşük balık unlu yemlerin değerlendirilmesinde glisin arzı; protein ve enerji metabolizması, safra asidi konjugasyonundaki türe özgü farklılıklar, kollajen bakımından zengin hammaddelerin azalması ve yem çekiciliği gibi nedenlerle önem kazanabilir. Balık türlerinin çoğunda safra asidi konjugasyonunda taurin güçlü bir ağırlığa sahip olsa da safra bileşimi türler arasında değişir. Bu nedenle glisin ile taurini basitçe birbirinin yerine geçen katkılar olarak ele almak uygun değildir.

Lizin ise taurin biyosentez yolunda yer almaz, ancak bitkisel protein ağırlıklı yemlerde sıklıkla sınırlayıcı olduğundan taurine verilecek büyüme yanıtını belirleyebilir. Güroy ve ark. (2025), düşük balık unlu sarıağız yemlerinde taurin, lizin ve metiyoninin seçilmiş kombinasyonlarının performansı iyileştirebildiğini göstermiştir. Deneme taurin takviyesinin esansiyel amino asit yeterliliğinden bağımsız değerlendirilmemesi gerektiğine dair uygulamalı bir örnek sağlar.

3.5. Formülasyon açısından uygulama ilkeleri

Alternatif protein içeren bir yemde taurin kararının yalnızca balık unu yüzdesine bağlanması yeterli değildir. Formülasyon ve deneme raporlarında şu bilgiler birlikte değerlendirilmelidir:

1. Hammadde ve bitmiş yemin analiz edilmiş toplam taurin düzeyi,
2. İlave edilen kristal taurin miktarı ve saflığı,
3. Toplam ve mümkünse sindirilebilir metiyonin, sistein ve lizin düzeyleri,
4. Balık unu yerine kullanılan hammaddelerin türü, işlenme yöntemi ve ikame oranı,
5. Kolin, fosfolipid, kolesterol ve hidroksiprolin gibi birlikte sınırlayıcı olabilecek bileşenler,
6. Balığın türü, yaşam evresi, büyüklüğü ve çevresel koşulları,
7. Büyüme yanında FCR, besin tutulumu, doku taurin düzeyi ve ilgili fizyolojik göstergeler.

Deneysel olarak en güçlü yaklaşım, birden fazla hammadde veya balık unu düzeyi ile birden fazla taurin dozunu faktöriyel düzende karşılaştırmak ve temel yemlerin diğer sınırlayıcı besinlerini yeterli düzeyde tutmaktır. Amino asitler arasındaki koruyucu etki iddiaları için ilgili besinlerin nicel doz–yanıt düzeyleri gerekir. Birden fazla bileşenin tek karışım olarak uygulanması pratik bir ürün stratejisini sınayabilir; ancak hangi bileşenin etkili olduğunu veya gerçek bir sinerji bulunduğunu göstermez.

Taurin böylece alternatif proteinlerin kullanımını otomatik olarak mümkün kılan genel bir katkı olarak değil, belirli bir hammadde matrisindeki tanımlanmış besinsel sınırlılığı giderebilen bir formülasyon bileşeni olarak değerlendirilmelidir. Bu yaklaşım hem etkisiz takviyeleri önler hem de taurinin lipid kullanımı, bağırsak sağlığı ve doku metabolizması üzerindeki etkilerinin doğru besinsel bağlamda yorumlanmasını sağlar.

Tablo 2. Amino asit ve hammadde uygulamalarının bildirilen etkileri

Çalışma ve tür	Besinsel uygulama	Bildirilen etkiler ve sonuçlar
Gaylord ve ark. (2006) Gökkuşağı alabalığı	Balık unlu ve tamamen bitkisel proteinli yemlere taurin	Bitkisel yemlerde büyüme, FCR, protein ve enerji tutulumu iyileşti; balık unlu seride aynı yanıt görülmedi.
Gaylord ve ark. (2007) Gökkuşağı alabalığı	3 taurin × 3 metiyonin düzeyi	Taurinin büyüme eğilimi anlamlılık sınırına ulaşmadı (P = 0,096); FCR etkilenmedi. Fazla metiyonin taurinin yerini almadı.
Richard ve ark. (2017) Senegal dil balığı	%85 denizel protein ikamesi ve artan taurin	Triaçilgliserol sindirim kapasitesi ve kas amino asit tutulumu arttı.
Candebat ve ark. (2020) Sarıkuyruk kral balığı	2 metiyonin × 7 taurin düzeyi	Yüksek metiyonin içeren yemlerde büyüme için gerekli taurin takviyesi azaldı.
Krogdahl ve ark. (2020) Atlantik somonu	Düşük balık unlu yeme tekil besin takviyeleri	Enterosit lipid birikimini kolin ve fosfatidilkolin giderdi; taurin ve taurokolat gidermedi.
Pan ve ark. (2024) Kalkan	Bakteriyel proteinli yemlerde hidroksiprolin, taurin ve kolesterol karışımı	Bazı balık unu ikame düzeylerinde büyüme ve kas tekstürü göstergeleri iyileşti.
Qi ve ark. (2026) Kalkan	Yüksek bitkisel proteinli yeme %3 serin	Bütün vücut taurini arttı; büyüme ve yemden yararlanma anlamlı biçimde değişmedi.
Xu ve ark. (2026) Japon levreği	3 balık unu × 3 taurin düzeyi	En yüksek büyüme %20 balık unu ve %1 taurin grubunda bildirildi; %15 balık unlu yemlerdeki kayıp bütünüyle telafi edilmedi.
Güroy ve ark. (2024) Granyöz	%38,5 ve %11 balık unu; 0–20 g/kg ilave taurin	Düşük balık unlu seride 5 g/kg grubunun FCR'si 1,02; taurinsiz grubun 1,89 olarak bildirildi.
Güroy ve ark. (2025) Granyöz	%11 balık unlu yemlerde taurin, lizin ve metiyonin kombinasyonları	Üçlü destekte FCR 1,09; takviyesiz düşük balık unlu grupta 2,03 olarak bildirildi.

Not: Karışım katkılarının etkisi bileşenlere ayrı ayrı dağıtılamaz. Candebat ve ark. (2020) denemesi sistem arızası nedeniyle erken sonlandırılmıştır. Güroy ve ark. (2024) FCR değerleri aynı düşük balık unlu seri içindeki karşılaştırmadır; genel taurin ana etkisi anlamlı değildir.

4. Lipid Metabolizması Safra Asitleri ve Karaciğer Sağlığı

4.1. Taurinin safra asidi metabolizmasındaki konumu

Taurinin balık beslemedeki en iyi tanımlanmış fizyolojik işlevlerinden biri safra asitlerinin konjugasyonuna katılmasıdır. Safra asitlerinin steroid iskeleti kolesterolden oluşur; taurin ise belirli safra asitlerine bağlanarak konjuge safra tuzlarının oluşumunu sağlar. Bu nedenle taurin arzı, kolesterolden safra asidi sentezi ve konjugasyon kapasitesi birbiriyle ilişkili olmakla birlikte aynı biyokimyasal basamağı temsil etmez. Balıklarda safra bileşimi türe özgüdür; birçok teleostta taurinle konjuge safra asitleri önemli yer tutarken bazı gruplarda safra alkolleri de belirgindir (Salze ve Davis, 2015). Memelilerden türetilen tek bir safra bileşimi modeli bütün balık türlerine uygulanamaz (Sampath ve ark., 2020).

Safra tuzları, lipidlerin bağırsak ortamında dağılmasını ve sindirim ürünlerinin miseller içinde taşınmasını destekler. Yemin taurin arzı yetersiz olduğunda bu süreçlerin etkilenmesi, lipidlerden yararlanmanın azalmasına katkıda bulunabilir. Bununla birlikte toplam safra asidi konsantrasyonu, havuzun biyolojik işlevini tek başına açıklamaz. Konjuge ve serbest bileşiklerin dağılımı, hangi safra asitlerinin bulunduğu ve bunların ölçüldüğü doku veya bağırsak bölgesi de önemlidir. Karaciğer, safra kesesi, plazma ve bağırsak içeriğinden elde edilen ölçümler farklı bölmeleri yansıtır. Bir bölmedeki artışın yeni sentez, artmış salınım veya değişmiş geri emilimden hangisine bağlı olduğunu belirlemek için ek ölçümler gerekir.

Taurin yetersizliğinin karaciğer üzerindeki etkileri yalnızca lipid birikimiyle sınırlı değildir. Steinberg (2022) tarafından da ele alınan yeşil karaciğer sendromu, sarıkuyrukta (*Seriola quinqueradiata*) uzun süreli balık unsuz yem denemelerinde incelenmiştir. Takagi ve ark. (2005), takviyesiz grupta düşük karaciğer tauriniyle birlikte yüksek safra pigmenti birikimi ve daha sık yeşil karaciğer gözlemiş; taurin ilavesiyle bu olumsuzlukların hafiflediğini bildirmiştir. Bu sonuç, taurin arzı ile safra pigmenti işlenmesi arasındaki ilişkiyi destekler; her karaciğer renk değişiminin taurin eksikliğinden kaynaklandığını göstermez.

Bu çerçevede, düşük balık unlu yemlerde taurinin etkisi, yemin kolesterol ve fosfolipid içeriğiyle birlikte ele alınmalıdır. Taurin takviyesi konjugasyon için gerekli bileşenlerden birini sağlar; ancak kolesterol arzı, safra asidi sentezi veya bağırsak lipid taşınması başka bir besin tarafından sınırlanıyorsa tek başına yeterli olmayabilir. Önceki bölümde ele alınan hammadde matrisi, burada safra asidi havuzunun oluşumu ve lipidlerin dokular arasında dağılımı üzerinden fizyolojik karşılık bulmaktadır.

4.2. Lipid sindirimi ve besin maddelerinden yararlanma

Sarıağız juvenillerinde yürütülen metiyonin × taurin denemesi, lipid sindirimi açısından doğrudan balık kanıtı sağlamaktadır. Taurin takviyesi lipidlerin görünür sindirilebilirliğini artırmış ve plazma ile ön bağırsaktaki toplam safra asidi düzeylerini yükseltmiştir. Aynı çalışmada protein sindirilebilirliği üzerinde taurinin anlamlı ana etkisi bulunmaması, yanıtın bütün besin maddelerinde aynı yönde ve büyüklükte olmadığını göstermektedir. Lipaz etkinliğinde ise metiyonin düzeyine bağlı bir taurin yanıtı gözlenmiştir (de Moura ve ark., 2019). Bu bulgular, taurinin lipid kullanımına katkısını desteklerken, tek bir sindirim enzimi değişiminin tüm performans yanıtını açıklayamadığını da ortaya koymaktadır.

Senegal dil balığındaki kısa süreli metabolik izleme çalışması bu ilişkiye farklı bir ölçüm yaklaşımı eklemiştir. İşaretli taurin, triaçilgliserol ve amino asitlerin kullanıldığı denemelerde, düşük taurin içeren bitkisel protein ağırlıklı yemlerde lipid sindirim kapasitesi zayıflamış; taurin takviyeli gruplarda lipid kullanımı ve belirli karşılaştırmalarda kas amino asit tutulumu açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir (Richard ve ark., 2017). İşaretli taurinin safra kesesine yönelmesi, safra bileşenlerinin oluşumunda kullanılmasıyla uyumludur. Bununla birlikte, çalışmada izlenen dağılım, tek başına safra asidi sentez hızının ölçümü değildir; kısa süreli metabolik sonuçlardan uzun dönem büyüme veya ekonomik yarar çıkarılmamalıdır.

Aragão ve ark. (2023), yaklaşık 14 g Senegal dil balıklarında altı haftalık denemede balık unu ağırlıklı yemi, bitkisel protein ağırlıklı taurinsiz yemi ve bunun iki taurinli seçeneğini karşılaştırmıştır. Bitkisel yemlerin analiz edilmiş toplam taurin içerikleri sırasıyla 0,8, 4,3 ve 14,0 g/kg yemdir; bu değerler, PP0, PP0.5 ve PP1.5 grup adlarından hesaplanan ilave yüzdelerle karıştırılmamalıdır. Taurin takviyesine doku taurini ve safra asidi konsantrasyonlarında artış, *cyp7a1* ve *abcb11*[3] ifadesinde yükselme, karaciğer lipidleri ve plazma trigliseridlerinde azalma eşlik etmiştir. İşaretli trioleinle yapılan metabolik değerlendirme, lipid kullanımının yem matrisine bağlı olarak değiştiğini desteklemektedir. Bu deney, sindirim ve doku lipid dengesini birlikte ele alması bakımından önceki kısa süreli metabolik izleme çalışmalarını tamamlar.

Lipid sindirimi ile doku lipid birikimi arasındaki ilişki de doğrusal değildir. Emilimin iyileşmesi enerji arzını artırabilir; bu enerjinin kas büyümesine,

[3] Bu çalışmada incelenen *cyp7a1*, kolesterolün safra asidi sentezine yönelmesinde görev yapan kolesterol 7α-hidroksilazı kodlar; *abcb11* ise safra tuzlarının hepatositten safra kanalikülüne taşınmasında görev alan dışa atım taşıyıcısını kodlar. Dolayısıyla iki gen sırasıyla sentez ve taşınma basamaklarıyla ilişkilidir. mRNA artışı, kodlanan proteinin miktarının veya ilgili metabolik akışın aynı oranda arttığını tek başına göstermez (Aragão ve ark., 2023).

oksidasyona veya depo lipidlerine yönelmesi ise protein yeterliliği, enerji dengesi ve metabolik düzenlemeye bağlıdır. Dolayısıyla taurinle lipid sindiriminin artması, karaciğer yağının mutlaka azalacağı anlamına gelmez. Her iki sonucun da ayrı ölçülmesi, değerlendirilmesi ve yorumlanması gereklidir.

4.3. Kolesterol dengesi ve lipidlerin taşınması

Plazma kolesterolü veya trigliserid düzeyindeki değişimin yönü tek başına bir sağlık göstergesi olarak kullanılmamalıdır. Sarıağızda taurin takviyesiyle lipid sindirilebilirliğinin artmasına plazma kolesterolü ve trigliserid düzeylerinde yükselme eşlik etmiştir (de Moura ve ark., 2019). Bu bulgu, dolaşımdaki lipidlerin besinsel arz ve taşınmayla ilişkili olarak değişebildiğini göstermektedir. Başka yem koşullarında aynı göstergelerin azalması, karaciğerde lipid birikiminin azalmasıyla birlikte görülebilir. Yorum için plazma profili, karaciğer lipid içeriği, histoloji ve büyüme birlikte değerlendirilmelidir.

Atlantik somonunda düşük balık unlu yemle ilişkili enterosit lipid birikimi, bu yaklaşımın önemini gösteren bir örnektir. Taurin ve taurokolat dahil çeşitli besinlerin ayrı ayrı denendiği çalışmada, aşırı enterosit lipid birikimini belirgin biçimde gideren uygulamalar kolin ve fosfatidilkolin takviyeleri olmuştur. Fosfatidilkolin grubunda lipid sindirilebilirliği de artmıştır. Kolin ve fosfatidilkolinle lipoprotein oluşumuyla ilişkili *apoaIV* ifadesinin yükselmesi ve lipid damlacığı göstergesi *plin2*[4] ifadesinin baskılanması, bağırsaktan lipid taşınmasının önemine işaret etmektedir (Krogdahl ve ark., 2020). Taurinin denenmiş dozda bu tabloyu gidermemesi, lipid kullanımındaki her bozukluğun taurin eksikliğinden kaynaklanmadığını göstermektedir.

4.4. Karaciğer yağlanması ve omik bulgular

Yüksek lipidli yem koşullarında taurinin etkisini inceleyen Zhou ve ark. (2024), *Epinephelus coioides* juvenillerinde %10 lipid, %15 lipid ve %15 lipid + %1 taurin içeren üç yemi karşılaştırmıştır. Sekiz haftalık denemede yüksek lipidli yem karaciğer lipid içeriğini artırırken, bu yeme taurin eklenmesi karaciğer lipid içeriğini ve hepatosomatik indeksi azaltmış; ağırlık artışı ve FCR açısından da iyileşme sağlamıştır. Böylece çalışma, taurin yanıtını yalnızca balık unu azaltımıyla ilişkili bir eksiklik modeli içinde değil, yüksek lipid alımının oluşturduğu metabolik koşullarda da değerlendirmiştir.

---

[4] *apoaIV*, lipidlerin lipoproteinlerle taşınmasına katılan apolipoprotein A-IV'ü; *plin2* ise hücre içi lipid damlacıklarını kaplayan perilipin 2'yi kodlar. Bu nedenle bu genlerin ifadesi, sırasıyla lipid taşınması ve lipid damlacığı birikimiyle ilişkili göstergeler olarak değerlendirilmiştir (Krogdahl ve ark., 2020).

Proteomik analizde yüksek lipidli yem ile taurin takviyeli yüksek lipidli yem arasında 133 farklı bolluk gösteren protein belirlenmiştir. Kolesterol 27-hidroksilaz (CYP27A1), fosfatidat fosfataz LPIN ve fosfatidilinozitol fosfolipaz C gibi proteinlerin değişmesi; safra asidi biyosentezi, gliserolipid metabolizması ve hücresel sinyallemenin birlikte değerlendirilmesini sağlamıştır. Seçilmiş proteinlerin hedefli kütle spektrometrisiyle kontrol edilmesi bulguları desteklemiş, önceki transkriptomik verilerle yapılan ilişkilendirme de ortak metabolik yolları ortaya koymuştur (Zhou ve ark., 2024).

Bununla birlikte protein bolluğundaki değişim, ilgili enzimin etkinliği veya metabolik akışla eş anlamlı değildir. Örneğin CYP27A1 artışı safra asidi metabolizmasındaki değişimle uyumludur; fakat kolesterolden safra asitlerine dönüşüm hızının arttığını tek başına kanıtlamaz. Aynı şekilde bir proteinin AMPK[5] yoluna atanması AMPK fosforilasyonunun veya aktivasyonunun doğrudan gösterildiği anlamına gelmez. Bu çalışma, gözlenen karaciğer lipid azalmasına eşlik eden aday mekanizmaları güçlendirmekte; ancak bunların nedensel önemini bütünüyle ortaya koymamaktadır. Transkriptomik ve proteomik analizler de aynı araştırma dizisinin ilişkili kanıtları olarak ele alınmalıdır.

4.5. Çoklu besin takviyeleri ve safra asidi profili

Benekli levrekte (*Lateolabrax maculatus*) Song ve ark. (2024), bitkisel protein ağırlıklı yeme %0,5 kolesterol, %0,5 taurin ve %1,3 glisin içeren bir kombinasyon eklemiştir. Takviye grubunda karaciğer lipid içeriği, lipid damlacıklarının kapladığı alan ve plazma ALT/AST etkinliği azalmıştır. Lipid sentezi ve damlacık birikimiyle ilişkili bazı genlerde azalma, lipid hidroliziyle ilişkili bazı genlerde ise artış gözlenmiştir. Safra asidi profili, bağırsak mikrobiyal bileşimi ve safra tuzu hidrolazı miktarındaki değişimler, karaciğer yanıtına eşlik eden bağırsak–safra asidi ilişkilerini değerlendirme olanağı sağlamıştır.

Çalışmanın iki sınırı özellikle önemlidir. Birincisi, kolesterol, taurin ve glisin birlikte verildiğinden, karaciğer yanıtının taurine özgü payı ayrılamaz. İkincisi, karaciğer göstergelerindeki iyileşme genel büyüme artışı olarak aktarılmamalıdır: takviye grubunda karkas oranı yükselirken ağırlık artış oranı düşmüş; SGR ve FCR bakımından anlamlı bir fark görülmemiştir (Song ve ark., 2024). Karkas oranındaki artış, tek başına toplam hasat biyokütlesinin veya ekonomik kazancın arttığını göstermez. Mikrobiyal değişimler ile konjuge safra asitleri arasındaki

[5] AMPK, AMP ile etkinleşen protein kinazdır ve hücrenin enerji durumunu algılayan düzenleyici sistemlerden biridir. Enerji kısıtlılığında ATP üreten süreçlerin desteklenmesi ve enerji tüketen yapım süreçlerinin sınırlandırılmasıyla ilişkilidir.

korelasyonlar, belirli bir bakterinin karaciğer yanıtını doğrudan oluşturduğunu kanıtlamaz; bu ilişkiler bağırsak sağlığı bölümünde ayrıca ele alınacaktır.

Kalkanda *Chlorella vulgaris* kullanılarak yürütülen çalışma, başka bir çoklu besin modelini sunmaktadır. Balık unu proteininin %45, %60 veya %75'inin *Chlorella* ile ikame edildiği yemlere, hidroksiprolin:taurin:kolesterol oranı 1:1:2 olan karışımdan %2 eklenmiştir. Bu uygulama %0,5 ilave taurin içermektedir. Karışım, karaciğer toplam safra asidi düzeyindeki düşüşü ve *cyp7a1* ifadesindeki düşüşü hafifletmiş; lipid damlacıkları ve inflamasyonla ilişkili göstergelerde iyileşme sağlamıştır (Ma ve ark., 2025). Buradaki bulgular, belirli bir *Chlorella* hammaddesi, yüksek ikame düzeyleri ve incelenen balık büyüklüğü için geçerlidir. Bütün mikroalglerin karaciğerde aynı etkiyi oluşturduğu veya karışımın yararının yalnızca taurinden kaynaklandığı söylenemez. Kontrol grubundan anlamlı fark bulunmayan safra asidi değerleri de tam fizyolojik eşdeğerlik olarak yorumlanmamalıdır.

4.6. Karaciğer sağlığının bütünleşik değerlendirilmesi

Karaciğer sağlığı değerlendirilirken hepatosomatik indeks, doku lipid içeriği, histolojik yapı, dolaşımdaki biyokimyasal göstergeler ve metabolik bulgular birlikte değerlendirilmelidir. Hepatosomatik indeksin azalması tek başına yağlanmanın veya hasarın azaldığını göstermez. Benzer biçimde rutin histolojide görülen vakuoller yalnızca lipide bağlanmamalı; mümkün olduğunda lipid boyaması ve kimyasal lipid analiziyle desteklenmelidir. Plazma ALT ve AST değerleri de doku ve türe özgü bağlamda yorumlanmalı, karaciğer homojenatındaki metabolik enzim etkinlikleriyle karıştırılmamalıdır.

Sarıağızda Güroy ve ark. (2024, 2025) tarafından bildirilen karaciğer histolojisi sonuçları bu bütünleşik çerçevede değerlendirilmelidir. Genel karaciğer mimarisinin korunması ile gruplar arasında lipid birikiminin farklılaşması ayrı bulgulardır. Belirli bir takviyenin büyüme veya FCR açısından en iyi sonucu vermesi, tüm histolojik göstergeler açısından da en iyi grup olduğu anlamına gelmez. Bulgular, her ölçütün gerçek grup karşılaştırması üzerinden aktarılmalıdır.

Mevcut balık çalışmaları taurinin lipid sindirimi, safra asidi metabolizması ve karaciğer lipid birikimiyle ilişkili etkilerini desteklemektedir. Ancak yanıtın yönü ve kapsamı; tür, temel taurin arzı, lipid düzeyi, kolesterol ve kolin yeterliliği ile kullanılan protein kaynağına bağlıdır. Pratik formülasyonda bu bilgiler, taurin takviyesini belirli bir besinsel veya metabolik soruna yönelik olarak değerlendirmek için kullanılmalıdır.

Tablo 3. Taurin ve birleşik besin uygulamalarının lipid ve karaciğer üzerindeki etkileri

Çalışma ve tür	Besinsel uygulama	Bildirilen etkiler ve sonuçlar
de Moura ve ark. (2019) Granyöz	Yüksek bitkisel proteinli yemlere taurin ve metiyonin	Taurinle lipid sindirilebilirliği, plazma ve ön bağırsaktaki toplam safra asidi düzeyleri arttı.
Richard ve ark. (2017) Senegal dil balığı	Bitkisel yemlerde artan taurin; işaretli besinlerle kısa süreli izleme	Triaçilgliserol sindirim kapasitesi ve kas amino asit tutulumu arttı.
Krogdahl ve ark. (2020) Atlantik somonu	Düşük balık unlu yeme tekil besin takviyeleri	Kolin ve fosfatidilkolin enterosit lipid birikimini giderdi; taurin denenmiş dozda gidermedi.
Zhou ve ark. (2024) Orfoz	%15 lipidli yeme %1 taurin	Karaciğer lipid içeriği ve hepatosomatik indeks azaldı; büyüme ve FCR iyileşti. Lipid metabolizmasıyla ilişkili protein bollukları değişti.
Song ve ark. (2024) Benekli levrek	%0,5 kolesterol + %0,5 taurin + %1,3 glisin	Karaciğer lipid içeriği ve plazma ALT/AST etkinliği azaldı; safra asidi profili değişti. SGR ve FCR anlamlı biçimde değişmedi.
Ma ve ark. (2025) Kalkan	*Chlorella vulgaris* içeren yemlere hidroksiprolin, taurin ve kolesterol karışımı	Karaciğer lipid ve inflamasyon göstergeleri iyileşti; toplam safra asidi düzeyindeki düşüş hafifledi.

Not: Karışım uygulamalarında bildirilen etkiler katkıların ortak sonucudur; taurinin tekil etkisi olarak yorumlanamaz. Protein veya gen ifadesindeki değişim, metabolik akışın doğrudan ölçümü değildir.

5. Bağırsak Sağlığı Mikrobiyota ve Besin Maddelerinden Yararlanma

5.1. Bağırsak sağlığının değerlendirilmesi

Taurinin bağırsak üzerindeki etkileri; mukozal yapı, epitel bariyeri, sindirim etkinliği, yerel bağışıklık ve mikrobiyal toplulukların birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu göstergeler farklı biyolojik süreçleri temsil eder. Örneğin, mukozal kıvrımların uzaması emilim yüzeyinin artmasıyla uyumlu olabilir, ancak tek başına emilim kapasitesini veya bariyerin geçirgenliğini göstermez. Benzer biçimde sıkı bağlantılarla ilişkili genlerin ifadesindeki artış, proteinlerin miktarını, hücreler arası yerleşimini ve işlevsel geçirgenliği doğrudan ortaya koymaz. Bu bölümde morfolojik, moleküler ve işlevsel sonuçlar, incelenen deneylerin gerçekten ölçtüğü düzeyde ele alınmaktadır.

Düşük balık unlu yemlerde bağırsak yanıtı değerlendirilirken protein kaynağındaki değişimin kapsamı da önemlidir. Taurin düzeyiyle birlikte antinutrisyonel bileşenler, fosfolipidler, kolin ve sindirilebilir amino asit arzı değişebilir. Bu nedenle taurin ilavesiyle görülen bir iyileşmenin hangi temel yem koşuluna ait olduğu belirtilmelidir. Atlantik somonunda enterosit lipid birikiminin kolin ve fosfatidilkolinle giderilip denenmiş taurin uygulamasıyla giderilememesi, bağırsak fonksiyonundaki farklı sorunların farklı besinsel sınırlılıklara dayanabileceğini göstermektedir (Krogdahl ve ark., 2020).

5.2. Mukozal yapı ve epitel bariyeri

Liu ve ark. (2022), juvenil altın pompanoda (*Trachinotus ovatus*) düşük balık unlu yeme %0–1,6 arasında 5 düzeyde taurin ekleyerek 8 haftalık bir besleme denemesi yürütmüştür. Uygun takviye düzeylerinde bağırsak kas tabakası kalınlığı ve mukozal çıkıntı uzunluğundaki artışa, bağırsakta antioksidan ve inflamasyonla ilişkili göstergelerde değişimler eşlik etmiştir. Bu sonuçlar, taurinin bağırsak yapısını ve yerel savunma yanıtını aynı besleme koşulunda etkileyebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, histolojik ölçümler doğrudan geçirgenlik testi yerine kullanılmamalıdır.

Koho somonunda (*Oncorhynchus kisutch*) Bian ve ark. (2026b), sekiz hafta boyunca 0, 0,2, 0,4 ve 0,6 g/kg ilave taurin düzeylerini incelemiştir. Bağırsakta *occludin*, *ZO-1* ve *claudin-18*[6] olarak raporlanan sıkı bağlantı genlerinin ifadesindeki artışa, mukozal morfoloji ve redoks göstergelerindeki değişimler eşlik etmiştir. Çalışma, epitel bağlantılarıyla ilişkili bir moleküler yanıtı desteklemekte, ancak doğrudan geçirgenlik ölçümü olmadan işlevsel bariyerin bütünüyle doğrulandığını göstermemektedir.

Aynı araştırmada en yüksek taurinli yeme rapamisin eklenmesi, bazı antioksidan ve sıkı bağlantı genlerindeki yanıtları baskılamıştır (Bian ve ark., 2026b). Bir inhibitör müdahalesinin bulunması, yalnızca gen ifadesine dayanan ilişkilendirmeye kıyasla mekanistik açıklamayı güçlendirir. Ancak bu sonuç taurinin rapamisinin mekanistik hedefi olan mTOR[7] protein kinazına doğrudan bağlandığını veya etkisinin yalnızca bu yol üzerinden gerçekleştiğini kanıtlamaz.

---

[6] Occludin ve claudin ailesi proteinleri, komşu epitel hücreleri arasındaki sıkı bağlantıların yapısına katılır; ZO-1 ise bu yapıları hücre iskeletine bağlayan iskele proteinidir. Bu nedenle ilgili genler epitel bariyerinin moleküler göstergeleri olarak incelenir.

[7] mTOR, besin ve büyüme sinyallerini hücresel yapım süreçleriyle ilişkilendiren bir protein kinazdır. Özellikle mTORC1 kompleksi, amino asit yeterliliği ve enerji durumuna göre protein sentezi ile otofaji arasında düzenleyici bağlantı kurar. Rapamisin bu kompleksin işlevini baskılamak için kullanılan bir inhibitördür. Bu nedenle rapamisinle yanıtın zayıflaması yolun katkısını destekleyebilir; taurinin mTOR'a doğrudan bağlandığını kanıtlamaz (Bian ve ark., 2026b).

Rapamisinin taurin bulunmayan koşuldaki etkisini de karşılaştıran tam bir deney düzeni, bu ilişkinin özgüllüğünü daha iyi sınayacaktır.

Chen ve ark. (2026), *Megalobrama amblycephala* juvenillerinde 0, 8, 12 ve 20 g/kg ilave taurin düzeylerini sekiz haftalık açık ortam denemesinde incelemiştir. Taurin uygulamaları büyüme, bağırsak morfolojisi ve redoks göstergelerini etkilerken, besleme dönemindeki yaşama oranı anlamlı bir şekilde değişmemiştir. SGR için modelle tahmin edilen %1,460 düzeyi ile yazarların genel performans bakımından öne çıkardığı %0,8 ilave aynı karar ölçütünü temsil etmemektedir. Bu sonuç, doğal yaz koşullarındaki (26,5–35,3 °C) bir besleme denemesine aittir; kontrollü bir sıcaklık × taurin faktöriyel deneyinin yerine geçmez.

5.3. Sindirim enzimleri ve besin kullanımının ölçülmesi

Taurinle ilişkili sindirim yanıtları enzim türüne, doza ve balık türüne göre değişmektedir. Bian ve ark. (2026b), koho somonunda tripsin etkinliği ve bağırsaktaki serbest amino asit düzeylerinde değişimler olduğunu bildirmiştir. Altın pompanoda Wang ve ark. (2025) ise farklı taurin düzeylerinde kimotripsin ve amilaz için farklı yanıtlar gözlemiştir. Bu bulgular, tüm sindirim enzimlerinin aynı dozda ve aynı yönde yanıt verdiği şeklinde genellenmemelidir. Enzim etkinliği sindirim potansiyelini destekleyen bir ölçüttür; net emilim ve vücutta tutulma için sindirilebilirlik veya metabolik izleme verisi ile doğrulanması gerekir.

Wang ve ark. (2025) çalışmasının yem düzeni ayrıca dikkat gerektirir. Balık unu kontrol yeminde %25 iken, fermente pamuk tohumu küspesi içeren üç deney yeminde %18,75 düzeyindedir; bu yemlere %0,5, %1 ve %1,5 taurin eklenmiştir. Aynı düşük balık unlu temel yemin taurinsiz grubu bulunmamaktadır. Böylece üç takviye düzeyi kendi aralarında karşılaştırılabilir; fakat kontrol yemine göre farklılıklar yalnızca taurine bağlanamaz. Bu nedenle, hammadde ve diğer formülasyon farklılıkları da değerlendirmeye dahil edilmelidir.

Senegal dil balığındaki işaretli besin çalışması, bu tür enzim ölçümlerine tamamlayıcı bir yaklaşım sunmaktadır. Taurin düzeyine bağlı lipid sindirimi ve kas amino asit tutulumu sonuçları, besinlerin sindirim sonrası dağılımını da değerlendirmeye olanak tanımıştır (Richard ve ark., 2017). Bu nedenle, bağırsak sağlığının üretim performansı ile ilişkisi kurulurken enzim etkinliği, görünür sindirilebilirlik, metabolik dağılım ve büyüme birbiriyle ilişkili olsa da ayrı kanıtlar olarak değerlendirilmelidir.

5.4. Yerel bağışıklık ve enfeksiyon sonuçları

Altın pompanoda Liu ve ark. (2022), uygun taurin düzeylerinde bağırsak proinflamatuvar sitokin genlerinin baskılanmasını ve antiinflamatuvar yanıtla ilişkili genlerin artmasını bildirmiştir. Bu değişimlere *Streptococcus agalactiae* ile yürütülen enfeksiyon sınamasında yaşama oranının yükselmesi eşlik etmiştir. Böylece çalışma, moleküler ölçümlerin yanı sıra enfeksiyon sonrası işlevsel bir sonuç da sunmaktadır. Ancak enfeksiyonun intraperitoneal enjeksiyonla oluşturulması, bağırsak giriş bariyerini aşmaktadır; yaşama avantajı, doğrudan patojenin bağırsaktan geçişinin engellenmesiyle açıklanamaz.

Taurinin bağışıklık etkisi her zaman tüm inflamatuvar göstergelerin azalması şeklinde değildir. Koho somonunda *IL-1β*, *TNFα* ve *IL-6* genlerinin ifadesi taurin uygulamasıyla yükselmiştir (Bian ve ark., 2026b). Bu sonuç, altın pompanoda bildirilen baskılanmayla birlikte değerlendirildiğinde, yanıtın tür, temel beslenme durumu, doku ve uyarılma koşullarına bağlı olduğunu göstermektedir. Bir sitokinin tek başına artması veya azalması, genel bağırsak sağlığının yeterli bir göstergesi değildir.

Çipurada Ramos-Pinto ve ark. (2021), %12 balık unu içeren temel yeme 5 g/kg taurin ekleyerek 4 haftalık bir deneme yürütmüştür. Son ağırlık ve göreli büyüme bakımından fark saptanmamış; bazı bağışıklık göstergeleri örnekleme zamanına bağlı olarak değişmiştir. İkinci haftada deri mukusunun bakterisidal etkinliği taurin grubunda daha düşüktür; dördüncü haftada ise baş böbrekte *mIgT*[8] geninin ifadesi daha yüksek bulunmuştur. Bu karşılaştırma, büyüme yanıtı ile bağışıklık göstergelerinin aynı yönde değişmesinin zorunlu olmadığını ve tek bir belirteçten genel bir korunma sonucuna varılamayacağını göstermektedir.

Kalkanda Pereiro ve ark. (2025), farklı enfeksiyon duyarlılığı gösteren ailelerin metabolomik karşılaştırmasını aday metabolit taramasıyla birleştirmiş, ardından %1,5 taurin içeren yemi test etmiştir. Taurinle beslenen balıklarda *Aeromonas salmonicida* enfeksiyonundan sonra yaşama oranı artmış, ancak enfeksiyonun erken döneminde ölçülen bakteriyel yük de artmıştır. Bu bulgu, korunmanın yalnızca bakterinin daha hızlı ortadan kaldırılmasıyla açıklanamayacağını düşündürmektedir. Erken inflamasyonun düzenlenmesi ve konak hasarının sınırlanması olası açıklamalardır; tolerans mekanizmasının kesin olarak gösterilebilmesi için patojen yükü ile hasar arasındaki zaman içindeki ilişki ayrıca sınanmalıdır. Besleme aşamasında diyet başına iki tank bulunması da genellenebilirlik değerlendirmesinde dikkate alınmalıdır.

---

[8] *mIgT*, membrana bağlı immünoglobulin T'yi kodlayan gen için kullanılan addır. İmmünoglobulin T, balıklarda özellikle mukozal bağışıklıkla ilişkilidir. Burada bildirilen sonuç baş böbrekteki gen ifadesidir (Ramos-Pinto ve ark., 2021).

5.5. Mikrobiyal çeşitlilik ve topluluk bileşimi

Mikrobiyotadaki değişimin yönü tek başına yarar veya zarar anlamına gelmez. Pereiro ve ark. (2025) çalışmasında taurin, kalkanın bağırsak mikrobiyotasında Shannon ve Simpson çeşitlilik indekslerini azaltmış; Vibrionaceae ve Marinobacteraceae ailelerinin göreli bolluğunu artırmıştır. Aynı deney dizisinde enfeksiyon sonrası yaşama avantajı bulunması, daha yüksek alfa çeşitliliğin her durumda daha sağlıklı bir bağırsakla eş tutulamadığını göstermektedir. Bir bakteri ailesinin göreli bolluğunun artması, bu ailenin tüm üyelerinin patojen veya yararlı olduğu anlamına gelmez.

Mikrobiyota değerlendirmesinde taksonomik bileşim ile işlevsel kapasite ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Pereiro ve ark. (2025) çalışmasında 16S rRNA verisinden PICRUSt2 ile üretilen işlevsel tahminler, doğrudan ölçülmüş metabolitler veya mikrobiyal enzim akışları değildir. Benzer şekilde, göreli bolluk analizi toplam bakteri yükünü göstermez. Taurinin belirli mikrobiyal işlevler üzerinden etkisini açıklamak için mutlak miktar ölçümleri, hedefli metabolit analizleri ve uygun nedensellik deneyleri gereklidir.

5.6. Safra asidi ile mikrobiyota arasındaki ilişki

Song ve ark. (2024), benekli levrekte kolesterol, taurin ve glisin karışımının etkilerini bağırsak metagenomiği ve hedefli safra asidi profiliyle birlikte değerlendirmiştir. Karışım uygulamasına bağırsak safra tuzu hidrolazı miktarında azalma ve bazı konjuge safra asitlerinde artış eşlik etmiştir. Bu ölçümler, dördüncü bölümde ele alınan karaciğer yanıtına bağırsak tarafında eşlik eden değişiklikleri göstermektedir. Bununla birlikte, hidrolaz miktarı ölçümü enzim etkinliğiyle eş tutulmamalı, mikrobiyal taksonlarla safra asitleri arasındaki korelasyonlar da nedensellik olarak aktarılmamalıdır.

Bu çalışmanın avantajı, yalnızca bakteri çeşitliliğini değil, safra asidi bileşimini de ölçmesidir. Temel sınırı ise üç besin maddesinin birlikte verilmesidir: mikrobiyal ve metabolik yanıtın ne kadarının taurinden kaynaklandığı ayırt edilemez. Taurinin bu eksendeki özgül rolünü belirlemek için tekil ve birleşik takviyeler, uygun temel yem kontrolleri ve mikrobiyal işlevi doğrudan sınayan deneyler birlikte gereklidir.

Mevcut çalışmalar taurinin bazı yem koşullarında bağırsak yapısı, sindirim göstergeleri, yerel bağışıklık ve mikrobiyal topluluklarla ilişkili etkilerini desteklemektedir. En güçlü uygulama yorumu, bu göstergelerin aynı deneyde büyüme, besin kullanımı veya enfeksiyon sonrası sonuçlarla ilişkilendirilmesiyle elde edilir. Ancak bir ölçütteki olumlu değişim bütün bağırsak işlevlerinin iyileştiği şeklinde genellenmemelidir.

Tablo 4. Besinsel uygulamaların bağırsak ve enfeksiyon yanıtlarına etkileri

Çalışma ve tür	Besinsel uygulama	Bildirilen etkiler ve sonuçlar
Liu ve ark. (2022) Altın pompano	Düşük balık unlu yeme %0–1,6 taurin	Uygun düzeylerde mukozal çıkıntı ve kas tabakası ölçümleri iyileşti; antioksidan ve inflamasyon göstergeleri değişti. Enjeksiyonla enfeksiyon sınaması sonrasında yaşama oranı arttı.
Wang ve ark. (2025) Altın pompano	Fermente pamuk tohumu küspeli düşük balık unlu yemlere %0,5, %1 ve %1,5 taurin	Bağırsak sindirim enzimlerinde doza göre farklı yanıtlar ve mikrobiyota bileşiminde değişimler bildirildi.
Pereiro ve ark. (2025) Kalkan	%1,5 taurin içeren yem	Enfeksiyon sonrasında yaşama oranı arttı. Shannon ve Simpson çeşitlilik indeksleri azaldı; mikrobiyota bileşimi değişti.
Bian ve ark. (2026b) Koho somonu	0–0,6 g/kg ilave taurin; en yüksek düzeyde rapamisin karşılaştırması	Sıkı bağlantı genleri, mukozal morfoloji ve redoks göstergeleri değişti. Rapamisin bazı yanıtları zayıflattı.
Song ve ark. (2024) Benekli levrek	Kolesterol, taurin ve glisin karışımı	Bazı konjuge safra asitleri arttı; bağırsak safra tuzu hidrolazı miktarı ve mikrobiyota bileşimi değişti.

Not: Wang ve ark. (2025) çalışmasında aynı düşük balık unlu yemin taurinsiz kontrolü yoktur. Gen ifadesi ve mikrobiyota değişimleri doğrudan bariyer geçirgenliğini veya mikrobiyal nedenselliği göstermez.

6. İmmünometabolizma ve Hücresel Stres

Taurinin hücresel korunmadaki rolü, bağışıklık yanıtı ve enerji metabolizmasının birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Enfeksiyonla mücadele, oksidatif hasarın giderilmesi ve protein kalitesinin korunması metabolik kaynaklara ihtiyaç duyar. Bu süreçlerin yem bileşimiyle ilişkisi, taurinin büyüme ve yemden yararlanma üzerindeki etkilerinin fizyolojik temelini açıklamaya yardımcı olabilir. Bununla birlikte, bağışıklık göstergeleri ve metabolik göstergelerin aynı deneyde değişmesi, immün hücrelerde metabolik yeniden programlanmanın doğrudan ölçüldüğü anlamına gelmez. Burada immünometabolizma, mevcut bulguları ilişkilendiren bir değerlendirme çerçevesi olarak kullanılmaktadır.

Bu bölümde balıklarda yapılan besleme ve stres denemeleri ele alınmaktadır. Schuller-Levis ve Park (2003) ile Baliou ve ark. (2021) tarafından derlenen, ağırlıklı olarak memeli ve hücre modellerinden elde edilen bulgular ise taurin

kloramin, mitokondriyal tRNA ve hücresel stres mekanizmalarının açıklanmasına katkı sağlamaktadır.

Ma ve ark. (2026), genel taurin biyolojisini oksidatif stres, inflamatuvar yanıtlar ve metabolik düzenleme arasında bağlantı kurarak tartışmaktadır. Bu derleme, memeli ve klinik modellere dayanan mekanizmalar için güncel bir çerçeve sunar. Balıklardaki sonuçların aktarımında ise aynı mekanizmanın ilgili tür ve dokuda protein, enzim veya işlev ölçümleriyle ne ölçüde desteklendiği ayrıca belirtilmelidir.

6.1. Redoks dengesi ve antioksidan savunma

Taurinin antioksidan etkisi, tüm reaktif oksijen türlerini doğrudan uzaklaştıran genel bir radikal süpürücü olarak tanımlanmamalıdır. Baliou ve ark. (2021), mitokondriyal işlevin korunması, kalsiyum dengesinin düzenlenmesi, glutatyon sistemi ve antioksidan savunma yanıtlarını birbiriyle ilişkili mekanizmalar olarak tartışmaktadır. Dolayısıyla dokuda ROS veya lipid peroksidasyonu ürünlerinin azalması, taurinin bu moleküllerle doğrudan kimyasal reaksiyona girdiğini tek başına göstermez; ROS üretiminin azalması veya savunma sistemlerinin değişmesi de aynı sonuca katkıda bulunabilir.

Altın pompanoda düşük balık unlu yemlerle yapılan çalışmada, taurin takviyesi antioksidan kapasite ve Nrf2[9] ile ilişkili gen ifadelerindeki değişikliklerle birlikte değerlendirilmiştir (Liu ve ark., 2022). Bu bulgular, besinsel müdahaleye eşlik eden bir redoks yanıtını destekler. Ancak *nrf2* mRNA düzeyindeki artış, Nrf2 proteininin çekirdeğe taşındığının veya ilgili yolun zorunlu bir aracı olduğunun doğrudan kanıtı değildir. Enzim etkinliği, oksidatif hasar ve moleküler göstergelerin birlikte ele alınması yorumun gücünü artırır.

Antioksidan enzimlerdeki değişimin yönü de bağlama bağlıdır. Etkinlik artışı savunma kapasitesinin güçlenmesini gösterebilirken, yüksek oksidatif yüke karşı telafi yanıtını da yansıtabilir. Benzer biçimde düşük etkinlik, hasarın azalmasıyla gereksinimin düşmesini veya savunmanın yetersizliğini ifade edebilir. Bu nedenle SOD, CAT veya GPx sonuçları, ROS ve hasar göstergelerinden bağımsız olarak sağlığın tek ölçütü olarak kullanılmamalıdır. Balık besleme açısından anlamlı sonuç, redoks göstergelerinin doku bütünlüğü ve işlevsel performansla tutarlı bir yanıt vermesidir.

---

[9] Nrf2, antioksidan ve hücresel korunmayla ilişkili birçok genin ifadesini düzenleyen bir transkripsiyon faktörüdür; *nrf2* ise bu transkripsiyon faktörünü kodlayan geni ifade eder. SOD süperoksit dismutazı, CAT katalazı, GPx glutatyon peroksidazı; ROS reaktif oksijen türlerini ifade eder. İlk enzim grubu süperoksidin, diğer ikisi ise peroksitlerin uzaklaştırılmasına katkıda bulunur (Liu ve ark., 2022; Baliou ve ark., 2021).

Cheng ve ark. (2018), sekiz haftalık besleme sonrasında *Takifugu obscurus* balıklarını 25 °C'den 13 °C'ye kontrollü olarak soğutarak oksidatif ve hücresel yanıtları incelemiştir. Taurinle beslenen gruplarda ROS, sitoplazmik serbest Ca2+ ve apoptozla ilişkili olumsuz yanıtların hafiflemesi, hücresel korunma için doğrudan bir balık stres modeli sunmaktadır. Ancak bu sonuçlar, tüm türlerde veya her soğuk maruziyetinde aynı korumanın oluştuğu anlamına gelmez; ayrıca yem takviyesinin etkisi, ölçülen sıcaklık geçişi ve doku koşullarıyla sınırlı olarak yorumlanmalıdır.

6.2. Taurin kloramin ve bağışıklık yanıtının düzenlenmesi

Schuller-Levis ve Park (2003), taurinin miyeloperoksidaz sistemiyle oluşan hipokloröz asitle reaksiyona girerek daha kararlı ve daha düşük toksisiteye sahip taurin kloramin oluşturduğunu açıklamaktadır. Derlemede ele alınan memeli bağışıklık hücresi modellerinde taurin kloramin, bazı inflamatuvar aracıların üretimini değiştirmektedir. Bu mekanizma, taurinin oksidan yük ile inflamatuvar sinyaller arasındaki ilişkiye nasıl katkıda bulunabileceğini açıklar. Bununla birlikte, yemle taurin verilen balıklarda sitokin ifadesinin değişmesinden hareketle aynı dokuda taurin klorammininin oluştuğu veya etkinin bu molekül aracılığıyla gerçekleştiği söylenemez.

Balık çalışmalarında bağışıklık yanıtının tek bir yönde olması beklenmemelidir. Liu ve ark. (2022), altın pompanoda bazı proinflamatuvar genlerin baskılanmasını ve antiinflamatuvar yanıtla ilişkili değişiklikleri bildirmiştir. Buna karşılık koho somonunda Bian ve ark. (2026b), *IL-1β*, *TNFα* ve *IL-6* genlerinin ifadesinde artış saptamıştır. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, taurinin işlevi bütün koşullarda inflamasyonu baskılamak şeklinde genellenemez. Tür, doku, besinsel durum, uyarılma düzeyi ve örnekleme zamanı yorumun parçalarıdır.

Kalkanda Pereiro ve ark. (2025), taurinle besleme sonrasında *Aeromonas salmonicida* enfeksiyonuna karşı daha yüksek yaşama oranını bildirmiştir. Bununla birlikte, erken dönemdeki bakteriyel yükün de yüksek bulunması, korunmanın yalnızca patojenin daha hızlı uzaklaştırılmasıyla açıklanamayacağını düşündürmektedir. Konak hasarının sınırlandırılması ve yanıtın zamanlaması olası açıklamalardır; hastalık toleransının kanıtlanması için patojen yükü ile konak hasarı veya işlev kaybı arasındaki zaman içindeki ilişki ayrıca gösterilmelidir. Bu yaklaşım, bağışıklık etkinliğinin yalnızca sitokin artışı ya da azalmasıyla değerlendirilmesini engeller.

6.3. Mitokondri işlevi ve enerji metabolizması

Mitokondriyal taşıyıcı RNA'nın (tRNA) kimyasal modifikasyonu, taurinin proteinlerin yapısına katılmadan protein sentezini etkileyebilmesinin mekanistik bir örneğidir. Schuller-Levis ve Park (2003) ile Baliou ve ark. (2021), bazı mitokondriyal tRNA türlerinde taurin içeren modifiye uridinleri ve bunların kodonların doğru okunmasındaki rolünü ele almaktadır. Özellikle memeli modellerindeki bulgular, bu modifikasyonların mitokondri tarafından kodlanan proteinlerin sentezi ve solunum zincirinin işleviyle ilişkili olduğunu desteklemektedir. Ancak incelenen balık besleme çalışmalarında mitokondriyal tRNA modifikasyonu doğrudan ölçülmediği için bu basamak, balıklardaki taurin yanıtının doğrulanmış bir aracı olarak sunulmamalıdır.

Koho somonunda Bian ve ark. (2026a), bu mekanistik çerçeveyi balıklarda işlevsel ölçümlere yaklaştıran bir çalışma sunmaktadır. Yaklaşık 8,2 g başlangıç ağırlığındaki balıklar, 8 hafta boyunca 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ve 1,0 g/kg taurin düzeyi içeren altı yemle beslenmiştir. Kazein ve jelatin temelli bu deneysel yem modeli, ticari bitkisel protein ikamesiyle aynı koşulları temsil etmez. Çalışmada karaciğer hücrelerinin mitokondriyal membran potansiyeli floresans yöntemleriyle, solunum zinciri komplekslerinin etkinlikleri ise biyokimyasal yöntemlerle değerlendirilmiştir.

Kontrole göre kompleks I etkinliğinde 0,2–0,6 g/kg; kompleks II, III ve IV etkinliklerinde ise 0,2–0,8 g/kg taurin düzeylerinde artış olduğu bildirilmiştir. Membran potansiyeli ölçümleri de uygun takviye düzeylerinde daha yüksek değerler göstermiştir. En yüksek düzey olan 1,0 g/kg, aynı yararı sürdürmemiştir (Bian ve ark., 2026a). Bu bulgular, doz yanıtının doğrusal olmadığını gösterir; söz konusu yüksek düzeyin tüm balık türlerinde toksik olduğu sonucunu vermez.

Solunum zinciri etkinliği ve membran potansiyeli, mitokondri işlevine ilişkin doğrudan ölçümlerdir. Bununla birlikte, bu deney ATP üretim hızını, oksidatif fosforilasyonun eşleşme verimini veya tRNA modifikasyonunu doğrudan ölçmemektedir. Bu nedenle daha yüksek ATP üretimi bulgularla uyumlu bir mekanistik yorum olarak kalır. Büyüme ile mitokondri göstergelerinin birlikte iyileşmesi, büyüme yanıtının hangi payının mitokondri üzerinden gerçekleştiğini tek başına belirlemez.

6.4. mTOR ve AMPK üzerinden besin ve enerji algılama

Taurinle değişen amino asitlerin kullanılabilirliği, lipid metabolizması ve enerji durumu büyüme sinyallemesiyle birlikte değerlendirilmelidir. Koho somonundaki mitokondri çalışmasında *mtor*, *s6k1* ve *4ebp1*[10] gibi genlerin ifadeleri incelenmiş; bazı takviye düzeylerinde artışlar bildirilmiştir (Bian ve ark., 2026a). Bu bulgular anabolik sinyallemeyle ilişkili bir transkripsiyonel yanıtı gösterir. mTOR ya da aşağı akım proteinlerinin fosforilasyonu ve protein sentez hızı ölçülmeden, taurinin mTOR'u doğrudan etkinleştirdiği veya protein sentezini belirli bir oranda artırdığı söylenemez.

Aynı türdeki ayrı bir çalışmada, taurin içeren yeme rapamisin eklenmesi bazı bağırsak, redoks ve gen ifadesi yanıtlarını zayıflatmıştır (Bian ve ark., 2026b). İnhibitör kullanılan bu yaklaşım, yalnızca gen ifadesi birlikteliğine göre yolun katkısını değerlendirmede daha güçlüdür. Ancak rapamisinin taurinsiz koşuldaki etkisini karşılaştıran bir grup bulunmaması, taurine özgü etkileşimin ayrıştırılmasını kısıtlar. Sonuçlar, mTOR ile ilişkili süreçlerin katkısını destekler; taurinin doğrudan bağlanma hedefini veya tek bir etki yolunu belirlemez.

AMPK açısından da gen veya protein bolluğu ile fosforilasyona bağlı etkinleşme birbirinden ayrılmalıdır. Yüksek lipidli yem verilen orfozda proteomik ve transkriptomik verilerin birlikte değerlendirilmesi, taurinle değişen proteinleri lipid ve enerji metabolizması ağlarıyla ilişkilendirmiştir (Zhou ve ark., 2024). Bir proteinin AMPK sinyal yoluna atanması, AMPK'nin fosforilasyonla etkinleştiğinin kanıtı değildir. Bu nedenle AMPK, bu veri setinde metabolik yanıtın yorumlanmasına katkı sağlayan bir yol olarak ele alınmalı; mTOR ile birlikte, tüm dokularda aynı yönde çalışan basit bir büyüme anahtarı olarak sunulmamalıdır.

6.5. Kalsiyum dengesi ve endoplazmik retikulum stresi

Endoplazmik retikulumun protein katlanması ve kalsiyum dengesiyle ilişkisi, besinsel durum ile çevresel stresin kesiştiği önemli bir noktadır. Endoplazmik retikulumda hatalı veya katlanmamış proteinlerin birikmesi ER stresini oluşturur. Bu yükü azaltmaya yönelik katlanmamış protein yanıtı olarak adlandırılan UPR başlangıçta hücresel uyumu destekleyen bir süreçtir; bu nedenle ilgili belirteçlerin azalması, bağlamdan bağımsız olarak yararlı kabul edilmemelidir.

[10] Burada *mtor* mTOR protein kinazını; *s6k1* ribozomal protein S6 kinaz 1'i; *4ebp1* ise ökaryotik translasyon başlatma faktörü 4E'ye bağlanan protein 1'i kodlayan genleri ifade eder. S6K1 ve 4E-BP1, mTORC1'in protein sentezini düzenleyen aşağı akım hedefleri arasındadır. Düzenleyici işlevleri fosforilasyon durumuna bağlı olduğundan, gen ifadesi sonuçları proteinlerin etkinliğiyle eş tutulmamalıdır (Bian ve ark., 2026a).

Doku hasarı, stresin süresi ve hücresel işlevin korunması birlikte değerlendirilmelidir (Baliou ve ark., 2021).

Ot sazanında Yan ve ark. (2026), yaklaşık 698 g balığı 60 gün besledikten sonra 96 saatlik hipoksi uygulamasıyla bu ilişkiyi incelemiştir. Deneyde balık unlu bir yem ile 0–1,6 g/kg ilave taurin içeren beş balık unsuz yem karşılaştırılmıştır. Hipoksi uygulaması 1,0 mg/L çözünmüş oksijen düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Taurin yanıtı; solungaç histolojisi, hücresel ultrastrüktür (elektron mikroskobuyla görülebilen organel ve zar düzeyindeki ince yapı), doku kalsiyumu, kalsiyum taşınmasıyla ilişkili göstergeler ve ER stresi belirteçleri üzerinden değerlendirilmiştir.

Hipoksi altında 0,8 g/kg ilave taurin grubunda ER genişlemesinin hafiflemesi, bazı UPR gen ifadelerinin azalması ve GRP78[11] ile fosforile PERK düzeylerinin daha düşük bulunması, hücresel stresin sınırlandığını desteklemektedir. Fosforile IRE1 için immünfloresans bulguları da bildirilmiştir. Böylece çalışma yalnızca mRNA düzeyine dayanmayan, protein ve yapı ölçümlerini de içeren kanıt sağlamaktadır (Yan ve ark., 2026). Bununla birlikte kalsiyum taşınması ve UPR yollarına özgü müdahaleler yapılmadığından, değişimlerin birbirini hangi sırayla ve ne ölçüde oluşturduğu kesin olarak ayrıştırılamaz.

Bu deney, ER stresini yalnızca memeli modelleri üzerinden tartışma gereğini azaltmaktadır. Ancak sonuçlar solungaç dokusu, ot sazanının belirtilen büyüklüğü, yem matrisi ve tanımlanan hipoksi koşulları için geçerlidir. Aynı mekanizmanın yüksek bitkisel proteinli yemlerle oluşan bütün karaciğer veya bağırsak sorunlarını açıkladığı varsayılmamalıdır. Bu bulgular, çevresel zorlanma altında taurin yanıtının büyüme ve hücresel işlevler bakımından ayrı değerlendirilmesini gerektirir.

6.6. Otofaji ve hücresel protein kalitesinin korunması

Otofaji, hücresel bileşenlerin lizozomal yıkıma yönlendirildiği ve stres koşullarına uyuma katkı sağlayabilen bir süreçtir. Baliou ve ark. (2021), toksik veya nörolojik stres modellerinde taurin uygulamasıyla değişen otofagozom zarlarıyla ilişkili LC3 ve yıkıma yönlendirilen maddeleri tanıyan seçici otofaji reseptörü p62 gibi otofajiyle ilişkili göstergeleri tartışmaktadır. Bu sonuçlar balık besleme araştırmaları için hipotez oluşturabilir; ancak stres modeli ve doku farklılıkları nedeniyle doğrudan yem önerisine çevrilemez.

---

[11] GRP78, proteinlerin doğru katlanmasına yardım eden bir ER şaperonudur. PERK ve IRE1 ise katlanmamış protein yükünü algılayarak UPR sinyallerini ileten ER zar proteinleridir. p-PERK ve p-IRE1 adlarındaki "p", bu proteinlerin fosforile biçimlerini gösterir. Bu ölçümler ER stres yanıtının protein düzeyindeki bileşenlerini değerlendirir (Yan ve ark., 2026).

Otofagozom miktarı ile otofajik akış birbirinden ayrılmalıdır. LC3-II birikimi, otofagozom oluşumunun artmasını gösterebileceği gibi yıkımın yavaşlamasından da kaynaklanabilir. Benzer şekilde, tek bir p62 ölçümü sürecin bütününü açıklamaz. Balıklarda taurinin otofajiyi artırdığı veya baskıladığı sonucuna ulaşmak için zaman serileri, lizozomal yıkımın değerlendirildiği karşılaştırmalar ve tamamlayıcı protein ölçümleri gereklidir. Bu bölümde incelenen balık deneyleri, taurinin otofajik akışı düzenlediğine ilişkin doğrudan bir sonuç çıkarmak için yeterli değildir.

Genel mekanistik çerçevede Ma ve ark. (2026), otofaji, inflamasyon ve mitokondri işlevlerini metabolik koşullara bağlı yanıtlar olarak ele almaktadır. Bu ilişkiler, balıklarda araştırılacak mekanizmaları tanımlamaya katkı sağlar; bir memeli modelindeki otofaji yanıtı, besinsel taurinin balıklarda aynı akışı düzenlediğinin doğrudan kanıtı değildir.

Mevcut kanıtlar, taurinin hücresel korunmasını, redoks dengesini, bağışıklık yanıtının düzenlenmesini, mitokondri işlevini ve ER stresini ortak bağlamda değerlendirmeyi desteklemektedir. Kanıtın gücü başlıklar arasında farklıdır: balıklarda mitokondriyal enzim etkinliği ve ER ile ilişkili protein ölçümleri bulunurken, tRNA modifikasyonu ve otofajik akışın besinsel yanıt içindeki rolü henüz bu çalışmalarla gösterilmemiştir. Pratik değer, moleküler bir belirtecin değişmesinden ziyade bu değişimin doku işlevi, enfeksiyon sonrası yaşama veya çevresel stres altında performansla tutarlı biçimde ilişkilendirilmesidir.

Tablo 5. Taurinle ilişkili hücresel süreçlerde bildirilen bulgular

Çalışma ve deney sistemi	**İncelenen süreç**	**Bildirilen bulgular**
Liu ve ark. (2022) Altın pompano besleme denemesi	Redoks yanıtı	Taurinle antioksidan kapasite ve Nrf2 ile ilişkili gen ifadeleri değişti.
Schuller-Levis ve Park (2003) Memeli ve hücre bulgularını değerlendiren derleme	Taurin kloramin ve inflamasyon	Taurin kloramin oluşumu ve inflamatuvar aracıların düzenlenmesine ilişkin bulgular derlendi.
Bian ve ark. (2026a) Koho somonu besleme denemesi	Mitokondri işlevi	Uygun taurin düzeylerinde mitokondriyal membran potansiyeli ve solunum zinciri kompleks I–IV etkinlikleri arttı.

Çalışma ve deney sistemi	İncelenen süreç	Bildirilen bulgular
Bian ve ark. (2026b) Koho somonu besleme denemesi	mTOR ile ilişkili yanıt	Rapamisin, taurinli yemde bazı bağırsak ve redoks yanıtlarını zayıflattı.
Yan ve ark. (2026) Ot sazanı besleme ve hipoksi denemesi	Endoplazmik retikulum stresi	0,8 g/kg ilave taurin grubunda ER genişlemesi hafifledi; GRP78 ve fosforile PERK düzeyleri daha düşük bulundu.
Baliou ve ark. (2021) Genel hücresel stres modellerini değerlendiren derleme	Otofaji ile ilişkili göstergeler	Taurin uygulamasıyla değişen LC3 ve p62 göstergeleri tartışıldı.

Not: Memeli veya hücre modellerine dayanan derlemeler balık besleme denemelerinden ayrı gösterilmiştir. İncelenen balık çalışmalarında tRNA modifikasyonu ve otofajik akış doğrudan ölçülmemiştir.

7. Taurin Takviyesinin Maliyeti ve Kaynak Verimliliği

Taurin takviyesinin üretimdeki değeri, biyolojik yanıtın yem maliyetine ve kaynak kullanımına nasıl yansıdığına göre belirlenir. Belirli bir doz büyümeyi destekleyebilir; ancak aynı dozun ekonomik açıdan en uygun seçenek olması, yem fiyatı, yem dönüşüm oranı (FCR), üretim süresi ve hasat edilen biyokütleye bağlıdır. Benzer biçimde, balık unu oranının azaltılması denizel hammadde kullanımını değiştirse de toplam çevresel etkinin azaldığını tek başına göstermez. Bu bölümde deneysel besleme sonuçları, maliyet karşılaştırması ve çevresel değerlendirme ayrı ölçütler olarak ele alınarak ortak bir formülasyon yaklaşımında birleştirilmektedir.

7.1. Biyolojik gereksinim ile ekonomik optimumun ayrılması

Biyolojik gereksinim tahmini, seçilen yanıt değişkenine ve doz–yanıt modeline bağlıdır. Martins ve ark. (2018), yaklaşık 55 g başlangıç ağırlığındaki Avrupa levreklerinde on haftalık denemede büyüme ve azot birikimini farklı modellerle değerlendirmiş; seçilen beş parametreli doygunluk kinetiği modeliyle maksimum büyüme için %0,50, azot birikimi için %0,47 kuru madde taurin düzeyi tahmin etmiştir. Bu değerler, ilgili yem matrisi ve deney koşulları için biyolojik tahminlerdir. Taurin fiyatını, üretim giderlerini veya satış gelirini içermedikleri için ekonomik optimum olarak adlandırılamaz.

Meta-analizden türetilen %0,79 toplam taurin tahmini de bu ayrım kapsamında değerlendirilmelidir (Li ve ark., 2022). Birden fazla türün biyolojik yanıtlarını birleştiren regresyon, katkı fiyatını ve tamamlanmış yem maliyetini içermediği için ekonomik optimumu belirleyemez. Üretim kararı, ilgili türün kendi FCR yanıtı ve aynı formülasyonun maliyeti üzerinden verilmelidir.

Ekonomik değerlendirmede amaç önceden tanımlanmalıdır. Birim canlı ağırlık artışı başına yem giderini en aza indiren doz ile belirli bir üretim dönemindeki net kazancı en yükseğe çıkaran doz aynı olmayabilir. Daha hızlı büyüme hedef hasat ağırlığına ulaşma süresini kısaltıyorsa, yem dışındaki süreye bağlı giderler de değişebilir. Ancak kısa süreli bir juvenil denemesindeki büyüme farkı, ticari hasada kadar aynı oranda devam edecekmiş gibi kabul edilemez. Bu nedenle biyolojik model çıktıları, üretim ölçeğinde sınanacak ekonomik senaryolar için girdi olarak kullanılmalıdır.

7.2. Yem maliyeti ve FCR üzerinden başabaş analizi

İlk karşılaştırma, aynı ölçüm temeliyle hesaplanan FCR ile tamamlanmış yemin birim fiyatını birleştirir. P yem fiyatını, F FCR'yi ve C birim canlı ağırlık artışına karşılık gelen yem giderini gösterdiğinde ilişki şöyledir:

$$C = P \times F$$

P'nin birimi para birimi/kg yem, F'nin birimi kg yem/kg canlı ağırlık artışı olduğunda, C'nin birimi para birimi/kg canlı ağırlık artışıdır. Bu, toplam üretim maliyeti değildir. Ayrıca, başlangıç biyokütlesini içeren yem gideri, hasat ağırlığına bölünerek karıştırılmamalıdır. Deneme FCR'sinin tüketilen yeme mi, verilen yeme mi dayandığı; yem kaybının ve ölümlerin hesaplamaya nasıl dahil edildiği açıkça belirtilmelidir. İşletme bütçesinde satın alınan ve kullanılan yem miktarı esas alınırken, deneysel FCR ile bu miktar arasındaki fark ayrıca değerlendirilir.

Taurinsiz referansın yem fiyatı P_0 ve FCR'si F_0, takviyeli seçeneğin değerleri P_1 ve F_1 ise, takviyeli yem bu dar maliyet ölçütü bakımından $P_1 \times F_1 < P_0 \times F_0$ koşulunda avantaj sağlar. Başabaş FCR ve karşılanabilecek en yüksek yem fiyatı şu şekilde hesaplanabilir:

$$F_1 \text{ başabaş} = (P_0 \times F_0) / P_1$$

$$P_1 \text{ en yüksek} = (P_0 \times F_0) / F_1$$

Bu eşitlikler taurinin tüm biyolojik yararlarını fiyatlandırmaz; ölçülen FCR iyileşmesinin ne kadar yem fiyatı artışını karşılayabileceğini gösterir. Özellikle alternatif proteinlerle yeniden formüle edilen yemlere yalnızca taurin bedeli

eklenmemelidir. Taurinin yerini aldığı hammadde, eş zamanlı amino asit düzenlemeleri ve diğer bileşen değişiklikleri hesaba katılarak tamamlanmış yemin maliyetiyle karşılaştırılmalıdır.

Sabit bir temel formülasyonda d kg/kg taurin, aynı miktardaki bir hammaddenin yerine konuluyorsa, doğrudan hammadde maliyeti farkı yaklaşık d × (taurin fiyatı − çıkarılan hammadde fiyatı) olur. Diğer bileşenler veya işleme giderleri değişiyorsa, bunlar ayrıca eklenir. Örneğin, 5 g/kg ilave, hesaplamada d = 0,005 kg/kg olarak kullanılmalıdır. Yemde zaten bulunan doğal taurin miktarı gereksinim değerlendirmesine dahil edilir; takviye maliyeti ise satın alınan ilave miktara bağlıdır.

Maliyet karşılaştırması tek bir FCR ortalamasıyla sınırlandırılmamalıdır. FCR'nin tanklar arası değişkenliği, katkı ve hammadde fiyatlarıyla birlikte makul aralıklar içinde değerlendirilmelidir. Ekonomik avantajın yalnızca en iyimser FCR varsayımında ortaya çıkmasıyla gözlenen belirsizlik aralığının büyük bölümünde korunması farklı kararlar doğurur. En düşük gözlenen FCR'ye sahip grubu seçmek yerine, tekrarlanabilir performans ve maliyet sonuçları aranmalıdır. Sonraki aşamada satış geliri, yavru maliyeti, enerji, işçilik, sağlık giderleri ve üretim süresi aynı bütçe sınırları içinde eklenebilir; ölçülmemiş kalite primi veya ölüm azalması gelir kalemi olarak varsayılmamalıdır.

7.3. Kullanılabilir doz ve biyolojik sınırlar

Satın alınan taurinin tamamının balık tarafından alınacağı varsayımı her besleme koşulunda geçerli değildir. Watson ve ark. (2015) ticari tip yemlerde suya geçişi incelemiş ve kaybın su içindeki bekleme süresiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, yemleme yönetiminin katkının kullanılabilir miktarını etkileyebileceğini ortaya koyar. Bununla birlikte, deneydeki uzun bekleme sürelerinden elde edilen kayıp oranları, hızla tüketilen yemlere doğrudan uygulanmamalıdır. Maliyet değerlendirmesinde peletin suya dayanıklılığı, tüketilmeden önce suda kaldığı süre ve öğün uygulaması birlikte dikkate alınmalıdır.

Dozu artırmak, yetersiz kullanımın sınırsız biçimde telafisi olarak görülmemelidir. Liu ve ark. (2018), yaklaşık 7,46 g kalkan juvenillerinde on haftalık denemede 0, 10, 50 ve 100 g/kg taurin ilavesini karşılaştırmıştır. 10 g/kg düzeyinde büyüme ve yemden yararlanma iyileşirken, 100 g/kg grubunda karaciğer ve distal bağırsak yapısında olumsuz değişiklikler bildirilmiştir. Çalışma, test edilen tür ve koşullarda aşırı dozun biyolojik maliyetlere yol açabileceğini göstermektedir. Buradaki yüksek doz sınaması, diğer balık türleri için evrensel bir güvenli üst sınır veya pratik bir takviye önerisi değildir.

7.4. Balık unu tasarrufundan çevresel değerlendirmeye

Taurin takviyesi, besinsel dengenin korunmasına yardımcı olduğu ölçüde düşük balık unlu formülasyonların uygulanabilirliğini artırabilir. Sarıağız çalışmalarındaki büyüme ve FCR yanıtları bu potansiyele örnek teşkil eder (Güroy ve ark., 2024, 2025). Ancak çevresel sonuçlar için yalnızca yemdeki balık unu yüzdesi yeterli değildir. Birim canlı ağırlık artışına karşılık kullanılan balık unu miktarı, yemdeki balık unu kütle payı ile FCR'nin çarpımıyla izlenebilir. Bu gösterge balık unu kullanım yoğunluğunu ifade eder; balık yağını, hammadde kökenini veya işleme verimini içermediğinden, yabani balık kullanım oranıyla eş tutulmamalıdır.

Silva ve ark. (2018), balıkçılık, kanatlı ve soya kökenli protein ve lipid kaynaklarını üretim, işleme ve Portekiz'deki yem üretim noktasına taşıma aşamalarını kapsayan bir yaşam döngüsü değerlendirmesiyle karşılaştırmıştır. Çalışma, atıfsal yaklaşım ve kütleye dayalı yük dağıtımını kullanmış; işlevsel birimi 1 ton hammadde olarak tanımlamıştır. Böylece karşılaştırma bir ton balık üretiminin veya sindirilebilir proteinin çevresel maliyetini doğrudan vermemektedir. Ayrıca, yan ürünlerin aksi durumda atık olarak kalmasının önlenmesine ilişkin yararlar değerlendirmeye dahil edilmemiştir. Bu nedenle, yan ürün veya balık unu ikamesinin çevresel üstünlüğü, kullanılan dağıtım yöntemi, üretim sistemi ve işlevsel birimle birlikte değerlendirilmelidir.

Taurin içeren iki yem için çevresel karşılaştırma kurulurken ortak bir işlevsel birim seçilmelidir. Bir kilogram yem, yem üretiminin yükünü karşılaştırırken; bir kilogram canlı ağırlık artışı veya hasat ürünü ise besleme performansını da hesaba katmayı gerektirir. Yalnızca yem kaynaklı iklim etkisine yönelik ilk yaklaşım, kilogram yem başına etki katsayısının aynı temeldeki FCR ile çarpılmasıdır. Tam üretim değerlendirmesinde enerji kullanımı, ölümler, atık yönetimi ve diğer işletme girdileri de yer alır. Taurinin üretim ve taşıma yükü de yem envanterine eklenmelidir. Düşük ilave oranı nedeniyle bu yükü veri olmadan sıfır kabul etmek uygun değildir.

Çevresel değerlendirme için burada önerilen ölçütler; yem kaynaklı sera gazı etkisi, denizel hammadde kullanımı, arazi ve su kullanımı ile besin maddesi kayıplarıdır. Bu ölçütlerden birindeki iyileşme, diğerlerinin de aynı yönde değiştiğini göstermez. Taurinin olası katkısı, besin maddelerinden yararlanmayı destekleyerek belirli bir yem formülasyonunun birim üretim başına kaynak gereksinimini azaltmasıdır. Böyle bir etki, taurinli ve taurinsiz seçenekler için ölçülen performansın karşılaştırılabilir çevresel envanterlerle birleştirilmesini gerektirir.

7.5. Azot verimliliği ve uygulamaya aktarım

Azot birikimi, besleme ile kaynak verimliliği arasındaki bağlantının doğrudan izlenebilen bileşenlerinden biridir. Martins ve ark. (2018) çalışmasında taurin düzeyine bağlı azot birikimi yanıtı belirlenmiştir; ancak bu sonuç tek başına işletmenin toplam azot deşarjını ölçmez. Bir üretim döneminde yemle sağlanan azot ile balık biyokütlesinde net tutulan azotun birlikte hesaplanması gerekir. Tutulmayan azotun çözünmüş atılımı, dışkı, tüketilmeyen yem ve sistemden uzaklaştırılan materyal içindeki dağılımı ayrıca belirlenmelidir. Sindirilebilirlik artışı ile azot tutulumu artışı da aynı süreç olarak değerlendirilmemelidir.

Sarıağız araştırmalarının pratik karşılığı, belirli bir taurin dozuna ekonomik bir etiket vermekten çok, uygun formülasyon adaylarını ortaya koymaktır. Güroy ve ark. (2024, 2025) tarafından bildirilen FCR değerleri, karşılaştırılabilir ve doğrulanmış yem fiyatları sağlandığında maliyet modeline girdi oluşturabilir. Bununla birlikte, üçlü amino asit takviyesinin toplam bedeli yalnızca taurine yüklenmemeli; taurin, lizin ve metiyonin ile değişen diğer bileşenler birlikte maliyetlendirilmelidir. Biyolojik uygunluk, birim üretim maliyeti ve çevresel etkiler aynı yem seçenekleri üzerinde değerlendirilerek uygulama kararı verilmelidir.

8. Sonuçlar

Taurin, modern balık beslemede hammadde seçimi ile fizyolojik gereksinimler arasında bağlantı kuran önemli bir yem bileşenidir. Balık ununun azaltıldığı formülasyonlarda yem ham protein düzeyinin korunması, taurin ve diğer amino asitlerin yeterli miktarda sağlandığını garanti etmez. İncelenen çalışmalar, taurinin büyüme ve yemden yararlanmayı destekleyebildiğini; bu yanıtın tür, yaşam evresi, başlangıç taurin arzı ve yemin besinsel dengesine bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle taurin, analiz edilen toplam içerik ve eşlik eden besin maddeleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Taurinin besinsel işlevi, eksikliğinin büyüme üzerindeki etkilerinin giderilmesinden daha geniştir. Safra asitleri ve lipidlerden yararlanma, karaciğer ve bağırsak işlevleri, redoks dengesi ve hücresel stres yanıtları bu genişliğin başlıca bileşenleridir. Bununla birlikte, kanıtın gücü tüm mekanizmalar için aynı değildir. Sindirilebilirlik, doku yapısı, metabolit ve enzim ölçümleri doğrudan fizyolojik bilgi sağlarken, gen ifadesi veya omik yol ilişkileri çoğu zaman ileri deneylerle sınanması gereken açıklamalar sunar. Balık hücresi modelleri ve balık dışı mekanistik çalışmalar bu açıklamalara katkı verir; ancak bütün balıkta besleme yoluyla gösterilen sonuçlarla aynı düzeyde yorumlanmamalıdır.

Metabolik dayanıklılık yaklaşımı, taurinin değerini yalnızca normal koşullardaki ağırlık artışıyla sınırlı tutmadan değerlendirmeyi sağlar. İncelenen

hipoksi ve enfeksiyon deneyleri, stres koşullarında yaşama, doku hasarı ve korunma yanıtlarının ayrıca izlenmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak belirli bir stres modelinde gözlenen yarar, tüm çevresel veya hastalık etkenlerine karşı genel bir direnç anlamına gelmez. Taurinin dayanıklılığa katkısı, tanımlanmış bir zorlanma altında işlevlerin sürdürülmesi ve toparlanmayla ilişkilendirildiği ölçüde uygulama açısından anlam kazanır.

Sarıağızda metiyonin–taurin araştırmaları ve düşük balık unlu yem denemeleri, taurin yanıtının amino asit matrisine bağlı olduğunu göstermektedir. Belirli bir formülasyondaki etkili doz, tüm sarıağız yemleri için sabit bir gereksinim olarak kabul edilemez. Kombine destekle elde edilen performans, tek başına bileşenlerin ayrı etkilerini veya istatistiksel sinerjiyi kanıtlamaz. Büyüme, FCR ve karaciğer bulgularının birlikte değerlendirilmesi uygulama yorumunu güçlendirir.

Ekonomik sonuçlar, biyolojik etkilerin üretime aktarılmasında belirleyicidir. Biyolojik açıdan etkili bir takviye, yem fiyatındaki artışı karşılayacak FCR veya üretim avantajı sağlamadığında ekonomik olarak optimum olmayabilir. Tamamlanmış yemin maliyeti, büyüme süresi, yaşama oranı ve hasat biyokütlesi aynı üretim sınırları içinde değerlendirilmelidir.

Taurinin sürdürülebilir yem tasarımındaki potansiyeli, alternatif hammaddelerin besinsel açıdan daha etkili kullanılabilmesine katkısından kaynaklanmaktadır. Ancak balık unu yüzdesinin düşürülmesi tek başına çevresel üstünlüğün kanıtı değildir. Yemden yararlanma, denizel hammadde kullanım yoğunluğu, besin maddesi kayıpları ve hammadde üretiminin çevresel yükleri birlikte değerlendirilmelidir. Taurinin üretim ve taşıma etkileri de bu hesaplamanın bir parçasıdır. Bu yaklaşım, formülasyon değişikliğinin hangi kaynak kullanımını azalttığını ve hangi yükleri değiştirdiğini açıkça değerlendirmeyi sağlar.

Gelecek araştırmaların hedefi, belirli tür ve üretim koşullarında güvenilir taurin yanıt aralıkları oluşturmaktır. Analiz edilmiş yem bileşimi, uygun deney birimi ve belirsizliği gösteren raporlama bu hedefin temelidir. Mekanistik bulguların fizyolojik işlevle, fizyolojik yararların ise ticari üretim sonuçlarıyla doğrulanması gerekir. Mevcut kanıtlar, taurinin dengeli bir formülasyon içinde değerlendirilmesini ve takviye kararının ölçülebilir biyolojik, ekonomik ve çevresel sonuçlara dayandırılmasını desteklemektedir.

Teşekkür

Bu kitap bölümünde kullanılan *Argyrosomus regius* çalışmalarına ait bulgular, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 3001 – Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında yürütülen **116O864 numaralı "Düşük Seviyede Balık Unu İçeren Granyöz Balığı (*Argyrosomus regius*) Yemlerinin Geliştirilmesi"** başlıklı proje kapsamında desteklenen araştırmalardan elde edilmiştir. Yazar, sağladığı destek için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Yazar ayrıca, bu kitap bölümünün hazırlanması ve yazım sürecindeki değerli bilimsel katkıları, görüşleri ve desteği için eşi **Prof. Dr. Betül Güroy'a** içtenlikle teşekkür eder.

Kaynaklar

Aragão, C., Teodósio, R., Colen, R., Richard, N., Rønnestad, I., Dias, J., Conceição, L. E. C., & Ribeiro, L. (2023). Taurine supplementation to plant-based diets improves lipid metabolism in Senegalese sole. Animals, 13, 1501. https://doi.org/10.3390/ani13091501

Baliou, S., Adamaki, M., Ioannou, P., Pappa, A., Panayiotidis, M. I., Spandidos, D. A., Christodoulou, I., Kyriakopoulos, A. M., & Zoumpourlis, V. (2021). Protective role of taurine against oxidative stress (Review). Molecular Medicine Reports, 24, 605. https://doi.org/10.3892/mmr.2021.12242

Bian, L., Wang, X., Li, C., & Liu, D. (2026a). Effect of dietary taurine on the growth, mitochondrial function, lipid metabolism, and muscle texture of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). Aquaculture Reports, 48, 103623. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2026.103623

Bian, L., Wang, Y., Zhang, X., Zhang, M., & Liu, D. (2026b). Effect of Dietary Taurine on the Innate Immune Responses, Digestive Function, and mTOR Signaling in Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*). Aquaculture Nutrition, 2026, 7769837. https://doi.org/10.1155/anu/7769837

Candebat, C. L., Booth, M., Codabaccus, M. B., & Pirozzi, I. (2020). Dietary methionine spares the requirement for taurine in juvenile Yellowtail Kingfish (*Seriola lalandi*). Aquaculture, 522, 735090. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735090

Chen, K., Chen, L., He, Z., Xie, P., Liu, H., Gao, Z., & Wang, H. (2026). Dietary taurine supplementation ameliorates growth performance, intestinal health, and environmental stress tolerance in summer-reared *Megalobrama amblycephala*. Animal Nutrition, 27, 264–278. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2026.02.011

Cheng, C.-H., Guo, Z.-X., & Wang, A.-L. (2018). The protective effects of taurine on oxidative stress, cytoplasmic free-Ca2+ and apoptosis of pufferfish (*Takifugu obscurus*) under low temperature stress. Fish & Shellfish Immunology, 77, 457–464. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.04.022

de Moura, L. B., ve ark. (2018). Taurine and methionine supplementation as a nutritional strategy for growth promotion of meagre (*Argyrosomus regius*) fed high plant protein diets. Aquaculture, 497, 389–395. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.07.038

de Moura, L. B., ve ark. (2019). Nutrient digestibility, digestive enzymes activity, bile drainage alterations and plasma metabolites of meagre (*Argyrosomus regius*) feed high plant protein diets supplemented with taurine and methionine. Aquaculture, 511, 734231. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734231

Gaon, A., Nixon, O., Tandler, A., Falcon, J., Besseau, L., Escande, M., El Sadin, S., Allon, G., & Koven, W. (2021). Dietary taurine improves vision in different age gilthead sea bream (*Sparus aurata*) larvae potentially contributing to increased prey hunting success and growth. Aquaculture, 533, 736129. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736129

Gaylord, T. G., Teague, A. M., & Barrows, F. T. (2006). Taurine supplementation of all-plant protein diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Journal of the World Aquaculture Society, 37(4), 509–517. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2006.00064.x

Gaylord, T. G., ve ark. (2007). Supplementation of taurine and methionine to all-plant protein diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture, 269, 514–524. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.04.011

Güroy, D., ve ark. (2024). Dietary taurine improves the growth performance, health status and liver histopathology of meagre (*Argyrosomus regius*) fed a reduced fish meal diet. Annals of Animal Science, 24, 851–866. https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0011

Güroy, D., ve ark. (2025). Synergistic impacts of dietary supplementation of taurine, lysine and methionine in low fish meal diets on the growth performance, health status and liver histopathology of meagre (*Argyrosomus regius*). Animal Feed Science and Technology, 330, 116527. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116527

Kotzamanis, Y., Tsironi, T., Brezas, A., Grigorakis, K., Ilia, V., Vatsos, I., Romano, N., van Eys, J., & Kumar, V. (2020). High taurine supplementation in plant protein-based diets improves growth and organoleptic characteristics of European seabass (*Dicentrarchus labrax*). Scientific Reports, 10, 12294. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69014-x

Krogdahl, Å., ve ark. (2020). Choline and phosphatidylcholine, but not methionine, cysteine, taurine and taurocholate, eliminate excessive gut mucosal lipid accumulation in Atlantic salmon (*Salmo salar* L). Aquaculture, 528, 735552. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735552

Li, L., Liu, H.-Y., Xie, S.-Q., Zhang, P.-Y., & Yang, Z.-C. (2022). Effects of taurine supplementation on growth performance and feed utilization in aquatic animals: A meta-analysis. Aquaculture, 551, 737896. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.737896

Liu, J.-X., Guo, H.-Y., Zhu, K.-C., Liu, B.-S., Zhang, N., & Zhang, D.-C. (2022). Effects of exogenous taurine supplementation on the growth, antioxidant capacity, intestine immunity, and resistance against *Streptococcus agalactiae* in juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) fed with a low-fishmeal diet. Frontiers in Immunology, 13, 1036821. https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.1036821

Liu, Y., Yang, P., Hu, H., Li, Y., Dai, J., Zhang, Y., Ai, Q., Xu, W., Zhang, W., & Mai, K. (2018). The tolerance and safety assessment of taurine as additive in a marine carnivorous fish, *Scophthalmus maximus* L. Aquaculture Nutrition, 24, 461–471. https://doi.org/10.1111/anu.12579

Ma, D., Bai, N., Pan, S., Chen, C., & Gu, M. (2025). Effects of hydroxyproline-taurine-cholesterol supplementation on the liver health and lipid metabolisms of turbot *Scophthalmus maximus* fed *Chlorella vulgaris*. Aquaculture Reports, 42, 102726. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102726

Ma, X., Rao, Z., & Zheng, L. (2026). Taurine and metabolic diseases: Molecular mechanisms and therapeutic implications. Food Frontiers, 7, e70354. https://doi.org/10.1002/fft2.70354

Martins, N., Estevão-Rodrigues, T., Diógenes, A. F., Diaz-Rosales, P., Oliva-Teles, A., & Peres, H. (2018). Taurine requirement for growth and nitrogen accretion of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Aquaculture. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.007

Matias, A. C., Dias, J., Barata, M., Araujo, R. L., Bragança, J., & Pousão-Ferreira, P. (2020). Taurine modulates protein turnover in several tissues of meagre juveniles. Aquaculture, 528, 735478. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735478

Pan, S., Gu, M., Chen, C., Ma, D., Liang, Z., & Bai, N. (2024). Effects of combination of hydroxyproline, taurine and cholesterol on the growth and quality of turbot *Scophthalmus maximus* fed *Clostridium autoethanogenum* protein. Aquaculture Reports, 39, 102411. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102411

Pereiro, P., ve ark. (2025). Identification of taurine as a resistance-associated metabolite against *Aeromonas salmonicida* and its protective, immune-regulatory, and microbiota-shaping effects in turbot (*Scophthalmus maximus*). Aquaculture, 608, 742721. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.742721

Qi, G., ve ark. (2026). Effects of dietary serine addition to a high plant protein diet on growth performance, body composition, hepatosomatic histological structure and metabolism of taurine synthesis in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Journal of Fish Biology, 108(2), 472–482. https://doi.org/10.1111/jfb.70170

Ramos-Pinto, L., Machado, M., Calduch-Giner, J., Pérez-Sánchez, J., Dias, J., Conceição, L. E. C., Silva, T. S., & Costas, B. (2021). Dietary histidine, threonine, or taurine supplementation affects gilthead seabream (*Sparus aurata*) immune status. Animals, 11, 1193. https://doi.org/10.3390/ani11051193

Richard, N., Colen, R., & Aragão, C. (2017). Supplementing taurine to plant-based diets improves lipid digestive capacity and amino acid retention of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles. Aquaculture, 468, 94–101. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.050

Saavedra, M., ve ark. (2022). Plant-based diets fed to juvenile meagre *Argyrosomus regius* with low methionine and taurine supplementation led to an overall reduction in fish performance and to an increase in muscle fibre recruitment. Journal of Fish Biology. https://doi.org/10.1111/jfb.15188

Salze, G. P., & Davis, D. A. (2015). Taurine: a critical nutrient for future fish feeds. Aquaculture, 437, 215–229. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.12.006

Sampath, W. W. H. A., ve ark. (2020). Roles of dietary taurine in fish nutrition. Marine Life Science & Technology, 2, 360–375. https://doi.org/10.1007/s42995-020-00051-1

Schuller-Levis, G. B., & Park, E. (2003). Taurine: new implications for an old amino acid. FEMS Microbiology Letters, 226, 195–202. https://doi.org/10.1016/S0378-1097(03)00611-6

Silva, C. B., Valente, L. M. P., Matos, E., Brandão, M., & Neto, B. (2018). Life cycle assessment of aquafeed ingredients. The International Journal of Life Cycle Assessment, 23, 995–1017. https://doi.org/10.1007/s11367-017-1414-8

Steinberg, C. E. W. (2022). Taurine—"Controlling Rather than Fueling". In Aquatic Animal Nutrition: Organic Macro- and Micro-Nutrients (pp. 223–242). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87227-4_11

Song, T., Liang, X., Wang, H., Xue, M., & Wang, J. (2024). Gut microbiota-bile acid crosstalk and metabolic fatty liver in spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*): The role of a cholesterol, taurine and glycine supplement. Animal Nutrition, 17, 87–99. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.03.008

Takagi, S., Murata, H., Goto, T., Ichiki, T., Munasinghe, D. M. S., Endo, M., Matsumoto, T., Sakurai, A., Hatate, H., Yoshida, T., Sakai, T., Yamashita, H., Ukawa, M., & Kuramoto, T. (2005). The green liver syndrome is caused by taurine deficiency in yellowtail, *Seriola quinqueradiata* fed diets without fishmeal. Aquaculture Science, 53(3), 279–290. https://doi.org/10.11233/aquaculturesci1953.53.279

Tarım ve Orman Bakanlığı. (2026). Su Ürünleri İstatistikleri, 2025. İstatistik Bülteni, 66. Tablo 5: Su Ürünleri Yetiştiricilik Üretim Miktarı, 2015–2025. https://istatistik.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/2353

Wang, Q., He, G., Wang, X., Mai, K., Xu, W., & Zhou, H. (2014). Dietary sulfur amino acid modulations of taurine biosynthesis in juvenile turbot (*Psetta maxima*). Aquaculture, 422–423, 141–145. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.12.014

Wang, Z., Ye, H., Huang, Z., Wang, J., Wang, Y., Yu, W., Lin, H., Ma, Z., & Zhou, C. (2025). Taurine Supplementation in Low-Fishmeal of Golden Pompano (*Trachinotus ovatus*) Diets: Improving Intestinal Health and Alleviation of Inflammatory Response. Animals, 15, 3080. https://doi.org/10.3390/ani15213080

Watson, A. M., Barrows, F. T., & Place, A. R. (2015). Leaching of taurine from commercial type aquaculture feeds. Aquaculture Research, 46, 1510–1517. https://doi.org/10.1111/are.12309

Xu, J., ve ark. (2026). Dietary taurine supplementation enhances growth performance of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) fed low-fishmeal diets by improving antioxidant status, non-specific immunity, and tissue health. Animal Nutrition, 26, 306–321. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2026.02.002

Yan, J., Feng, L., Wu, P., Jiang, W., Liu, Y., Ma, Y., Ren, H., Jin, X., Mi, H., Zhang, L., & Zhou, X. (2026). Taurine supplementation in fish meal-free diet improved growth, alleviated hypoxic-induced gill injury associating with Ca2+ homeostasis and endoplasmic reticulum stress in sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). Animal Nutrition, 26, 278–293. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.10.016

Yang, H., Tian, L., Huang, J., Liang, G., & Liu, Y. (2013). Dietary taurine can improve the hypoxia-tolerance but not the growth performance in juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus*. Fish Physiology and Biochemistry, 39, 1071–1078. https://doi.org/10.1007/s10695-012-9763-5

Zhou, Y., Bai, F., Xiao, R., Chen, M., Sun, Y., & Ye, J. (2024). Proteomics and Its Combined Analysis with Transcriptomics: Liver Fat-Lowering Effect of Taurine in High-Fat Fed Grouper (*Epinephelus coioides*). Animals, 14, 2039. https://doi.org/10.3390/ani14142039

2. Bölüm

Su Ayak İzi: Kavramsal Çerçeve ve Türkiye Perspektifi

Banu KUTLU[1] Ayşegül PALA[2]

Giriş

Son iki yüzyılda sanayileşme, nüfus artışı ve ekonomik faaliyetlerdeki hızlı gelişim, doğal kaynaklar üzerinde önemli baskılar oluşturmuştur. Bu baskıdan en fazla etkilenen kaynakların başında su gelmektedir. Artan su talebi, su kalitesindeki bozulma ve iklim değişikliğinin etkileri, su yönetiminin yalnızca teknik bir konu olmaktan çıkıp stratejik bir mesele haline gelmesine neden olmuştur.

Türkiye, su kaynakları açısından ne su zengini ne de su fakiri olarak tanımlanmakla birlikte, mevcut eğilimler ülkenin giderek artan bir su stresi ile karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Bu nedenle suyun daha etkin, verimli ve sürdürülebilir şekilde yönetilmesi zorunludur. Bu noktada, suyun yalnızca doğrudan kullanımını değil, üretim ve tüketim süreçlerindeki dolaylı kullanımını da ortaya koyan yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Su ayak izi kavramı, bu ihtiyaca cevap veren en önemli araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kavram, suyun üretim zinciri boyunca nasıl kullanıldığını ortaya koyarak, görünmeyen su tüketimini de değerlendirme kapsamına almaktadır. Böylece suyun ekonomik ve ekolojik boyutları birlikte ele alınabilmektedir.

Su, ekosistemlerin işleyişi ve insan yaşamının sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez bir kaynaktır. Ancak artan nüfus, kentleşme ve sanayileşme süreçleri su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Bu durum, suyun sürdürülebilir yönetimini küresel ölçekte önemli bir sorun haline getirmiştir.

Su ayak izi kavramı, bir bireyin, toplumun veya ürünün doğrudan ve dolaylı olarak tükettiği toplam su miktarını ifade eder (Hoekstra et al., 2011). Bu yaklaşım, su kullanımının yalnızca görünen kısmını değil, üretim süreçlerinde gizli olarak kullanılan suyu da kapsamaktadır.

[1] Prof. Dr., Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, Orcid: 0000-0001-6348-2754

[2] Doç. Dr., Munzur Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Yetiştiricilik Bölümü, Orcid: 0000-0002-5269-023X

Su, yeryüzündeki tüm canlı yaşamının devamlılığı için vazgeçilmez bir doğal kaynaktır ve ekosistemlerin işleyişinde temel bir rol oynamaktadır. Ancak son yüzyılda özellikle sanayileşme, hızlı nüfus artışı, kentleşme ve ekonomik faaliyetlerin yoğunlaşması, su kaynakları üzerindeki baskıyı önemli ölçüde artırmıştır. Bu süreçte yalnızca suya olan talep artmakla kalmamış, aynı zamanda suyun kalitesi de giderek bozulmuştur. Günümüzde su kaynaklarının aşırı kullanımı, kirlenmesi ve iklim değişikliğine bağlı olarak hidrolojik döngüde meydana gelen değişimler, küresel ölçekte su güvenliğini tehdit eden en önemli çevresel sorunlar arasında yer almaktadır.

Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, tatlı su kaynaklarının mekânsal ve zamansal dağılımının eşit olmaması**,** suya erişimde ciddi eşitsizliklere yol açmaktadır. Birçok bölgede su kıtlığı giderek artarken, bazı bölgelerde su kaynaklarının aşırı kullanımı ekosistem dengesini bozmakta ve biyolojik çeşitlilik üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Özellikle yarı kurak ve kurak iklim kuşaklarında yer alan ülkelerde, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi hayati önem taşımaktadır. Türkiye de bu bağlamda değerlendirildiğinde, kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı bakımından su zengini bir ülke olmayıp, su stresi yaşayan ülkeler arasında yer almaktadır.

Geleneksel su yönetimi yaklaşımları uzun yıllar boyunca suyun yalnızca doğrudan kullanımına odaklanmış, yani çekilen su miktarı temel bir gösterge olarak kabul edilmiştir. Ancak bu yaklaşım, üretim ve tüketim süreçlerinde dolaylı olarak kullanılan su miktarını göz ardı ettiği için yetersiz kalmaktadır. Özellikle küreselleşme ile birlikte üretim süreçlerinin karmaşıklaşması ve uluslararası ticaretin artması, su kullanımının yalnızca yerel bir mesele olmadığını, aynı zamanda küresel bir boyut taşıdığını ortaya koymuştur. Bu durum, suyun yalnızca fiziksel bir kaynak olarak değil, aynı zamanda ekonomik ve ekolojik bir değer olarak değerlendirilmesini gerekli kılmıştır.

Bu noktada geliştirilen su ayak izi (water footprint) kavramı, su kullanımının daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Su ayak izi, bir bireyin, ürünün ya da toplumun doğrudan ve dolaylı olarak tükettiği toplam tatlı su miktarını ifade eder. Bu yaklaşım, üretim zinciri boyunca kullanılan suyu dikkate alarak, su tüketiminin görünmeyen boyutlarını da ortaya koymaktadır. Özellikle "sanal su" kavramı ile birlikte değerlendirildiğinde, bir ürünün üretildiği yer ile tüketildiği yer arasındaki su ilişkisi daha net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

Su ayak izi yaklaşımı, yalnızca suyun miktarını değil, aynı zamanda su kalitesini de dikkate alan bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır. Bu kapsamda mavi, yeşil ve gri su bileşenleri birlikte ele alınarak, su kaynaklarının hem niceliksel hem de niteliksel durumu değerlendirilebilmektedir. Özellikle gri su

ayak izi, su kirliliğinin çevresel etkilerini ortaya koyması açısından önemli bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Bu yönüyle su ayak izi, su yönetimi politikalarının geliştirilmesinde ve sürdürülebilirlik stratejilerinin oluşturulmasında önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, su ayak izinin büyük ölçüde tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı görülmektedir. Tarım sektöründe kullanılan geleneksel sulama yöntemleri, su verimliliğini düşürmekte ve su kayıplarını artırmaktadır. Bunun yanı sıra, gübre ve pestisit kullanımı su kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratarak gri su ayak izinin artmasına neden olmaktadır. Sanayi ve evsel kullanım ise toplam su tüketimi içerisinde daha düşük bir paya sahip olmakla birlikte, özellikle kirlilik açısından önemli bir baskı oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, su ayak izi kavramını kavramsal ve uygulamalı boyutlarıyla ele alarak, küresel ve Türkiye ölçeğinde su kullanım dinamiklerini ortaya koymaktır. Bu kapsamda su ayak izinin bileşenleri, sektörel dağılımı, su kalitesi ile ilişkisi ve sürdürülebilir su yönetimi açısından önemi detaylı bir şekilde değerlendirilmektedir. Ayrıca, su ayak izi yaklaşımının su yönetimi politikalarına nasıl entegre edilebileceği tartışılarak, geleceğe yönelik çözüm önerileri sunulmaktadır.

2. SU AYAK İZİ KAVRAMI VE TANIMI

Su ayak izi (water footprint), bir bireyin, ürünün, işletmenin veya ülkenin belirli bir zaman dilimi içerisinde doğrudan ve dolaylı olarak tükettiği toplam tatlı su miktarını ifade eden kapsamlı bir göstergedir (Hoekstra et al., 2011). Bu kavram, geleneksel su kullanım göstergelerinden farklı olarak yalnızca çekilen su miktarını değil, aynı zamanda üretim süreçlerinde kullanılan ve çoğu zaman görünmeyen su miktarını da değerlendirmektedir. Bu yönüyle su ayak izi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından bütüncül bir analiz çerçevesi sunmaktadır.

Su ayak izi yaklaşımının temelinde, suyun yalnızca fiziksel bir kaynak olarak değil, aynı zamanda ekonomik faaliyetlerin ayrılmaz bir bileşeni olarak ele alınması yatmaktadır. Özellikle küreselleşme ile birlikte üretim ve tüketim süreçlerinin farklı coğrafyalara yayılması, su kullanımının mekânsal olarak birbirine bağlı hale gelmesine neden olmuştur. Bu bağlamda, bir ülkede tüketilen bir ürünün üretimi sırasında kullanılan suyun başka bir ülkedeki su kaynakları üzerinde baskı oluşturabileceği kabul edilmektedir. Bu durum, “sanal su” (virtual water) kavramı ile açıklanmakta olup, su ayak izi yaklaşımının temel bileşenlerinden birini oluşturmaktadır (Allan, 1998).

Su ayak izi, genel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır: mavi su, yeşil su ve gri su ayak izi. Bu bileşenler birlikte değerlendirildiğinde, suyun hem niceliksel hem de niteliksel kullanımı ortaya konulabilmektedir**.**

2.1. Mavi Su Ayak İzi

Mavi su ayak izi, yüzey ve yeraltı su kaynaklarından (nehirler, göller, rezervuarlar ve akiferler) çekilen ve tüketilen su miktarını ifade etmektedir. Bu bileşen, özellikle tarımsal sulama, sanayi üretimi ve evsel kullanım gibi faaliyetlerle ilişkilidir. Mavi su ayak izi, suyun doğrudan kullanımını temsil ettiği için su kaynakları üzerindeki baskının en belirgin göstergelerinden biridir (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Mavi su kullanımının sürdürülebilirliği, suyun yenilenme kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Aşırı yeraltı suyu çekimi veya yüzey sularının yoğun kullanımı, hidrolojik dengenin bozulmasına ve su kaynaklarının tükenmesine yol açabilmektedir.

2.2. Yeşil Su Ayak İzi

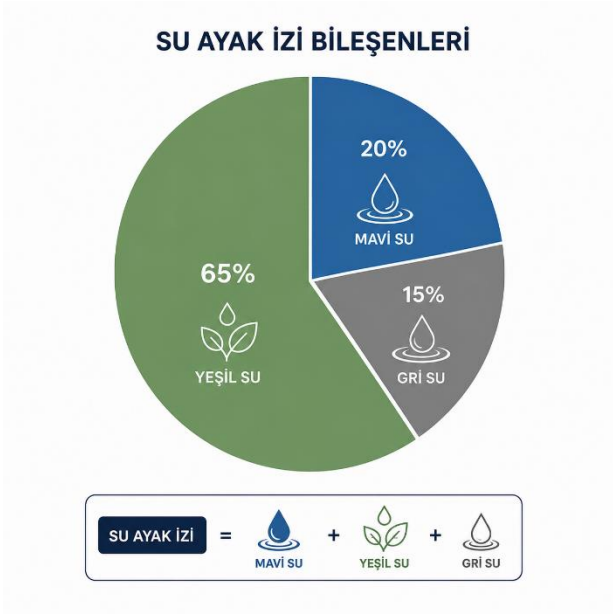
Yeşil su ayak izi, yağış yoluyla toprağa giren ve bitkiler tarafından kullanılan su miktarını ifade etmektedir. Bu su, toprak nemi olarak depolanmakta ve özellikle tarımsal üretimde bitkilerin büyümesi için temel bir kaynak oluşturmaktadır.

Yeşil su ayak izi, özellikle yağışa bağlı tarım sistemlerinde büyük önem taşımaktadır. Bu bileşen, suyun doğal döngü içerisindeki kullanımını temsil ettiği için genellikle daha sürdürülebilir bir su kullanım türü olarak değerlendirilmektedir. Ancak iklim değişikliği ve yağış rejimindeki düzensizlikler, yeşil suyun kullanılabilirliğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

2.3. Gri Su Ayak İzi

Gri su ayak izi, belirli bir kirletici yükün çevresel kalite standartlarına uygun seviyelere düşürülmesi için gerekli olan su miktarını ifade etmektedir (Chapagain & Hoekstra, 2006). Bu bileşen, suyun kalite boyutunu değerlendiren önemli bir göstergedir.

Özellikle tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübre ve pestisitler, sanayi kaynaklı atıklar ve evsel deşarjlar gri su ayak izinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle gri su ayak izi, su kirliliğinin çevresel etkilerinin anlaşılması açısından kritik bir rol oynamaktadır



.

Şekil 1. Su ayak İzi Bileşenleri

2.4. Su Ayak İzi Hesaplama Yaklaşımı

Su ayak izi hesaplamaları, belirli bir ürün veya sistem için kullanılan toplam su miktarının hesaplanmasına dayanmaktadır. Genel olarak:

Su Ayak İzi = Mavi Su + Yeşil Su + Gri Su

şeklinde ifade edilmektedir.

Ürün bazında değerlendirildiğinde, su ayak izi üretim sürecinin tüm aşamalarını kapsamakta olup, ham madde üretiminden nihai ürüne kadar geçen süreçte kullanılan su miktarını içermektedir. Bu nedenle su ayak izi, yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment, LCA) ile benzer bir yaklaşım sergilemektedir.

2.5. Su Ayak İzinin Önemi ve Uygulama Alanları

Su ayak izi kavramı, su yönetimi ve sürdürülebilirlik çalışmalarında önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde:

- Su kullanımının sektörel dağılımı belirlenebilir
- Su yoğun ürünler tespit edilebilir
- Su verimliliği artırılabilir
- Su politikaları geliştirilebilir

Ayrıca su ayak izi, yalnızca bilimsel çalışmalarla sınırlı kalmayıp, politika yapıcılar, sanayi kuruluşları ve bireyler için de karar destek aracı olarak kullanılmaktadır.

3. KÜRESEL SU AYAK İZİ VE GENEL EĞİLİMLER

Su ayak izi kavramı, yalnızca yerel ya da ulusal düzeyde su kullanımının değerlendirilmesine değil, aynı zamanda küresel ölçekte üretim-tüketim ilişkilerinin su kaynakları üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına da olanak sağlamaktadır. Özellikle son birkaç on yılda hızlanan küreselleşme, üretim süreçlerinin farklı coğrafyalara yayılması ve uluslararası ticaret hacmindeki artış, su kullanımının yalnızca üretimin gerçekleştiği yer ile sınırlı olmadığını açık biçimde göstermiştir. Bir ülkede tüketilen ürünün üretimi için gereken suyun başka bir ülkede kullanılması, su kaynakları üzerindeki baskının sınır aşan bir nitelik taşımasına neden olmaktadır. Bu nedenle su ayak izi yaklaşımı, günümüzde su yönetiminin yalnızca hidrolojik değil, aynı zamanda ekonomik, ekolojik ve politik boyutlarını da kapsayan stratejik bir değerlendirme aracı haline gelmiştir.

Küresel ölçekte bakıldığında, tatlı su kullanımının en büyük bölümünün tarım sektöründen kaynaklandığı bilinmektedir. Dünya genelinde toplam tatlı su çekiminin yaklaşık %70'inin tarımsal üretim için kullanıldığı, geri kalan kısmın ise sanayi ve evsel kullanım arasında paylaşıldığı bildirilmektedir (FAO, 2020). Bu durum, özellikle gıda üretiminin su ayak izi üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Bitkisel üretimde sulama gereksinimi, hayvansal üretimde ise yem üretimi, içme suyu ihtiyacı ve işleme süreçleri, tarımın su ayak izini artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle su ayak izi değerlendirmelerinde tarım sektörü çoğunlukla ilk ve en önemli inceleme alanı olarak ele alınmaktadır.

Küresel su ayak izinin dağılımı yalnızca sektörlere göre değil, ülkelerin gelişmişlik düzeyine, iklim özelliklerine, tüketim alışkanlıklarına ve üretim yapılarına göre de farklılık göstermektedir. Gelişmiş ülkelerde kişi başına düşen su ayak izi genellikle daha yüksek olma eğilimindedir. Bunun temel nedenleri arasında yüksek et tüketimi, işlenmiş ürünlerin yoğun kullanımı, tekstil ve sanayi ürünlerine olan talebin artması ve enerji yoğun yaşam biçimleri yer almaktadır. Buna karşılık, düşük ve orta gelirli ülkelerde kişi başına düşen su ayak izi daha düşük görünse de, bu ülkelerde tarımsal üretimin yoğunluğu ve su yönetim altyapısındaki yetersizlikler nedeniyle su kaynakları üzerindeki baskı bölgesel ölçekte oldukça yüksek olabilmektedir. Dolayısıyla su ayak izi yalnızca nicel bir gösterge değil, aynı zamanda üretim ve tüketim sistemlerinin yapısını ortaya koyan bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

Küresel su ayak izi çalışmalarında dikkat çeken önemli noktalardan biri, tüketim kalıplarının su kullanımı üzerindeki belirleyici etkisidir. Özellikle et, süt ürünleri, kahve, kakao, pamuk ve çeşitli endüstriyel ürünler yüksek su ayak izine sahip ürün grupları arasında yer almaktadır. Örneğin, bir kilogram sığır eti üretimi

için gereken su miktarı, birçok bitkisel ürüne kıyasla oldukça yüksektir. Benzer şekilde pamuk üretimi de yüksek su talebi nedeniyle küresel su ayak izi tartışmalarında öne çıkan ürünlerden biridir. Bu durum, bireysel tüketim tercihlerinin dahi küresel su kaynakları üzerinde dolaylı etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, su ayak izi yalnızca üretici ülkelerin değil, tüketici toplumların da sorumluluk alanına giren bir kavramdır.

Küresel düzeyde su ayak izi değerlendirmeleri, "sanal su ticareti" kavramı ile daha da anlamlı hale gelmektedir. Sanal su, bir ürünün üretimi boyunca kullanılan ve ürün aracılığıyla dolaylı olarak taşınan su miktarını ifade etmektedir (Allan, 1998). Uluslararası ticaret yoluyla ülkeler yalnızca mal ve hizmet alışverişi yapmamakta, aynı zamanda suyu da dolaylı olarak transfer etmektedir. Böylece su açısından zengin veya su stresi yaşayan ülkeler arasındaki ekonomik ilişkiler, küresel su dengesini etkileyebilmektedir. Su yoğun ürünleri ithal eden ülkeler, kendi su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltabilirken; bu ürünleri ihraç eden ülkeler ise üretim kaynaklı su baskısını artırabilmektedir. Bu nedenle küresel su ayak izi analizleri, uluslararası ticaretin çevresel maliyetlerini görünür kılması açısından önem taşımaktadır.

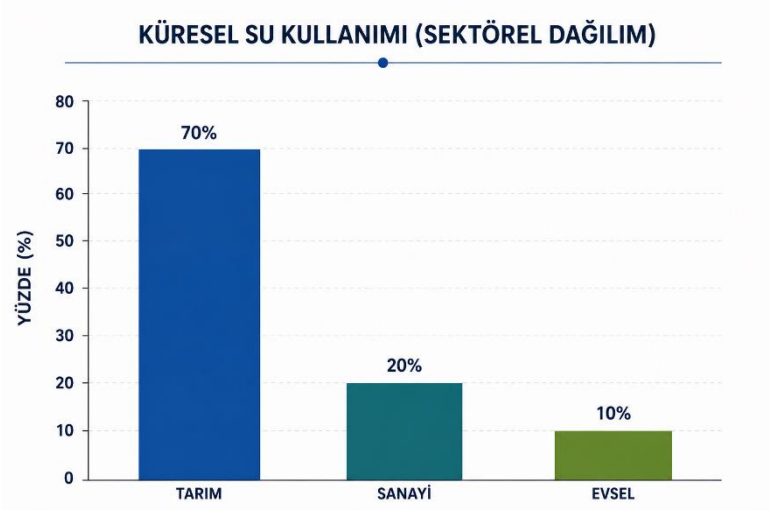
Küresel iklim değişikliği de su ayak izi tartışmalarını daha kritik hale getiren başlıca etkenlerden biridir. Yağış rejimlerindeki değişim, kuraklık sıklığının artması, sıcaklık artışına bağlı evapotranspirasyon kayıpları ve su kalitesindeki bozulmalar, hem mavi hem de yeşil su ayak izini doğrudan etkilemektedir. Özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde üretim sistemlerinin suya bağımlılığı arttıkça, su ayak izinin sürdürülebilirliği daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, su ayak izi yaklaşımı yalnızca mevcut kullanımın tanımlanması için değil, aynı zamanda gelecekteki su risklerinin öngörülmesi için de değerli bir araçtır.

Küresel su ayak izi analizleri aynı zamanda suyun kalite boyutunu da gündeme getirmektedir. Uzun yıllar boyunca su yönetimi çoğunlukla miktar temelli değerlendirmelere dayanmış olsa da, günümüzde su kirliliğinin de en az miktar kadar önemli olduğu kabul edilmektedir. Gri su ayak izi, belirli bir kirletici yükün çevresel kabul sınırlarına seyreltilmesi için gereken su miktarını ifade ederek, üretim süreçlerinin su kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır (Chapagain and Hoekstra, 2006). Tarımsal gübre kullanımı, pestisitler, endüstriyel deşarjlar ve evsel atık sular, küresel ölçekte gri su ayak izini artıran başlıca unsurlardır. Bu nedenle güncel su ayak izi yaklaşımı, suyun yalnızca ne kadar kullanıldığını değil, kullanım sonucunda ne ölçüde kirletildiğini de birlikte değerlendirmektedir.

Küresel düzeyde yapılan çalışmalar, su ayak izinin mekânsal ve zamansal açıdan heterojen bir yapı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Aynı ürünün su ayak

izi, üretildiği bölgenin iklim koşullarına, toprak özelliklerine, sulama tekniğine, verim düzeyine ve yönetim uygulamalarına bağlı olarak ciddi farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, yağışa dayalı üretim sistemlerinde yeşil su ayak izi baskın olabilirken, sulamaya bağımlı sistemlerde mavi su ayak izi daha belirgin hale gelmektedir. Benzer şekilde, yoğun gübre kullanımının olduğu tarımsal alanlarda gri su ayak izi daha yüksek olmaktadır. Bu durum, su ayak izi sonuçlarının yalnızca küresel ortalamalar üzerinden değil, bölgesel ve ürün bazlı ayrıntılı analizlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, küresel su ayak izi yaklaşımı, su kaynaklarının günümüz dünyasında nasıl kullanıldığını, hangi sektörler ve tüketim kalıpları tarafından yönlendirildiğini ve uluslararası ticaret yoluyla nasıl yeniden dağıtıldığını anlamak açısından son derece önemli bir çerçeve sunmaktadır. Artan nüfus, değişen iklim koşulları ve yükselen tüketim düzeyi dikkate alındığında, su ayak izi kavramı gelecekte su güvenliği, gıda güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik politikalarının merkezinde yer almaya devam edecektir. Bu nedenle su ayak izinin küresel ölçekte anlaşılması, yalnızca su yönetimi için değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından da temel bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir**.**



Şekil 2. Küresel Su kullanımı (Sektörel Dağılım)

4. TÜRKİYE'DE SU AYAK İZİ VE SEKTÖREL YAPI

Türkiye, coğrafi konumu ve iklim özellikleri itibarıyla yarı kurak iklim kuşağında yer almakta olup, su kaynakları açısından sınırlı bir potansiyele sahiptir. Ülkenin yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 574 mm civarında olup, bu değer dünya ortalamasının altında kalmaktadır. Türkiye'nin toplam kullanılabilir su potansiyelinin yaklaşık 112 milyar m³ olduğu hesaplanmakta, ancak artan nüfus ve ekonomik faaliyetler nedeniyle kişi başına düşen yıllık su miktarı giderek azalmaktadır (DSİ, 2021). Günümüzde kişi başına düşen su miktarının yaklaşık 1300–1500 m³ seviyesinde olması, Türkiye'nin su zengini bir ülke olmadığını, aksine su stresi yaşayan ülkeler arasında yer aldığını göstermektedir.

Türkiye'de su ayak izi incelendiğinde, toplam su kullanımının büyük ölçüde tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı görülmektedir. Yapılan çalışmalara göre, ülkenin toplam su ayak izinin yaklaşık %70–75'i tarım sektörüne aittir (WWF-Türkiye, 2014). Bu durum, Türkiye ekonomisinde tarımın önemli bir yer tutmasının yanı sıra, sulama tekniklerinin verimliliği ve ürün deseninin su kullanımı üzerindeki belirleyici etkisini de ortaya koymaktadır**.**

4.1. Tarım Sektörü ve Su Ayak İzi

Türkiye'de su ayak izinin en büyük bileşeni tarım sektörüdür. Tarımsal üretimde kullanılan suyun önemli bir kısmı sulama faaliyetlerinden kaynaklanmakta olup, özellikle mavi su ayak izi bu sektörde belirgin şekilde öne çıkmaktadır. Geleneksel sulama yöntemlerinin (vahşi sulama) yaygın olarak kullanılması, su kayıplarını artırmakta ve su verimliliğini düşürmektedir. Bu durum, mevcut su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Türkiye'de su ayak izi yüksek olan başlıca tarım ürünleri arasında pamuk, pirinç, mısır ve şeker pancarı gibi yoğun su tüketimi gerektiren ürünler yer almaktadır. Özellikle pamuk üretimi, hem mavi su kullanımı hem de sulama gereksinimi nedeniyle dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra tahıllar, yem bitkileri ve meyve üretimi de toplam tarımsal su ayak izine önemli katkı sağlamaktadır.

Tarımsal faaliyetlerin su kalitesi üzerindeki etkisi de göz ardı edilmemelidir. Gübre ve pestisit kullanımı, özellikle nitrat ve fosfat yüklerini artırarak su kaynaklarında kirliliğe yol açmakta ve gri su ayak izinin yükselmesine neden olmaktadır. Bu durum, yalnızca su miktarını değil, aynı zamanda su kalitesini de tehdit eden önemli bir unsurdur.

4.2. Sanayi Sektörü ve Su Kullanımı

Türkiye'de sanayi sektörünün toplam su ayak izi içerisindeki payı tarıma kıyasla daha düşük olmakla birlikte, özellikle su kalitesi açısından önemli etkiler yaratmaktadır. Tekstil, deri, kimya ve gıda sanayileri su yoğun sektörler arasında yer almakta olup, bu sektörlerde kullanılan su miktarı ve oluşan atık su miktarı dikkat çekicidir.

Sanayi faaliyetleri sonucunda oluşan atık suların yeterli arıtma işlemlerinden geçirilmeden alıcı ortamlara deşarj edilmesi, su kaynaklarında ciddi kalite sorunlarına yol açmaktadır. Bu durum, gri su ayak izinin artmasına neden olmakta ve su ekosistemleri üzerinde baskı oluşturmaktadır. Dolayısıyla sanayi sektöründe su verimliliğinin artırılması ve atık su yönetiminin iyileştirilmesi, sürdürülebilir su yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır.

4.3. Evsel Su Kullanımı

Evsel su kullanımı, Türkiye'de toplam su ayak izinin daha küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Ancak nüfus artışı, kentleşme ve yaşam standartlarının yükselmesi, evsel su tüketiminin giderek artmasına neden olmaktadır. İçme, temizlik, hijyen ve günlük kullanım ihtiyaçları için tüketilen su miktarı, özellikle büyük şehirlerde önemli seviyelere ulaşmaktadır.

Evsel atık suların yönetimi de su kalitesi açısından kritik bir konudur. Arıtılmadan doğaya bırakılan evsel atık sular, su kaynaklarında organik yükün artmasına ve ekosistemlerin zarar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, evsel su kullanımında tasarrufun teşvik edilmesi ve atık su arıtma altyapısının güçlendirilmesi gerekmektedir.

4.4. Türkiye'de Su Ayak İzinin Yapısal Özellikleri

Türkiye'nin su ayak izi yapısı incelendiğinde, ülkenin su kullanımının büyük ölçüde iç kaynaklara dayandığı görülmektedir. Bu durum, Türkiye'nin su ayak izinin büyük kısmının "iç su ayak izi" olduğunu göstermektedir. Yani Türkiye'de tüketilen ürünlerin büyük bir bölümü ülke içerisinde üretilmekte ve bu üretim sürecinde kullanılan su, yerel su kaynaklarından karşılanmaktadır.

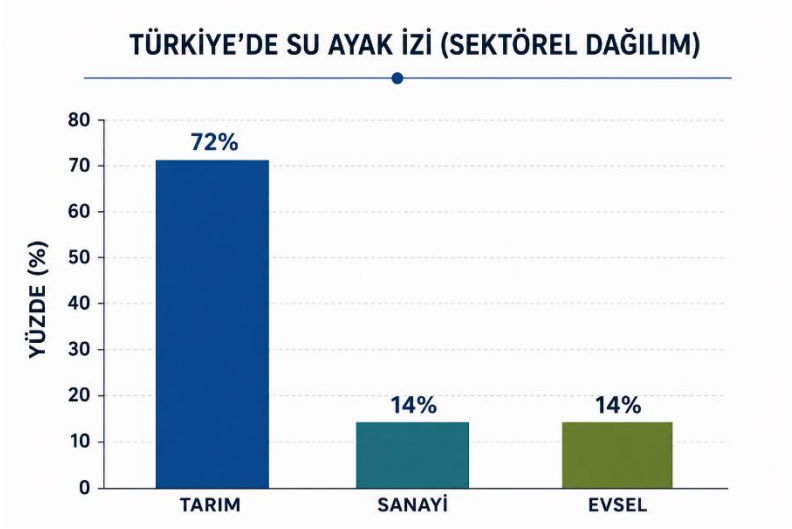
Bununla birlikte, Türkiye'nin uluslararası ticarette yer alan bazı ürünleri ithal etmesi, dolaylı olarak su tasarrufu sağlamasına katkıda bulunmaktadır. Özellikle su yoğun ürünlerin ithalatı, ülke içindeki su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltabilmektedir. Ancak ihracata yönelik üretim faaliyetleri, özellikle su yoğun ürünlerde, su ayak izinin artmasına neden olabilmektedir.

4.5. Bölgesel Farklılıklar

Türkiye'de su ayak izi bölgesel olarak önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, iklim koşulları, su kaynaklarının dağılımı, tarımsal üretim yapısı ve ekonomik faaliyetlere bağlı olarak değişmektedir.

- İç Anadolu Bölgesi: Kuraklık riski yüksek, yeraltı suyu kullanımı yoğun
- Güneydoğu Anadolu Bölgesi: Sulama faaliyetleri yaygın (GAP etkisi)
- Doğu Anadolu Bölgesi: Su potansiyeli yüksek, ancak iklim değişikliği etkisi artıyor
- Ege ve Akdeniz Bölgeleri: Tarımsal üretim yoğun, su talebi yüksek

Bu bölgesel farklılıklar, su yönetimi politikalarının havza bazlı olarak planlanması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3. Türkiye'de su ayak izinin sektörel dağılımı. ***Kaynak: WWF-Türkiye (2014).***

5. SU AYAK İZİ VE SU KALİTESİ İLİŞKİSİ

Su ayak izi kavramı, başlangıçta suyun miktarsal kullanımını değerlendiren bir yaklaşım olarak geliştirilmiş olsa da, zaman içerisinde su kalitesini de kapsayan bütüncül bir çerçeveye dönüşmüştür. Özellikle su kaynaklarının yalnızca tüketim miktarı açısından değil, aynı zamanda kirlilik yükü bakımından da değerlendirilmesi gerekliliği, su ayak izi analizlerinin kapsamını genişletmiştir. Bu bağlamda, su ayak izinin üçüncü bileşeni olan gri su ayak izi, su kalitesi ile doğrudan ilişkili en önemli göstergelerden biri olarak öne çıkmaktadır.

Gri su ayak izi, belirli bir kirletici yükün, alıcı ortamda kabul edilebilir çevresel kalite standartlarını aşmayacak şekilde seyreltilmesi için gerekli olan su

miktarını ifade etmektedir (Chapagain & Hoekstra, 2006). Bu yaklaşım, kirleticilerin su ortamındaki etkilerini dolaylı olarak ölçmeye olanak sağlamakta ve üretim süreçlerinin su kalitesi üzerindeki baskısını nicel olarak ortaya koymaktadır. Dolayısıyla gri su ayak izi, suyun sadece ne kadar kullanıldığını değil, aynı zamanda kullanım sonucunda ne ölçüde kirletildiğini de değerlendiren kritik bir parametredir.

Su kalitesini etkileyen başlıca kirleticiler arasında besin elementleri (nitrat, nitrit, amonyum ve fosfat), organik maddeler, ağır metaller ve çeşitli kimyasal bileşikler yer almaktadır. Özellikle tarımsal faaliyetlerde yoğun olarak kullanılan azot ve fosfor içerikli gübreler, yüzey ve yeraltı sularında besin tuzu birikimine neden olarak ötrofikasyon riskini artırmaktadır. Ötrofikasyon süreci, sucul ekosistemlerde alg patlamalarına, çözünmüş oksijen seviyelerinde azalmaya ve biyolojik çeşitlilikte gerilemeye yol açmaktadır. Bu durum, gri su ayak izinin yükselmesine neden olan en önemli faktörlerden biridir.

Sanayi kaynaklı kirleticiler ise su kalitesi üzerinde daha karmaşık ve uzun vadeli etkiler yaratmaktadır. Özellikle tekstil, metal işleme, madencilik ve kimya sanayilerinden kaynaklanan ağır metaller (Pb, Cd, Cr, Hg gibi) sucul ortamlarda birikerek hem ekosistem sağlığını hem de insan sağlığını tehdit etmektedir. Ağır metallerin biyobirikim ve biyobüyütme özellikleri, bu kirleticilerin besin zinciri boyunca taşınmasına ve toksik etkilerin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ağır metal kirliliği, gri su ayak izi kapsamında değerlendirilmesi gereken kritik bir parametredir.

Evsel atık sular da su kalitesini etkileyen önemli bir kirlilik kaynağıdır. Arıtılmadan veya yetersiz arıtılarak alıcı ortamlara verilen evsel atık sular, yüksek organik madde içeriği nedeniyle biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOD) artırmakta ve çözünmüş oksijen seviyelerinde düşüşe yol açmaktadır. Bu durum, sucul canlılar için olumsuz koşullar oluşturmakta ve ekosistem dengesini bozabilmektedir. Ayrıca evsel kaynaklı deterjanlar ve temizlik ürünleri, su ortamında kimyasal kirliliğe neden olarak gri su ayak izinin artmasına katkı sağlamaktadır.

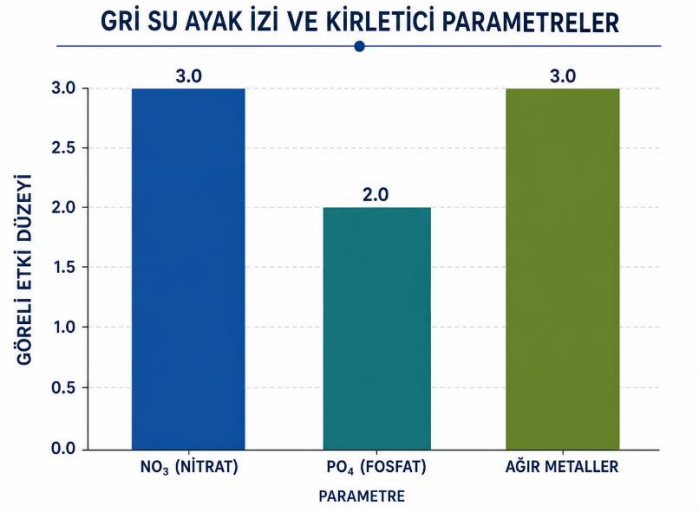
Su ayak izi ile su kalitesi arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için, bu kavramın diğer su kalite indeksleri ile birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle Su Kalite İndeksi (WQI), Ağır Metal Kirlilik İndeksi (HPI) ve Sağlık Risk İndeksleri (HQ, HI) gibi göstergeler, suyun hem kimyasal hem de ekolojik durumunu ortaya koymaktadır. Bu indekslerin su ayak izi ile birlikte kullanılması, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Su kalitesi ve su ayak izi arasındaki ilişki, aynı zamanda havza bazlı yönetim yaklaşımlarının önemini de ortaya koymaktadır. Çünkü su kaynaklarının

korunması yalnızca su miktarının azaltılması ile değil, aynı zamanda kirlilik yükünün kontrol altına alınması ile mümkündür. Bu nedenle entegre su yönetimi yaklaşımı kapsamında, suyun hem niceliksel hem de niteliksel özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, özellikle tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan besin tuzu yükleri ve sanayi kaynaklı ağır metal kirliliği, su kalitesi üzerinde önemli baskılar oluşturmaktadır. Bu durum, gri su ayak izinin artmasına ve su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin tehlikeye girmesine neden olmaktadır. Bu nedenle Türkiye'de su ayak izi çalışmalarının, su kalitesi parametreleri ile entegre bir şekilde yürütülmesi büyük önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, su ayak izi ile su kalitesi arasındaki ilişki, su yönetimi politikalarının geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilirliği yalnızca su tüketiminin azaltılması ile değil, aynı zamanda su kirliliğinin önlenmesi ile mümkündür. Bu bağlamda gri su ayak izi, suyun kalite boyutunu değerlendiren önemli bir araç olarak, gelecekte su yönetimi çalışmalarında daha fazla önem kazanacaktır.



Şekil 4. Gri su ayak izi ile başlıca kirleticiler arasındaki ilişki.

6. SÜRDÜRÜLEBİLİR SU YÖNETİMİ VE SU AYAK İZİ YAKLAŞIMI

Artan nüfus, iklim değişikliği, kentleşme ve ekonomik faaliyetlerin yoğunlaşması, su kaynakları üzerindeki baskıyı giderek artırmakta ve mevcut su yönetimi yaklaşımlarının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Geleneksel su yönetimi anlayışı, çoğunlukla suyun arzına odaklanırken, günümüzde sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda suyun talep yönetimi, verimli kullanımı ve kalite boyutunun birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu noktada su

ayak izi yaklaşımı, su kaynaklarının daha etkin ve bütüncül bir şekilde yönetilmesine katkı sağlayan önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Su ayak izi, su kullanımının sektörel ve mekânsal dağılımını ortaya koyarak, hangi faaliyetlerin su kaynakları üzerinde daha fazla baskı oluşturduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır. Bu sayede, su yönetimi stratejileri daha hedef odaklı ve etkili bir şekilde geliştirilebilmektedir. Özellikle su kıtlığı riski taşıyan bölgelerde, su ayak izi analizleri, suyun hangi sektörlerde daha yoğun kullanıldığını ve hangi alanlarda tasarruf potansiyelinin bulunduğunu ortaya koyarak karar vericilere önemli bilgiler sunmaktadır.

6.1. Su Verimliliği ve Tarımsal Yönetim

Sürdürülebilir su yönetiminin en önemli bileşenlerinden biri, su verimliliğinin artırılmasıdır. Türkiye'de su kullanımının büyük bir bölümünün tarım sektörüne ait olduğu göz önüne alındığında, tarımsal sulama tekniklerinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Geleneksel sulama yöntemleri yerine damla sulama ve yağmurlama sistemlerinin kullanılması, su kayıplarını önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Ayrıca ürün deseninin su kaynaklarına uygun şekilde planlanması, su ayak izinin azaltılmasında etkili bir stratejidir. Su yoğun ürünlerin su stresi yüksek bölgelerde yetiştirilmesi, su kaynakları üzerinde ciddi baskı oluşturmakta; bu nedenle bölgesel su potansiyeline uygun üretim planlaması yapılması gerekmektedir.

6.2. Sanayi ve Su Yönetimi

Sanayi sektöründe su ayak izinin azaltılması, hem su tasarrufu hem de su kalitesinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Su yoğun sanayi kollarında kapalı devre su kullanım sistemlerinin uygulanması, atık suyun geri kazanımı ve yeniden kullanımı, su tüketimini önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Ayrıca endüstriyel atık suların etkin bir şekilde arıtılması, gri su ayak izinin azaltılmasında temel bir gerekliliktir. Bu kapsamda ileri arıtma teknolojilerinin kullanılması ve deşarj standartlarının sıkı bir şekilde uygulanması gerekmektedir.

6.3. Evsel Su Kullanımı ve Tasarruf

Evsel su kullanımı, toplam su ayak izi içerisinde daha düşük bir paya sahip olsa da, bireysel tüketim alışkanlıkları açısından önemli bir rol oynamaktadır. Su tasarrufu sağlayan teknolojilerin kullanımı, bilinçli tüketim alışkanlıklarının geliştirilmesi ve suyun gereksiz kullanımının önlenmesi, su ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Ayrıca şehirlerde yağmur suyu hasadı ve gri suyun yeniden kullanımı gibi uygulamalar, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımına destek olmaktadır.

6.4. Havza Bazlı Su Yönetimi

Sürdürülebilir su yönetimi, yalnızca sektörel değil, aynı zamanda mekânsal bir yaklaşımı da gerektirmektedir. Bu nedenle havza bazlı su yönetimi anlayışı, su kaynaklarının korunması ve etkin kullanımı açısından büyük önem taşımaktadır.

Havza bazlı yönetim, suyun kaynağından kullanım noktasına kadar olan tüm süreçlerin birlikte değerlendirilmesini sağlayarak, su kaynakları üzerindeki baskıların daha etkin bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, su ayak izi analizleri ile entegre edildiğinde, su yönetimi politikalarının daha bilimsel ve sürdürülebilir bir temele oturtulmasını sağlamaktadır.

6.5. Politika ve Yönetim Stratejileri

Su ayak izi yaklaşımı, su yönetimi politikalarının geliştirilmesinde önemli bir karar destek aracı olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda:

- Su verimliliği politikalarının geliştirilmesi
- Su fiyatlandırma sistemlerinin düzenlenmesi
- Su tasarrufu teşviklerinin artırılması
- Atık su geri kazanımının yaygınlaştırılması

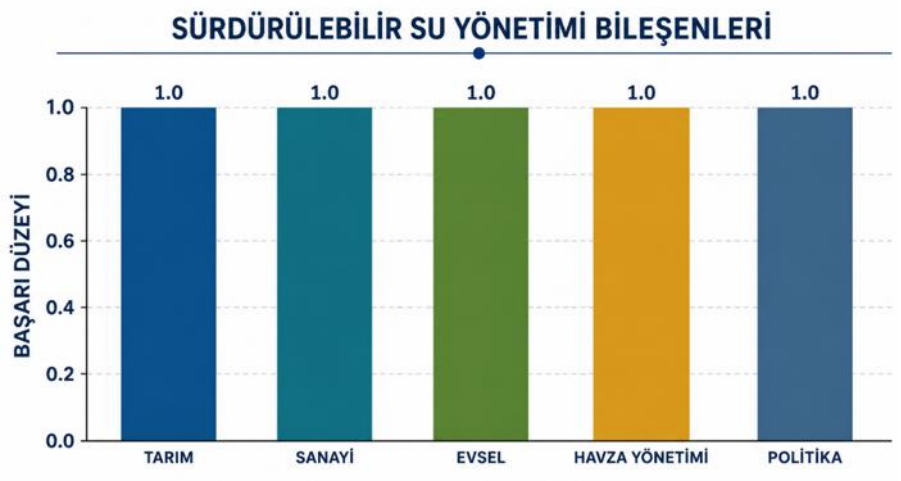
gibi stratejiler ön plana çıkmaktadır.

Ayrıca ulusal ve uluslararası düzeyde su yönetimi politikalarının uyumlu hale getirilmesi, su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından önem taşımaktadır.

6.6. İklim Değişikliği ve Su Yönetimi

İklim değişikliği, su kaynaklarının miktarını ve kalitesini doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Yağış rejimindeki değişiklikler, kuraklık sıklığının artması ve su kaynaklarının azalması, su yönetimini daha da kritik hale getirmektedir.

Bu nedenle su ayak izi yaklaşımı, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesinde de kullanılabilecek önemli bir araçtır. Su kullanımının azaltılması, alternatif su kaynaklarının değerlendirilmesi ve suyun daha verimli kullanılması, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 5. Sürdürülebilir su yönetiminin temel bileşenleri.

7. TARTIŞMA

Bu çalışmada ele alınan su ayak izi yaklaşımı, su kaynaklarının yalnızca niceliksel kullanımı ile sınırlı olmayan, aynı zamanda su kalitesi, ekosistem sağlığı ve sürdürülebilirlik boyutlarını da kapsayan bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Elde edilen bulgular, hem küresel ölçekte hem de Türkiye özelinde su kullanımının büyük ölçüde tarım sektörüne bağlı olduğunu ve bu durumun su kaynakları üzerindeki baskıyı artırdığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, literatürde yer alan birçok çalışma ile uyumlu olup, tarımsal faaliyetlerin su ayak izi içerisindeki baskın rolünü doğrulamaktadır (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Küresel ölçekte değerlendirildiğinde, su ayak izinin yalnızca üretim temelli bir kavram olmadığı, aynı zamanda tüketim alışkanlıkları ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerde yüksek et tüketimi ve su yoğun ürünlere olan talep, kişi başına düşen su ayak izinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, su yönetimi stratejilerinin yalnızca üretim süreçlerine odaklanmakla kalmayıp, aynı zamanda tüketim davranışlarını da kapsaması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla su ayak izi yaklaşımı, bireysel ve toplumsal farkındalık oluşturma açısından da önemli bir araç olarak değerlendirilebilir.

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde ise, su ayak izinin büyük ölçüde tarım sektörüne bağlı olması, su yönetimi politikalarının bu alanda yoğunlaştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Geleneksel sulama yöntemlerinin yaygın olması, su kullanım verimliliğini düşürmekte ve özellikle mavi su ayak izinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından önemli

bir risk oluşturmaktadır. Tarımsal üretimde su verimliliğinin artırılması, hem su ayak izinin azaltılması hem de su kaynaklarının korunması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Su ayak izi ile su kalitesi arasındaki ilişki incelendiğinde, özellikle gri su ayak izinin su kirliliğini yansıtan önemli bir gösterge olduğu görülmektedir. Tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan besin tuzu yükleri (NO_3^-, PO_4^{3-}) ve sanayi kaynaklı ağır metal kirliliği (Pb, Cd, Cr gibi), su kalitesi üzerinde önemli baskılar oluşturmaktadır. Bu kirleticiler, yalnızca suyun kimyasal yapısını değiştirmekle kalmayıp, aynı zamanda sucul ekosistemlerde biyolojik süreçleri de etkilemektedir. Özellikle epilithik alg toplulukları, su kalitesindeki değişimlere duyarlı oldukları için, bu tür kirliliklerin biyolojik göstergeleri olarak değerlendirilebilmektedir. Bu bağlamda, su ayak izi çalışmalarının biyolojik izleme verileri ile desteklenmesi, daha kapsamlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Ağır metal kirliliği, su ayak izi yaklaşımı içerisinde daha fazla dikkate alınması gereken bir diğer önemli konudur. Özellikle krom (Cr), kurşun (Pb) ve kadmiyum (Cd) gibi toksik metaller, sucul ortamlarda birikerek hem ekosistem sağlığını hem de insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu metallerin biyobirikim özellikleri, besin zinciri boyunca taşınarak daha yüksek trofik seviyelerde daha yüksek konsantrasyonlara ulaşmasına neden olmaktadır. Bu durum, su ayak izi analizlerinin yalnızca su miktarına değil, aynı zamanda kirleticilerin çevresel ve sağlık risklerine de odaklanması gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda, su ayak izi yaklaşımının sağlık risk değerlendirme yöntemleri (HQ, HI) ile entegre edilmesi, daha kapsamlı bir analiz yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Sanal su ticareti açısından değerlendirildiğinde, Türkiye'nin su yoğun ürünleri ithal etmesi, ülke içindeki su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltabilecek bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Ancak su yoğun ürünlerin ihracatı, özellikle su stresi yüksek bölgelerde su kaynakları üzerinde ek baskı oluşturabilmektedir. Bu nedenle dış ticaret politikalarının da su ayak izi perspektifinden değerlendirilmesi gerekmektedir.

İklim değişikliğinin etkileri de su ayak izi tartışmalarını daha kritik hale getirmektedir. Yağış rejimlerindeki düzensizlikler, kuraklık sıklığındaki artış ve sıcaklık yükselmesi, su kaynaklarının miktarını ve kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu durum, özellikle yarı kurak bölgelerde su ayak izinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir. Bu nedenle su ayak izi yaklaşımı, iklim değişikliğine uyum stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir araç olarak kullanılabilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada ortaya konulan bulgular, su ayak izi yaklaşımının su yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve politika geliştirme süreçlerinde önemli

bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak mevcut çalışmaların çoğunlukla makro ölçekte yapılmış olması, havza bazlı ve yerel ölçekli çalışmaların artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca su ayak izi analizlerinin su kalitesi parametreleri, biyolojik göstergeler ve sağlık risk değerlendirmeleri ile birlikte ele alınması, daha bütüncül ve etkili sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

8. SONUÇ

Bu çalışmada su ayak izi kavramı, kavramsal çerçevesi, bileşenleri ve küresel ile Türkiye ölçeğindeki uygulamaları açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, su kaynaklarının yalnızca miktarsal açıdan değil, aynı zamanda kalite boyutu ile birlikte ele alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Su ayak izi yaklaşımı, suyun doğrudan ve dolaylı kullanımını bütüncül bir şekilde değerlendirmesi açısından, sürdürülebilir su yönetimi için önemli bir araçtır.

Küresel ölçekte su kullanımının büyük ölçüde tarım sektörüne bağlı olduğu ve tüketim alışkanlıklarının su ayak izini doğrudan etkilediği belirlenmiştir. Türkiye özelinde ise su ayak izinin önemli bir bölümünün tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı ve geleneksel sulama yöntemlerinin su verimliliğini olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu durum, su yönetimi politikalarının özellikle tarım sektörü üzerine yoğunlaştırılması gerektiğini göstermektedir.

Su ayak izi ile su kalitesi arasındaki ilişki değerlendirildiğinde, gri su ayak izinin su kirliliğini yansıtan önemli bir gösterge olduğu anlaşılmaktadır. Besin tuzları ve ağır metaller gibi kirleticiler, su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturarak hem ekosistem sağlığını hem de insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu nedenle su ayak izi analizlerinin, su kalite indeksleri ve sağlık risk değerlendirme yöntemleri ile birlikte ele alınması gerekmektedir.

Sürdürülebilir su yönetimi açısından değerlendirildiğinde, su verimliliğinin artırılması, atık suyun geri kazanımı, havza bazlı yönetim yaklaşımlarının benimsenmesi ve su politikalarının güçlendirilmesi ön plana çıkmaktadır. Ayrıca sanal su ticareti ve tüketim alışkanlıklarının su kaynakları üzerindeki etkileri dikkate alınarak, daha bilinçli üretim ve tüketim modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

İklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, su ayak izi yaklaşımı gelecekte su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde daha da önemli bir rol oynayacaktır. Bu kapsamda, su ayak izi çalışmalarının yerel ve havza bazlı ölçeklerde artırılması, biyolojik göstergeler ve su kalitesi parametreleri ile entegre edilmesi ve karar vericiler için uygulanabilir politika önerileri sunması gerekmektedir.

Sonuç olarak, su ayak izi yaklaşımı, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, çevresel koruma ve insan sağlığının güvence altına alınması açısından güçlü ve bütüncül bir değerlendirme aracı olarak öne çıkmaktadır. Türkiye'de ve dünyada artan su stresi dikkate alındığında, bu yaklaşımın daha yaygın şekilde kullanılması ve su yönetimi politikalarına entegre edilmesi kaçınılmaz bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Allan, J. A. (1998). Virtual water: A strategic resource. Ground Water, 36(4), 545–546.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. (2006). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resources Management, 21(1), 35–48.

Devlet Su İşleri (DSİ). (2021). Türkiye su kaynakları ve su potansiyeli raporu. Ankara: DSİ Yayınları.

Eurostat. (2022). Water statistics. https://ec.europa.eu/eurostat

FAO. (2020). Water use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022). AQUASTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Falkenmark, M. (1989). The massive water scarcity now threatening Africa. Ambio, 18(2), 112–118.

Gleick, P. H. (2003). Global freshwater resources: Soft-path solutions for the 21st century. Science, 302(5650), 1524–1528.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., ve Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.

Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press.

Kretschmer, N., Ribbe, L., Gaese, H. (2006). Wastewater reuse for agriculture. Technology Resource Management and Development, 3, 37–64.

Mekonnen, M. M., ve Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. UNESCO-IHE.

Metcalf ve Eddy. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Nagajyoti, P. C., Lee, K. D., Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. Environmental Chemistry Letters, 8(3), 199–216.

OECD. (2019). Water and industry: Policy challenges and opportunities. Organisation for Economic Co-operation and Development.

Postel, S. (2000). Entering an era of water scarcity. Ecological Applications, 10(4), 941–948.

Sharma, R. K., Agrawal, M. (2005). Biological effects of heavy metals: An overview. Journal of Environmental Biology, 26(2), 301–313.

Smith, V. H., Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: Where do we go from here? Trends in Ecology and Evolution, 24(4), 201–207.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., ve Stensel, H. D. (2003). Wastewater engineering: Treatment and reuse (4th ed.). McGraw-Hill.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2023). Nüfus ve çevre istatistikleri. Ankara: TÜİK Yayınları.

UN DESA. (2022). World population prospects 2022. United Nations Department of Economic and Social Affairs.

UNESCO. (2020). United Nations World Water Development Report 2020: Water and climate change. UNESCO.

UN Water. (2023). World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. United Nations.

USGS. (2023). Distribution of Earth's water resources. U.S. Geological Survey.

WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). World Health Organization.

WWF-Türkiye. (2014). Türkiye su ayak izi raporu. İstanbul: WWF-Türkiye Yayınları.

Wuana, R. A., Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: A review. ISRN Ecology, 2011, 1–20.

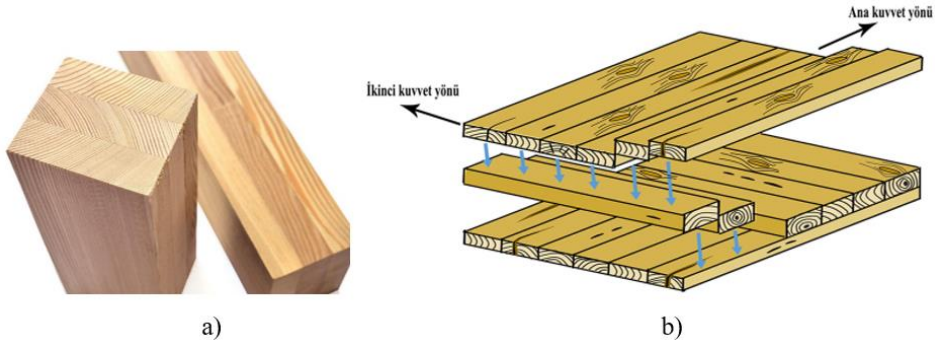
3. Bölüm

Yoğunlaştırılmış Ahşap Kavelaların Üretimi ve Yapısal Kullanım Alanları

Oğuzhan YÜKSEL[1], Hüseyin PELİT[2]

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe karbon salınımlarının azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin güçlendirilmesi amacıyla ahşap esaslı mühendislik ürünlerine (engineered wood products (EWPs)) olan ilgi son on yılda kayda değer biçimde artmıştır. Glulam ve CLT başta olmak üzere bu ürünler (Şekil 1); yüksek mukavemet/ağırlık oranları, karbon depolama olanakları ve yenilenebilir hammadde kaynakları sayesinde beton ve çeliğe stratejik bir alternatif olarak konumlanmaktadır. Bununla birlikte, bazı yapıştırıcı sistemlerinin emisyonları ve yapıştırılmış elemanların söküm güçlüğü, üretim ve kullanım sonu aşamalarında dikkate alınmalıdır (Sotayo vd., 2020). Bu sınırlılıklar, tutkal ve metal bağlantı elemanı kullanılmayan, tamamen ahşap esaslı yapı sistemlerine yönelik çalışmalar konusunda araştırmacıların ilgisini çekmektedir.



Şekil 1. (a) Glulam (Url1), (b) Çapraz Lamine Kereste (CLT) (Url2)

Ahşap kavela (wooden dowel) kullanımına dayanan birleştirme sistemleri, tarihi kökleri olan bir çözüm olmakla birlikte endüstriyel ölçekte

[1] Öğr. Gör., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, İç Mekan Tasarımı Programı, Bolu, Türkiye, ORCID: 0000-0003-0220-7729
[2] Prof. Dr., Düzce Üniversitesi, Orman Fakültesi, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye, ORCID: 0000-0002-5706-473X

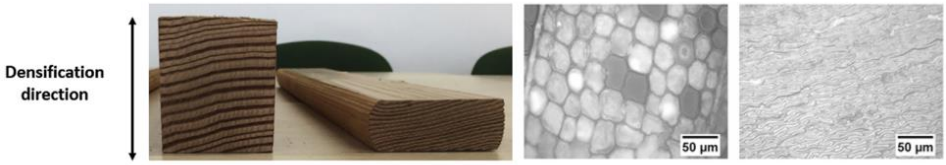
uygulanabilirliği uzun süre sınırlı kalmıştır. Bu sistemlerde delik toleransı, kavela ve ana elemanın nem içerikleri ile yük altında gelişen kayma, bağlantı sıkılığını ve rijitliğini etkiler. Geleneksel sert odun kavelaların davranışı bu değişkenlerle birlikte değerlendirilmelidir (Sotayo vd., 2020). Son yıllarda geliştirilen yoğunlaştırılmış ahşap kavela (densified wood dowel) teknolojisi, kavela malzemesinin özelliklerini ve montaj sonrasındaki temas koşullarını değiştirmeye yönelik bir yaklaşım sunmaktadır (Şekil 2).



a) b)

Şekil 2. (a) Doğal Ahşap Kavela (Url3), (b) Yoğunlaştırılmış Ahşap Kavela (Guan vd., 2018)

Termo-mekanik ya da termo-hidro-mekanik işlemlerle sıkıştırılan ahşap, tür ve işlem koşullarına bağlı olarak başlangıç yoğunluğunun iki ila üç katına ulaşabilmektedir. Yoğunluk artışına eşlik eden mekanik değişimler ise yükleme yönüne ve incelenen özelliğe göre farklılaşmaktadır (Sandberg vd., 2012; Luan vd., 2022) (Şekil 3).

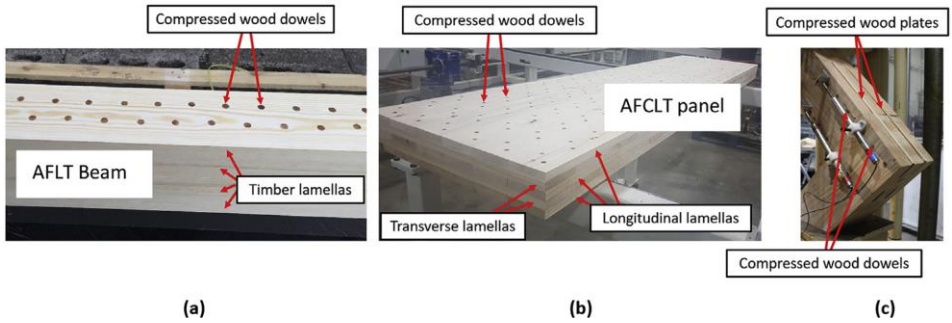


(a) (b) (c) (d)

Şekil 3. (a) Yoğunlaştırılmamış, (b) Yoğunlaştırılmış Ahşap Malzemenin Görünümü ve (c) Yoğunlaştırılmamış, (d) Yoğunlaştırılmış Ahşap Malzemenin Optik Mikroskop Görüntüleri (Sotayo vd., 2020).

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelalar, nemle etkinleşen şekil geri kazanımı ve higroskopik şişme sayesinde kavela deliğinde daha sıkı temas oluşturabilir. Ancak bu etkinin büyüklüğü ve sürekliliği, üretim koşullarına ve birleşimin nem geçmişine bağlıdır (Han vd., 2026). Şekil 4'te gösterilen kavelalı elemanlar, bu yaklaşımın lamine kiriş, çapraz tabakalı panel ve ahşap-ahşap birleşimlerdeki

kullanımını örneklemektedir. Bu çalışmada üretim yöntemleri, malzeme özellikleri ve yapısal uygulamalar birlikte ele alınmakta; yoğunlaştırılmış kavelalara ilişkin bulgular, doğal ahşap kavelalarla elde edilen karşılaştırmalı bilgilerden ayrılmaktadır.



Şekil 4. Kavelalı Yapısal Elemanlar: (a) Yapıştırıcı Kullanılmamış Lamine Ahşap Kiriş (b) Yapıştırıcı Kullanılmamış Çapraz Lamine Ahşap Panel (c) Ahşap-Ahşap Bağlantı (Sotayo vd., 2020).

2. KAPSAM VE TEMEL KAVRAMLAR

2.1. Kavela Türleri ve Üretim Geçmişi

Bir kavelanın yüksek yoğunluklu odun türünden üretilmiş olması, yoğunlaştırılmış kavela olduğu anlamına gelmez. Yoğunlaştırma, odunun hücresel yapısının basınç altında sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilen bir üretim işlemidir. Doğal masif kavelalar, yoğunlaştırılmış masif kavelalar ve kaplamaların reçineyle birleştirilip sıkıştırılmasıyla elde edilen lamine yoğunlaştırılmış kavelalar bu nedenle ayrı değerlendirilmelidir. Bu ayrım, hem mekanik özelliklerin hem de yapıştırıcısızlık iddialarının yorumlanması için gereklidir (Luan vd., 2022; Tomasi vd., 2025).

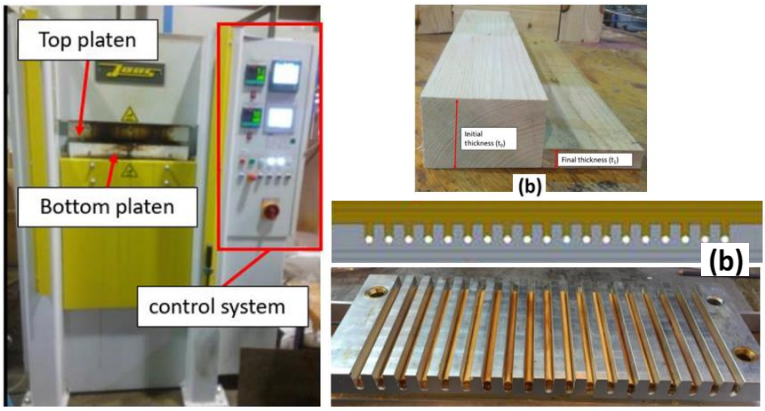
2.2. Bulguların Değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan kaynaklar, yoğunlaştırılmış kavelalara ilişkin doğrudan deneyler, doğal kavelalara ilişkin karşılaştırmalı çalışmalar ve üretim ya da mekanizma düzeyindeki destekleyici araştırmalar olarak ele alınmıştır. Malzeme dayanımı, tek birleşimin yük-kayma davranışı ve bütün yapı elemanının performansı farklı değerlendirme düzeyleridir. Çalışmalar arasında ağaç türü, geometri, sıkıştırma oranı, nem içeriği ve yükleme koşulları değiştiğinden, sayısal sonuçlar kendi kontrol grupları içinde yorumlanmıştır. Deneysel gözlemler ile sayısal model tahminleri de ayrı belirtilmiştir.

3. ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE YAPISAL UYGULAMALAR

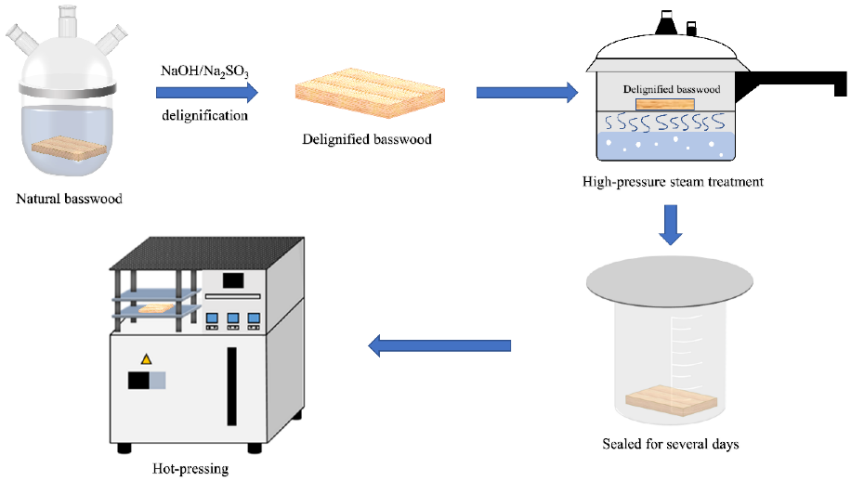
3.1. Yoğunlaştırma Yöntemleri ve Üretim Parametreleri

Literatür incelendiğinde, yoğunlaştırılmış ahşap malzemelerin üretiminde farklı yaklaşımlar benimsendiği görülmektedir. Yaygın kullanılan termo-mekanik (TM) ve termo-hidro-mekanik (THM) işlemlerde sıcaklık, nem ve basınç birlikte kontrol edilerek odun radyal ya da teğet yönde sıkıştırılır (Şekil 5). Basınç altında soğutma, pres açıldığında oluşan elastik geri esnemeyi sınırlayabilir; ancak nemle tetiklenen şekil geri kazanımını bütünüyle ortadan kaldırmaz. Sandberg vd. (2012) bu süreçlerin temel ilkelerini, Navi ve Heger (2004) ise yoğunlaştırma ile boyutsal kararlılık arasındaki ilişkiyi açıklamıştır. Seborg vd. (1953) tarafından yürütülen çalışmalar, ısıl işlemin boyutsal stabilizasyondaki rolüne ilişkin erken bulgular sunmaktadır. Laine vd. (2014), sarıçamın yüzey yoğunlaştırılmasında 100, 150 ve 200 °C sıcaklıkları farklı pres kapanma hızlarıyla birlikte incelemiş; hücresel deformasyonun kalınlık boyunca dağılımının bu iki parametreye bağlı olduğunu göstermiştir.



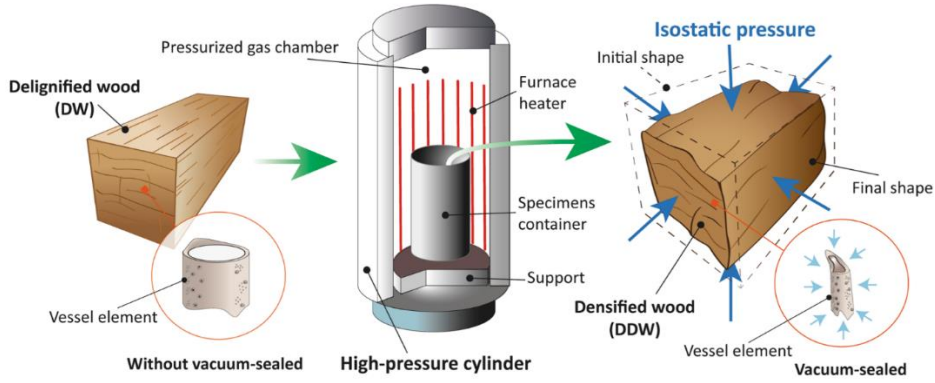
Şekil 5. (a) Termo-mekanik yoğunlaştırma presi ve (b) doğal ve sıkıştırılmış ahşap malzeme (El-Houjeyri vd., 2019), (c) sıkıştırılmış ahşap kavela üretim kalıbı (Guan vd., 2018).

Kimyasal ön işlem, yüksek basınçlı buhar ve sıcak preslemeyi birleştiren bir yaklaşımda (Şekil 6), ıhlamur (basswood) numunelerinin boyuna çekme dayanımı yaklaşık 420 MPa'ya ulaşmıştır. Bu değer, çalışmadaki doğal ıhlamur kontrolünün yaklaşık 6,5 katıdır (Huang vd., 2024). Sonuç, belirli işlem koşullarındaki malzeme numunelerine aittir, bu nedenle doğrudan kavela veya birleşim taşıma kapasitesi olarak değerlendirilemez.



Şekil 6. Kimyasal ön işlem, yüksek basınçlı buhar ve sıcak presleme ile yoğunlaştırılmış ahşap üretimi (Huang vd., 2024).

Xu vd. (2022b), alkali ön işlem uygulanan kavak odunundan yoğunlaştırılmış kavelalar üretmiş ve bunların ahşap-ahşap birleşimlerdeki mekanik davranışını incelemiştir. Çalışma, bu kavelaların çelik bağlantı elemanlarına alternatif olarak değerlendirilme potansiyelini göstermektedir. Maturana vd. (2023) ise kimyasal ön işlemi sıcak izostatik preslemeyle (hot isostatic pressing, HIP) birleştirerek yaklaşık 1,47 g/cm³ yoğunluğa ulaşmıştır (Şekil 7). Başlangıç hacminin yaklaşık %35'inin korunabildiği bu araştırma malzeme düzeyindedir, bu açıdan dairesel kavela kesitlerinin aynı yöntemle üretilebilirliği çalışmada doğrudan sınanmamıştır.



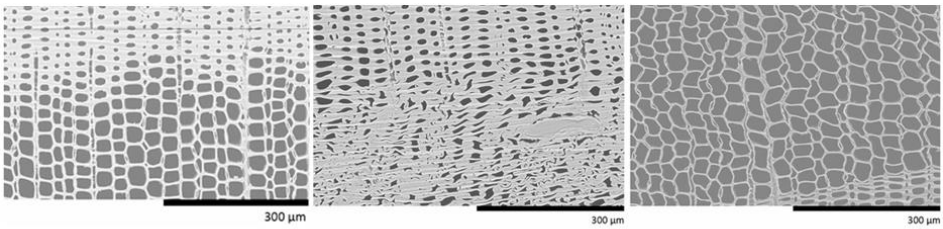
Şekil 7. Kimyasal Ön İşlem ve Ardından Uygulanan Sıcak İzostatik Presleme ile Yoğunlaştırma Sürecinin Aşamalarının Gösterimi (Maturana vd., 2023).

Yoğunlaştırma yöntemlerinin karşılaştırmalı özeti Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Yoğunlaştırma yöntemlerinin işlem özellikleri ve kullanım açısından değerlendirilmesi

Yöntem	İşlem	Yoğunluk ve sıkıştırma bilgisi	Kullanım açısından not
TM / THM	Sıcaklık, basınç ve nem kontrolüyle sıkıştırma	Tür, yön ve sıkıştırma oranına bağlıdır	Şekil geri kazanımı ve mekanik özellikler işlem koşullarıyla birlikte değerlendirilir (Luan vd., 2022).
Kimyasal ön işlem ve sıcak pres	Kısmi delignifikasyon, yüksek basınçlı buhar ve presleme	Başlangıç ve son yoğunluk ayrı raporlanmalıdır	420 MPa çekme dayanımı belirli ıhlamur numunelerine aittir; birleşim kapasitesi değildir (Huang vd., 2024).
Sıcak izostatik presleme	Kimyasal ön işlem sonrası argon basıncı altında yoğunlaştırma	Yaklaşık 1,47 g/cm³	Başlangıç hacminin yaklaşık %35'i korunmuştur; dairesel kavela üretimi doğrudan sınanmamıştır (Maturana vd., 2023).
Yarı izostatik sıkıştırma	Esnek basınç ortamıyla uygulanan sıkıştırma	Odun türü ve işlem düzeyine bağlıdır	Dayanım-yoğunluk ilişkisi yükleme yönüne göre değişir; tam izostatik işlemle eşdeğer değildir (Blomberg vd., 2005).

Yoğunlaştırma sonrasında, pres açılmasıyla oluşan elastik geri esneme (spring-back) ile nem etkisindeki şekil geri kazanımı (set-recovery) birbirinden farklıdır (Pelit ve Yorulmaz, 2024). İşlenmemiş (kontrol), yoğunlaştırılmış ve suda bekletme sonrası şekil geri kazanımı gösteren ahşap hücre yapısı Şekil 8'de gösterilmiştir. Grönquist vd. (2019), radyal yönde %40 sıkıştırılmış kayında doğal kayına göre daha yüksek şişme basıncı ölçmüş ve bu davranışın kontrollü nem döngülerinde sürdüğünü göstermiştir. Han vd. (2026), kayın ve kara kavakta sıkıştırma yönü ile su sıcaklığının geri kazanımı etkilediğini; daha fazla serbest genişlemenin her zaman daha yüksek şişme basıncı oluşturmadığını bildirmiştir. Li vd. (2013) ise dijital görüntü korelasyonu (DIC) kullanarak yoğunlaştırılmış balzam köknarının (*Abies balsamea* (L.) Mill.) radyal-teğet düzlemdeki elastik parametrelerini belirlemiştir.



Şekil 8. Ahşabın hücre kesit görüntüleri: (a) işlenmemiş kontrol, (b) yoğunlaştırılmış ve (c) ıslatma-kurutma sonrasında geri kazanım gösteren yapı (Laine vd., 2014).

3.2. Yoğunlaştırılmış Ahşap Kavelaların Mekanik Özellikleri

Yoğunlaştırılmış odunun mekanik davranışı, Namari vd. (2021) tarafından 720'yi aşkın malzeme deneyiyle incelenmiştir. Basınç, çekme, eğilme, gömülme, akma momenti, kesme ve darbe deneylerini içeren bu çalışma, bağlantı elemanı üretimi için geniş bir özellik veri tabanı sunmaktadır. Ancak, farklı geometri ve yükleme yönlerindeki malzeme sonuçları, silindirik kavelanın veya birleşimin performansına doğrudan eşitlenmemelidir. Tablo 2'de seçilmiş malzeme verileri, her araştırmanın kendi kontrolüyle birlikte verilmiştir.

Blomberg vd. (2005), sekiz odun türü üzerinde yoğunlaştırma ve yoğunluk arasındaki ilişkiyi incelemiş; aynı yoğunluktaki doğal odunla karşılaştırıldığında özellikle lif yönüne dik özelliklerin beklenen düzeye ulaşmayabildiğini göstermiştir. Khan vd. (2025), Tazmanya meşesi (Tasmanian oak) ve gül okaliptüsünden (Eucalyptus grandis) üretilen doğal sert odun kavelalarını eğilme, çekme ve basınç yüklemeleri altında test etmiş; silindirik geometri ve küçük boyutlar nedeniyle gerekli deney uyarlamalarını tartışmıştır. Aynı araştırma grubu (Khan vd., 2026), çift kesme düzlemli doğal sert odun kavela birleşimlerini incelemiş ve ahşap kavela hasarını dikkate alan modellerin tahmin doğruluğunu geliştirebildiğini göstermiştir. Bu çalışmalar, yoğunlaştırılmış kavela bulgularının yorumlanmasında karşılaştırmalı bir bilgi sağlamaktadır.

Seçilmiş malzeme özellikleri ve aynı çalışmadaki kontrol değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Seçilmiş yoğunlaştırılmış ahşap özelliklerinin kendi kontrol gruplarıyla karşılaştırılması

Özellik ve malzeme	Doğal kontrol	Yoğunlaştırılmış numune	Kaynak ve deney koşulu
Eğilme dayanımı Kayın (MPa)	212,5 ± 11,4	267,9 ± 45,1	%35 radyal sıkıştırma; dört noktalı eğilme, n = 9 (Han vd., 2026).
Eğilmede elastikiyet modülü Kayın (GPa)	15,0 ± 1,3	14,6 ± 2,7	Aynı radyal kontrol ve yoğunlaştırılmış grup (Han vd., 2026).
Boyuna çekme dayanımı Ihlamur (MPa)	Yaklaşık 65	Yaklaşık 420	Kimyasal ön işlem, yüksek basınçlı buhar ve sıcak pres; malzeme numuneleri (Huang vd., 2024).
Maksimum şişme basıncı Kayın (MPa)	2,56 ± 0,12	5,71 ± 0,29	%35 radyal sıkıştırma; sınırlanmış genişleme deneyi (Han vd., 2026).

3.3. Ahşap Kavelalı Lamine Kereste (DLT) Elemanlarındaki Uygulamalar

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelaların incelendiği başlıca yapısal sistemlerden biri kavelalı lamine ahşaptır (dowel laminated timber, DLT). El-Houjeyri vd. (2019), termo-mekanik yöntemle sıkıştırılmış ahşap kavelalarla birleştirilen yapıştırıcısız meşe kirişleri dört noktalı eğilme deneylerine tabi tutmuş ve yapıştırıcılı elemanlarla karşılaştırmıştır. Çalışma, bu yaklaşımın kiriş ve ahşap-ahşap birleşim üretimindeki uygulanabilirliğini göstermektedir. Bui vd. (2020) ise deneysel modal analizlerle doğrulanan sonlu eleman modelini 4,5 × 5,5 m boyutlu bir döşemeye uygulamış; seçilen tasarım ve sınır koşullarında Eurocode 5 titreşim ölçütlerinin karşılanabildiğini öngörmüştür.

Fu vd., (2025a) hızlı büyüyen doğu Sibirya karaçamı (larch, Larix gmelinii) türünden üretilen LVL lamelleri, ahşap kavelalarla birleştirerek yeni bir DLVL sistemi (dowel laminated veneer lumber) geliştirmiştir. Yatay düzende konumlandırılan H-DLVL kirişlerinin eğilme dayanımı ve efektif eğilme rijitliğinin dikey düzendeki V-DLVL kirişlerine kıyasla sırasıyla yaklaşık 2 kat ve 8 kat daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu farklar, iki lamel yerleşimi arasındaki karşılaştırmaya aittir ve tek başına kavela yoğunlaştırmasının etkisini göstermez. Ayrıca LVL'nin kendi üretiminde yapıştırıcı kullanıldığından, kavelayla montaj ürünün bütünüyle yapıştırıcısız olduğu anlamına gelmez. Aynı araştırma grubu (Fu vd., 2025b) parametrik sonlu eleman analizleriyle lamel kalınlığı, genişlik ve kavela aralığının eğilme performansına etkilerini incelemiş;

önerilen tahmin denklemlerinin hataları ±%13 sınırları içinde tuttuğunu göstermiştir.

O'Ceallaigh vd., (2022) yoğunlaştırılmış ahşap kavelalı DLT çalışmasında, kavela çapı ve aralığının DLT elemanlarının rijitliği ve maksimum yük kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiş; modellerinin kavela eğilmesi, gömülmesi ve alt lamelin, çekmede kırılması biçiminde tezahür eden bileşik hasar modunu başarıyla öngördüğünü bildirmiştir. Yoğunlaştırmanın ayrı bir deney değişkeni olmadığı karşılaştırmalı bir araştırmada Yeh ve Yeh (2024), DLT kirişlerini kendinden kılavuzlu vidalarla lamine edilmiş kirişlerle karşılaştırmış; kendinden kılavuzlu vidalı kirişlerin eğilme rijitliğinin yaklaşık %7,86 daha yüksek olduğunu, ancak 45° açıyla yerleştirilen ahşap kavelaların da rijitliğinin kayda değer ölçüde artırdığını belirlemiştir.

3.4. Çapraz Tabakalı Ahşap Panellerdeki Uygulamalar

Yoğunlaştırılmış kavelalı çapraz tabakalı panellere ilişkin doğrudan yangın verileri, Khelifa vd. (2024) tarafından incelenmiştir. Radyant ısıya maruz bırakılan üç tabakalı ladin panel ve L biçimli birleşim üzerinde sıcaklık dağılımı ve kömürleşme değerlendirilmiş; deneyler ısıl bozunmayı dikkate alan sayısal modellerle karşılaştırılmıştır. Bu bulgular bağlantının ısıl davranışını açıklar ancak standart yük altında yangın dayanımı sınıflandırmasının yerine geçmemektedir.

Doğal kayın kavelalı panellere ilişkin karşılaştırmalı bir çalışmada Aloisio vd. (2025a), altı tabakalı ve 180 mm kalınlığındaki duvar panelini 50 kN/m çizgisel yük altında 100 dakika standart yangına maruz bırakmıştır. Panelde kömürleşme ve tabaka düşmeleri oluşmasına karşın deney sonunda taşıyıcı göçme gözlenmemiş ve REI 90 sınıfı bildirilmiştir. Deney süresi ile sınıflandırma birbirinden ayrılmalıdır ve bu sonuç yoğunlaştırılmış kavela etkisinin kesin bir kanıtı olarak kullanılmamalıdır. Aloisio vd. (2025b), doğal ahşap kavelalı panel sistemini %8, %12 ve %15 nem içeriklerinde incelemiş; %12'den %8'e kuruma sırasında eğilme rijitliğinde yaklaşık %34 azalma bildirmiştir. Gama yöntemi ve kesme analojisiyle panel deneylerinden bağlantı kayma modülü dolaylı olarak belirlenmiştir.

Dişli ahşap kavelalara ilişkin karşılaştırmalı bir örnekte Han vd. (2025), dış boyuna tabakalarda ladin, orta çapraz tabakada ise kayın, kavak ya da ladin kullanılan üç katmanlı hibrit bir dişli ahşap kavelalı CLT sisteminde push-out (itme-çıkarma) direncini incelemiştir. Kayın çapraz tabakalı örneklerin, tamamen ladinden oluşan gruplara kıyasla belirgin biçimde daha yüksek itme-çıkarma direnci sergilediği saptanmıştır. Aynı çalışmada 70°C-%10 bağıl nem koşuluna üç gün maruz kalmanın push-out direncini tüm gruplarda düşürdüğü; buna karşın

20°C-%65 bağıl nem koşulunda 60 ile 240 günlük beklemelerin kayın çapraz tabakası içeren numunelerde direnci artırdığı gösterilmiştir. Vilguts vd. (2025) ise doğal sert odun kavelalarla gerçekleştirilen 96 tekli ve çoklu kavela CLT-CLT birleşim deneyiyle kavela aralığının grup etkisini incelemiş ve doğrusal olmayan kuvvet-deplasman modeliyle deneysel verileri başarıyla yeniden üretmiştir.

3.5. Yapısal Birleşim ve Çerçeve Sistemlerindeki Uygulamalar

Mehra vd. (2024), sıkıştırılmış ahşap kavelalı kereste elemanları kullanılarak üretilen portal çerçeveleri yanal yük altında test etmiştir. Kavelalı çerçevelerin taşıma kapasitesi glulam çerçevelerden %4,4 daha düşük bulunurken, glulam çerçevelerin ortalama rijitliği kavelalı çerçevelerden yaklaşık %53 daha yüksek tespit edilmiştir. Aynı fark glulam esas alınarak ifade edildiğinde, kavelalı çerçevelerin rijitliği yaklaşık %35 daha düşüktür. Her sistemden iki çerçevenin sınandığı bu araştırmada, geliştirilen çözümün uygulanabilirliği gösterilmektedir.

Aloisio vd. (2025c), kontrplak levhalı moment aktaran mahya birleşimlerini doğal huş ve kayın esaslı lamine yoğunlaştırılmış kavelalarla incelemiştir. Her kavela türünden dört olmak üzere sekiz numune test edilmiştir. Lamine yoğunlaştırılmış kavelalar, termoset reçineyle birleştirilen kayın kaplamalardan üretilmiştir. Bu nedenle masif yoğunlaştırılmış kavelalarla aynı malzeme sınıfında değerlendirilmemelidir. Çalışmadaki iki mekanik model deneylerle karşılaştırılmıştır. Bu yüzden kalibrasyonla elde edilen uyumun bağımsız doğrulama anlamına gelmediği dikkate alınmalıdır.

Vilguts vd. (2024), doğal kırmızı meşe ve huş kavelalı CLT-CLT birleşimleri için 154 tek kesme düzlemli deney gerçekleştirmiştir. İncelenen gruplarda kavela başına 10,3 kN'a ulaşan kapasite, 5,2 kN/mm'ye ulaşan yanal rijitlik ve 2,4–4,5 aralığında süneklik değerleri bildirilmiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu bağlantıların sismik açıdan elverişli davranış özelliğine sahip olduğuna işaret etmektedir.

3.6. Lif Yönüne Dik Basınç Altında Güçlendirme

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelalar, mesnet bölgelerinde lif yönüne dik basınç kapasitesini artırmak amacıyla kullanılabilir. Conway vd. (2021), 2, 4 ve 6 kavela içeren düzenekleri çelik kendinden kılavuzlu vidalarla karşılaştırmıştır. Altı kavelalı grupta ortalama maksimum yük 160,5 kN, altı vidalı grupta 203,1 kN olup güçlendirilmemiş örneklere göre artışlar sırasıyla %30 ve %64'tür. Kavelalar deliklere poliüretan (PUR) tutkalı ile yapıştırılmış; dört kavelalı gruptaki iki erken yapışma hasarı ortalama dayanım hesabına alınmamıştır. Sonuçlar, yoğunlaştırılmış ahşap kavelalarında yüksek bir kapasiteye ulaştığını, güçlendirme bölgesinde tamamen ahşap esaslı bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

O'Ceallaigh vd. (2021), aynı güçlendirme yaklaşımını üç boyutlu sonlu eleman modeliyle incelemiş; kavela uzunluğu, çapı ve burkulmanın etkilerini değerlendirmiştir. Basınç deneylerinden elde edilen bulgular, maksimum ahşap kavela uzunluk/çap oranı üzerine pratik tasarım önerileri sunmuştur.

3.7. Döner Kaynak (Rotation Welding) ile Yoğunlaştırılmış Kavela Uygulamaları

Döner kaynak (rotation welding), kavelanın yüksek hızla döndürülerek ahşap elemandaki deliğe yerleştirilmesine dayanır. Sürtünme ısısı, ara yüzeydeki lignin ve hemiselüloz içeren polimer matrisini yumuşatır, böylece malzeme akışı ve termal dönüşümlerle bağlantı oluşur. Xu vd. (2022a), yoğunlaştırılmış kavelaların glulam içine döner kaynakla bağlanmasını incelemiş ve literatürdeki doğal kavela sonuçlarının üzerinde çıkarma direnci bildirmiştir. İncelenen koşullarda 12/9 kavela/delik çapı oranı daha uzun yerleştirmeye olanak sağlamıştır.

Zhu vd. (2017), doğal huş kavelalarla oluşturulan kaynak ara yüzeyini XRD ve TG analizleriyle incelemiştir. Ara yüzeyin kristallik derecesinin normal ahşap kavela malzemesine kıyasla %75 daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Bu sonuç ara yüzeydeki dönüşümü açıklamaktadır. Bu nedenle, yoğunlaştırmanın etkisini veya dayanım artışının tek sebebini göstermemektedir.

Zupcic vd. (2023), termal modifiye ana elemanda kaynak parametrelerinin değiştirilmesine rağmen çıkarma kuvvetinin bazı gruplarda %25'ten fazla düştüğünü, sitrik asitle modifiye ana elemanda azalmanın daha yüksek olabildiğini bildirmiştir. Çıkarma kuvveti birleşim özelliği olduğu için ahşabın çekme dayanımıyla karıştırılmamalıdır. Sitrik asit modifikasyonu kavelaya da uygulandığında kavela malzemesinin çekme dayanımı ayrıca sınırlanabilmektedir.

3.8. Tarihi Yapı Restorasyonu ve Özel Uygulamalar

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelaların miras niteliğindeki yapıların restorasyonunda da uygulama potansiyeli bulunmaktadır. Arciszewska-Kedzior vd., (2015) hasarlı kiriş uçlarının onarımında kullanılan eğik yüzeyli bindirmeli (lapped scarf) ekleri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Üç ahşap kavelaya sahip ve kirişin 1/5 L mesafesindeki ucuna konumlanan 1,38 m uzunluğundaki eklemi incelenen düzenekler içinde uygun konfigürasyon olarak belirleyen araştırma, bu ekleme sahip kirişin orijinal kiriş dayanımının %65–75'ini karşıladığını ortaya koymuştur. Teodorescu vd., (2020) ise kestane ve ladin ana elemanlarını Massaranduba (sert bir Brezilya sert ahşap türü) kavelaları ile birleştirerek geniş kapsamlı bağlantı deneyleri gerçekleştirmiş; ahşap kavelaların

yük taşıma kapasitesini doğrulamakla birlikte, doğru analitik ifadelerin geliştirilmesi için ek araştırma yapılmasının gerekliliğini vurgulamıştır.

Bu restorasyon araştırmaları doğal ahşap kavelalı birleşimleri kapsamaktadır. Yoğunlaştırılmış kavelaların da aynı eklerde kullanılma potansiyeli, taşıma kapasitesinin yanında tarihi malzemeyle nem uyumu, yerel ezilme ve hasarsız sökülebilirlik açısından ayrıca incelenmelidir.

3.9. Kullanım Alanlarının Karşılaştırılması

Başlıca kullanım alanları ve her uygulamayı destekleyen kanıtın türü Tablo 3'te özetlenmektedir. Doğal kavela verileri, yoğunlaştırılmış kavela sonuçlarından ayrı gösterilmiştir.

Tablo 3. Yapısal uygulamalar ve kavela türüne göre kanıtların kapsamı

Uygulama	Kavela ve kanıt türü	Bulguların kapsamı	Kaynak
DLT kiriş ve birleşimler	TM yoğunlaştırılmış; doğrudan deney	Eğilme ve birleşim deneyleri yapısal kullanımı desteklemektedir.	El-Houjeyri vd. (2019)
Panel ve birleşimlerin ısıl davranışı	Yoğunlaştırılmış; deney ve ısıl model	Radyant ısı altında sıcaklık ve kömürleşme incelenmiştir.	Khelifa vd. (2024)
Duvar panelinin yangın dayanımı	Doğal kayın; karşılaştırmalı deney	180 mm panel, 50 kN/m yük, 100 dk deney; göçme yok, kömürleşme var; REI 90.	Aloisio vd. (2025a)
Lif yönüne dik basınç güçlendirmesi	Yoğunlaştırılmış; PUR ile montaj	Altı kavela: 160,5 kN; altı vida: 203,1 kN ortalama maksimum yük. Sayısal model aynı yaklaşımı inceler.	Conway vd. (2021); O'Ceallaigh vd. (2021)
Portal çerçeveler	Yoğunlaştırılmış; doğrudan deney	Glulama göre kapasite %4,4, rijitlik yaklaşık %34,6 daha düşük; her sistemde iki çerçeve.	Mehra vd. (2024)
Moment aktaran mahya birleşimleri	Doğal huş ve reçineli lamine yoğunlaştırılmış	İki kavela türünden dörder numune; malzeme sınıfları ve model kalibrasyonu ayrı değerlendirilir.	Aloisio vd. (2025c)
CLT-CLT birleşimleri	Doğal sert odun; karşılaştırmalı deney	Tek kesme düzlemi; gruplarda 10,3 kN/kavelaya ulaşan kapasite.	Vilguts vd. (2024)

Döşeme titreşimi	Yoğunlaştırılmış; deneyle desteklenen model	4,5 × 5,5 m döşeme için seçilen koşullarda titreşim ölçütlerinin karşılanması sayısal olarak öngörülür.	Bui vd. (2020)
Döner kaynak birleşimleri	Yoğunlaştırılmış; doğrudan deney	Glulam içinde çıkarma direnci incelenmiştir; doğal kavela karşılaştırması literatür verilerine dayanır.	Xu vd. (2022a)
Tarihi kiriş onarımı	Doğal odun; karşılaştırmalı deney ve model	İncelenen bindirmeli ek başlangıç kiriş kapasitesinin %65–75'ine ulaşmıştır; yoğunlaştırma etkisi sınanmamıştır.	Arciszewska-Kedzior vd. (2015)

4. TASARIM VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DEĞERLENDİRME

4.1. Birleşim Mekaniği ve Tasarım Modelleri

Yoğunlaştırma, kavela malzemesinin dayanımını artırabilir. Birleşimin kapasitesi ise kavela eğilmesi ve kesmesi, gömülme, çevre odunun ezilmesi ve yarılmasıyla birlikte belirlenir. Metal bağlantı elemanları için geliştirilen Avrupa Akma Modeli'nin ahşap kavelalara uygulanmasında bu hasar biçimleri dikkate alınmalıdır (Khan vd., 2026; De Santis vd., 2025). Standart veya taslak denklemler karşılaştırılırken kullanılan sürüm ve sınanan birleşim düzeni açıkça belirtilmelidir. Yüksek kapasite, yüksek sünekliği zorunlu kılmaz. Tomasi vd. (2025), lamine yoğunlaştırılmış kavelalı birleşimlerde çelik vidalara yaklaşan kapasiteye karşın yaklaşık 1,6 ortalama süneklik bildirmiştir. Ahşap kavelanın malzeme özelliği ile birleşimin enerji tüketimi bu nedenle ayrı değerlendirilmelidir.

Nem kaynaklı şişme mekanizmasının bağlantı sıkılığını zaman içinde nasıl etkilediği, araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Aloisio vd., (2025b) nem içeriğinin azalmasının kayma modülünü düşürdüğünü göstermiştir. Han vd., (2026) ise sıcak suda ve oda sıcaklığındaki suda aktivasyon hareketini inceleyerek kontrollü aktivasyon koşullarının pratik uygulama için tasarlanabileceğini belirtmiştir. Bu bulgular, bağlantı performansının değişken nem koşullarına karşı dayanıklılığı açısından önemlidir ve hizmet ömrü boyunca sistematik izleme gereksinimini gündeme getirmektedir.

4.2. Çevresel Etkiler ve Yeniden Kullanım Olanakları

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelalar, lamine ahşap üretiminde metal bağlantı elemanı ve yapıştırıcı/tutkal kullanımını önemli oranda azaltabilmektedir. Bu teknoloji uçtan uca sürdürülebilir bir inşaat anlayışına doğrudan hizmet etmektedir. Yapıştırıcı içermeyen sistemler VOC ve formaldehit salınımını ortadan kaldırmakta; metal bağlantı elemanı gerekmediğinden, gömülü karbon miktarı (embodied carbon) kayda değer ölçüde azalmaktadır. Sotayo vd., (2020) bu teknolojinin 4R (reduce, reuse, recycle, repair (azalt, yeniden kullan, geri dönüştür, onar)) ilkeleri çerçevesinde inşaat sektörüne sağladığı katkıyı kapsamlı biçimde tartışmış; Barbalic vd., (2025) aynı ilkeleri DLT kirişlerin üretiminde somutlaştırmıştır. Ahşap kavelalı lamine kereste elemanlar mekanik araçlarla sökülebilmekte, lameller yeniden kullanılabilmekte ya da geri dönüştürülebilmekte; tüm bu özellikler döngüsel ekonomi için kritik önem taşımaktadır.

Bruzzone vd., (2025), farklı ahşap kavela ve çivi türlerini karşılaştırdıkları çalışmada ahşap kavelalar ve çivilerin çam (*Pinus taeda* L.) türünden üretilen panellerde, yapısal açıdan yeterli performans sergilediğini göstermiştir. Sonuçlar, hızlı büyüyen, görece düşük kaliteli odun türlerinin yoğunlaştırılmış ahşap kavela teknolojisiyle işlenerek değer zincirine katılabileceğine işaret etmektedir. Söz konusu yaklaşım hem ekonomik hem çevresel açıdan büyük bir öneme sahiptir.

4.3. Uygulama Sınırları ve Araştırma Gereksinimleri

Mevcut araştırma bulguları umut verici olmakla birlikte, bazı kritik boşluklar gözlemlenmektedir. Uzun süreli performans ve yorulma davranışı henüz yeterince incelenmemiştir. Sismik yükler altındaki davranış, kapasite tasarımı perspektifinden ek çalışma gerektirmektedir. Büyük ölçekli portal çerçeve ve çok katlı yapı sistemlerindeki uygulama deneyimi oldukça sınırlı kalmaktadır. Ayrıca endüstriyel ölçekte üretime geçiş için maliyet-etkinlik analizleri ve standardizasyon çalışmaları öncelikli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Isıl işlem ve diğer odun modifikasyonlarına ilişkin değerlendirmelerde de üretim koşullarının ve çevresel etkilerin birlikte ele alınması gereği öne çıkmaktadır (Sandberg ve Kutnar, 2016; Sandberg vd., 2017).

5. SONUÇ

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelalar, uygun üretim ve birleşim koşullarında lamine ahşap elemanların mekanik bağlantısında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Çalışmada ele alınan araştırmalar, bu olanağın üretim yöntemi, odun türü, lif yönü, geometri ve nem geçmişiyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelaların mekanik özellikleri, yoğunlaştırma parametrelerine ve ağaç türüne bağlı olarak belirgin biçimde farklılaşmaktadır. Uygun üretim koşullarında geleneksel sert ahşap kavelaların üzerinde performans sergileyen kavela tipleri elde edilebilmektedir. Nemle etkinleşen şekil geri kazanımı mekanizması, bağlantı temasını arttırarak sıkı geçme oturmasını büyük ölçüde desteklemektedir. Lamine ahşap elemanlarda yoğunlaştırılmış ahşap kavela kullanımı, geleneksel yapıştırıcılı sistemlerle kıyaslanabilir eğilme ve titreşim performansı sunmaktadır. Yoğunlaştırılmış ahşap kavelaların yangın, nem ve birleşim direnci açısından gösterdikleri performans, üretim yaklaşımına/yöntemine teknik açıdan uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Lif yönüne dik güçlendirme uygulamaları ise tatmin edici kapasiteler sunarak tamamen ahşap esaslı birleşim çözümlerine olanak tanımaktadır. Ayrıca yoğunlaştırılmış ahşap kavelaların döner kaynak tekniğiyle birleştirilmesi, doğal ahşap kavelaların tutunma (pull-out) direncini aşan bir yapısal bağlantı yöntemi olarak öne çıkmaktadır.

Yoğunlaştırılmış ahşap kavelalar, lamine ahşap üretiminde metal bağlantı elemanı ve yapıştırıcı/tutkal kullanımını büyük ölçüde azaltabilmektedir. Bu teknoloji çevresel açıdan ekolojik, sürdürülebilir ve çevre dostu üretim anlayışına doğrudan hizmet etmektedir.

Önümüzdeki araştırma gündeminde uzun süreli performans, sismik davranış, maliyet analizi ve uluslararası standardizasyonun yer alması büyük önem taşımaktadır. Yoğunlaştırılmış ahşap kavela teknolojisi, yapıştırıcı/tutkal ve metal bağlantı elemanlarına gerçek anlamda sürdürülebilir bir alternatif sunma potansiyeline sahip olup ahşap mühendisliği alanında ileri araştırmalara konu olmayı hak etmektedir.

KAYNAKLAR

Aloisio, A., Pasca, D. P., & Fragiacomo, M. (2025a). Fire resistance of wooden dowelled cross-laminated timber panels under in-plane loading. *Engineering Structures*, 340. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120592

Aloisio, A., Pasca, D. P., Tomasi, R., & Fragiacomo, M. (2025b). Sensitivity of bending stiffness to moisture content in adhesive-free wooden-doweled cross-laminated timber panels. *Construction and Building Materials*, 490. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142143

Aloisio, A., Wang, Y., Crocetti, R., Nyrud, A. Q., & Tomasi, R. (2025c). Mechanical performance of pure wood moment-resisting ridge joints with plywood gussets and wooden dowels. *Engineering Structures*, 334. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120271

Arciszewska-Kedzior, A., Kunecky, J., Hasnikova, H., & Sebera, V. (2015). Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: Experimental and numerical analysis. *Engineering Structures, 94*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.036

Barbalic, J., Zadravec, B., Perkovic, N., & Rajcic, V. (2025). Experimental study of timber composite beam elements using hardwood mechanically inserted and welded dowels. *Forests, 16*(11). https://doi.org/10.3390/f16111748

Blomberg, J., Persson, B., & Blomberg, A. (2005). Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science and Technology, 39*, 339–350. https://doi.org/10.1007/s00226-005-0290-8

Bruzzone, G., Godoy, D., Arrejuría, S., Quagliotti, S., Böthig, S., & Moya, L. (2025). Comparative study of laminated timber products joined with different types of dowels. M*aderas. Ciencia y tecnología, 27*, 22. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2025.22

Bui, T. A., Oudjene, M., Lardeur, P., Khelifa, M., & Rogaume, Y. (2020). Towards experimental and numerical assessment of the vibrational serviceability comfort of adhesive free laminated timber beams and CLT panels assembled using compressed wood dowels. Engineering Structures, 216. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110586

Conway, M., Mehra, S., Harte, A. M., & O'Ceallaigh, C. (2021). Densified wood dowel reinforcement of timber perpendicular to the grain: a pilot study. *Journal of Structural Integrity and Maintenance, 6*(3), 177–186. https://doi.org/10.1080/24705314.2021.1906090

De Santis, Y., Aloisio, A., & Fragiacomo, M. (2025). Stiffness prediction of wooden dowel connections with beam-on-foundation models. *Journal of Structural Engineering, 151*(12). https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-15001

El-Houjeyri, I., Thi, V.-D., Oudjene, M., Khelifa, M., Rogaume, Y., Sotayo, A., & Guan, Z. (2019). Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels. *Construction and Building Materials, 222,* 288–299. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.163

Fu, H., Li, Z., & He, M. (2025a). Experimental research on flexural performance of dowel laminated timber composed of LVL made from fast-growing larch. *European Journal of Wood and Wood Products, 83*(2). https://doi.org/10.1007/s00107-025-02239-7

Fu, H., Sun, Y., Zhou, L., & He, M. (2025b). Research on bending properties of dowel laminated veneer lumber. *Structures*, *75*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108723

Guan, Z., Sotayo, A., Oudjene, M., El Houjeyri, I., Harte, A., Mehra, S., ... & Deneufbourg, F. (2018). Development of adhesive free engineered wood products–Towards Adhesive Free Timber Buildings. Proc. *WCTE*, 20-23. Erişim:10.06.2026 https://www.researchgate.net

Grönquist, P., Schnider, T., Thoma, A., Gramazio, F., Kohler, M., Burgert, I., & Rüggeberg, M. (2019). Investigations on densified beech wood for application as a swelling dowel in timber joints. *Holzforschung, 73*(6), 559–568. https://doi.org/10.1515/hf-2018-0106

Han, L., Derikvand, M., Sandak, J., Hladnik, M., Sandberg, D., & Kutnar, A. (2025). Push-out resistance of threaded wooden dowels in cross-laminated timber with hardwood cross-layer. *Wood Material Science & Engineering, 20*(5), 1122–1127. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2488964

Han, L., Scharf, A., Derikvand, M., Schwarzkopf, M., Mitkovski, B., Sandberg, D., & Kutnar, A. (2026). Moisture-activated set-recovery of thermo-hydro-mechanically densified hardwood dowels for high-tolerance timber connections. *Construction and Building Materials, 512*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145401

Huang, W., Jin, Y., Guo, Y., Deng, J., Yu, H., & He, B. (2024). Fabrication of high-performance densified wood via high-pressure steam treatment and hot-pressing. *Polymers, 16*(7), 939. https://doi.org/10.3390/polym16070939

Khan, I. U., Subhani, M., Ghabraie, K., & Ashraf, M. (2025). Exploring and refining testing approaches for hardwood dowels under axial and flexural loading: an experimental and numerical study. *Wood Material Science & Engineering,* 1-23. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2505135

Khan, I. U., Subhani, M., Ghabraie, K., & Ashraf, M. (2026). Experimental evaluation and theoretical prediction of single hardwood dowel connections in softwood and hardwood. Engineering Structures, 353. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.122251

Khelifa, M., Tran, T. T., Khennane, A., Oudjene, M., & Rogaume, Y. (2024). Thermal response of timber connections using densified wood dowels under fire. Journal of Fire Sciences, 42(6), 534–550. https://doi.org/10.1177/07349041241257262

Laine, K., Segerholm, K., Wålinder, M., Rautkari, L., Ormondroyd, G., Hughes, M., & Jones, D. (2014). Micromorphological studies of surface densified wood. *Journal of Materials Science, 49*(5), 2027-2034. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7890-8

Li, L., Gong, M., Chui, Y. H., Schneider, M., & Li, D. (2013). Measurement of the elastic parameters of densified balsam fir wood in the radial-tangential plane using a digital image correlation (DIC) method. *Journal of Materials Science, 48*(21), 7728-7735. https://doi.org/10.1007/s10853-013-7593-1

Luan, Y., Fang, C. H., Ma, Y. F., & Fei, B. H. (2022). Wood mechanical densification: a review on processing. *Materials and Manufacturing Processes, 37*(4), 359–371. https://doi.org/10.1080/10426914.2021.2016816

Maturana, J. C., Guindos, P., Lagos, J. et al. (2023). Two-step hot isostatic pressing densification achieved non-porous fully-densified wood with enhanced physical and mechanical properties. Scientific Reports, 13, 14324. https://doi.org/10.1038/s41598-023-41342-8

Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Sotayo, A., Guan, Z., & Harte, A. M. (2024). Structural characterisation of laterally loaded glued and compressed wood dowel laminated timber portal frames produced using compressed wood connectors. *Construction and Building Materials, 457*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139107

Namari, S., Drosky, L., Pudlitz, B., Haller, P., Sotayo, A., Bradley, D., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Harte, A. M., El-Houjeyri, I., Oudjene, M., & Guan, Z. (2021). Mechanical properties of compressed wood. Construction and Building Materials, 301. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124269

Navi, P., & Heger, F. (2004). Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. *MRS Bulletin, 29*, 332–336. https://doi.org/10.1557/mrs2004.100

O'Ceallaigh, C., Conway, M., Mehra, S., & Harte, A. M. (2021). Numerical investigation of reinforcement of timber elements in compression perpendicular to the grain using densified wood dowels. *Construction and Building Materials, 288*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122990

O'Ceallaigh, C., Harte, A. M., & McGetrick, P. J. (2022). Dowel laminated timber elements manufactured using compressed wood dowels. *CERI2022—Civ. Eng. Res. Irel,* 222-227. https://www.universityofgalway.ie/ Erişim:08.06.2026

Pelit, H., & Yorulmaz, R. (2024). Influence of thermal pretreatments on dimensional change and humidity sensitivity of densified spruce and poplar wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 9 (26), 1-16. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.09

Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2012). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science & Engineering, 8*(1), 64–88. https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935

Sandberg, D., & Kutnar, A. (2016). Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America. *Wood and Fiber Science, 48*(1), 28–39. https://www.scopus.com/pages/publications/84963532882

Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - a review. iForest - *Biogeosciences and Forestry, 10,* 895–908. https://doi.org/10.3832/ifor2380-010

Seborg, R. M., Tarkow, H., & Stamm, A. J. (1953). Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood. *Forest Products Laboratory, Madison, 3*(3), 59–67. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19530601952

Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeyri, I., Harte, A. M., Mehra, S., O'Ceallaigh, C., Haller, P., Namari, S., Makradi, A., Belouettar, S., Bouhala, L., Deneufbourg, F., & Guan, Z. (2020). Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Developments in the Built Environment, 1,* 100004. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004

Teodorescu, I., Pereira, B., Aquino, C. D., & Branco, J. M. (2020). Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, 173*(12), 927–938. https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00021

Tomasi, R., De Santis, Y., Aloisio, A., Crocetti, R., Saeby, V. H., & Nyrud, A. Q. (2025). Experimental and analytical investigation on timber connections with beech, birch and laminated densified wooden dowels. *Construction and Building Materials, 494,* 142692. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142692

Url1: https://www.dcdesigncoop.com.tr/tr/dis-mekan-cozumleri/12-clt-bbs-glulam-sistemleri/1.jpg Erişim:08.06.2026

Url2: https://yapidergisi.com/capraz-lamine-ahsap-clt-yapi-malzemesinin-strukturel-acidan-degerlendirilmesi/ Erişim:08.06.2026

Url3:https://static.wixstatic.com/media/f226cb_f6bace09944a4aaf8b6349162ced98d6~mv2.jpg/v1/fill/w_148,h_148,al_c,q_80,usm_0.66_1.00_0.01,enc_avif,quality_auto/f226cb_f6bace09944a4aaf8b6349162ced98d6~mv2.jpg Erişim:10.06.2026

Vilguts, A., Phillips, A. R., Jerves, R., Antonopoulos, C., & Griechen, D. (2024). Monotonic testing of single shear-plane CLT-to-CLT joint with hardwood dowels. *Journal of Building Engineering, 88*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109252

Vilguts, A., Phillips, A. R., Antonopoulos, C., & Griechen, D. (2025). Testing and modeling of CLT-to-CLT joints made using hardwood dowels and screws with varying spacing. *Construction and Building Materials, 458*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139449

Xu, B.-H., Liu, K., Zhao, Y.-H., & Bouchair, A. (2022a). Pullout resistance of densified wood dowel welded by rotation friction. *Journal of Materials in Civil Engineering, 34*(8). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004343

Xu, B.-H., Jiao, S.-Y., Wang, B.-L., & Bouchair, A. (2022b). Mechanical performance of timber-to-timber joints with densified wood dowels. *Journal of Structural Engineering, 148*(4). https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003317

Yeh, Y.-H., & Yeh, Y.-C. (2024). Bending behaviour and failure modes of non-glue-laminated timber beams composed of wooden dowels and self-tapping screws. *Buildings, 14*(2). https://doi.org/10.3390/buildings14020394

Zhu, X., Yi, S., Gao, Y., Zhao, Y., & Qiu, Y. (2017). Mechanical evaluation and XRD/TG investigation on the properties of wooden dowel welding. *BioResources, 12*(2), 3396–3412. https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3396-3412

Zupcic, I., Dukic, I., Jug, M., Jurisic, M., & Hasan, M. (2023). The influence of different wood modifications on pull-out force of rotary welded dowels. Drvna Industrija, 74(1), 93–103. https://doi.org/10.5552/drvind.2023.0087

4. Bölüm

Orman-Kent Arayüzleri, İklim Değişikliği ve Afet Dirençliliği

Saadet Gökçen KARADUMAN*[1], Ufuk ÖZKAN[2]

Özet

Kentler ile çevrelerindeki ormanlar, havzalar ve diğer doğal alanlar; su, karbon, enerji ve ekosistem hizmetleri üzerinden birbirine bağlı sosyal-ekolojik sistemlerdir. Bu bölümde orman-kent arayüzleri, iklim değişikliği ve afet dirençliliği; orman-havza-kent sürekliliği temelinde bütünleşik bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Öncelikle kentleşme ve iklim değişikliğinin orman-kent arayüzlerinde oluşturduğu değişen riskler değerlendirilmekte; yangınların kuraklık, aşırı sıcaklık, şiddetli yağış, yüzeysel akış, erozyon ve sediment taşınımı gibi süreçlerle oluşturabileceği bileşik ve zincirleme etkiler tartışılmaktadır. Yangın sonrası havza tepkisinin süreç temelli değerlendirilmesinin, afet risk azaltımı ile havza yönetimi arasında önemli bir bağlantı oluşturduğu vurgulanmaktadır. Bölümde ayrıca kentsel ekosistem hizmetleri, yeşil-mavi altyapı ve doğa tabanlı çözümlerin yağış suyu yönetimi, termal düzenleme, habitat sürekliliği ve iklim uyumundaki rolleri ele alınmaktadır. Kentlerin su güvenliği havza su bütçesi perspektifinden değerlendirilirken, orman yönetimindeki karbon-su ödünleşimleri ve doğal karbon yutaklarının uzun dönemli kalıcılığı ayrıca incelenmektedir. Son olarak iklim, biyolojik çeşitlilik ve arazi gündemleri arasındaki ilişkiler; mekânsal planlama, ortak veri altyapısı ve çok düzeyli yönetişim kapsamında değerlendirilmektedir. Türkiye açısından önerilen yaklaşım, mevcut ormancılık, havza yönetimi, kent planlama ve afet yönetimi araçlarının yerine yeni bir sistem oluşturmak değil; bu alanlar arasında bilimsel, mekânsal ve kurumsal bağlantıları güçlendirmektir. Böylece iklim uyumu, afet risk azaltımı, su güvenliği, karbon yönetimi ve ekosistem hizmetlerinin birlikte değerlendirilebildiği daha bütüncül ve uyarlanabilir bir dirençlilik çerçevesi ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Orman-kent arayüzü; iklim değişikliği; afet dirençliliği; havza yönetimi; doğa tabanlı çözümler; su güvenliği; karbon-su ödünleşimi; ekosistem hizmetleri

[1] Şehir Plancısı, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0009-0006-6600-1884, kunterkaraduman@gmail.com, *Sorumlu yazar.

[2] Dr. Öğr. Üyesi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Havza Yönetimi Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0002-4172-6954, **ufuk.ozkan@ikc.edu.tr**.

Wildland–Urban Interfaces, Climate Change, And Disaster Resilience

Abstract

Cities and their surrounding forests, watersheds, and other natural areas constitute interconnected social–ecological systems linked through water, carbon, energy, and ecosystem-service flows. This chapter examines wildland–urban interfaces, climate change, and disaster resilience through an integrated forest–watershed–urban continuum perspective. It first addresses the changing risks associated with urbanization and climate change at wildland–urban interfaces and discusses the compound and cascading interactions among wildfire, drought, extreme heat, intense rainfall, runoff, erosion, and sediment transport. A process-based understanding of post-wildfire watershed response is emphasized as an important link between disaster risk reduction and watershed management. The chapter further examines the roles of urban ecosystem services, green–blue infrastructure, and nature-based solutions in stormwater management, thermal regulation, habitat connectivity, and climate adaptation. Urban water security is considered from a watershed water-budget perspective, while particular attention is given to carbon–water trade-offs in forest management and to the long-term permanence and resilience of natural carbon sinks under disturbance. The interconnections among climate, biodiversity, and land-related agendas are subsequently discussed within the contexts of spatial planning, shared geospatial information, and multilevel governance. For Türkiye, the proposed framework does not seek to replace existing forestry, watershed management, urban planning, or disaster-management instruments. Rather, it aims to strengthen the scientific, spatial, and institutional linkages among them. The forest–watershed–urban continuum therefore provides an integrative framework for jointly addressing climate adaptation, disaster risk reduction, water security, carbon management, and ecosystem services while supporting adaptive and resilience-oriented planning.

Keywords: Wildland–urban interface; climate change; disaster resilience; watershed management; nature-based solutions; water security; carbon–water trade-offs; ecosystem services

1. Giriş

Kentler, doğal sistemlerden bağımsız çalışan kapalı mekânsal birimler değildir. İçme ve kullanma suyu, mikroiklim, hava kalitesi, biyolojik çeşitlilik, karbon depolama ve rekreasyon gibi pek çok işlev; kent içindeki yeşil-mavi altyapı ile kenti çevreleyen ormanlar, sulak alanlar, tarım alanları ve havzalar arasındaki ekolojik bağlantılar üzerinden üretilir. Bu nedenle iklim değişikliği ve afet dirençliliğini yalnızca idari kent sınırları içinde ele almak, riskin oluştuğu ve ekosistem hizmetlerinin üretildiği süreçlerin bir bölümünü görünmez bırakabilir. Kentsel ekosistem hizmetleri literatürü de kentlerin dayanıklılığının, ekosistemlerin sağladığı düzenleyici ve destekleyici işlevlerle birlikte değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır (Haase vd., 2014; McPhearson vd., 2015).

Bu ilişkinin en belirgin olduğu alanlardan biri orman-kent arayüzleridir. Uluslararası literatürde Wildland-Urban Interface (WUI) olarak anılan bu alanlar, yapılaşmış çevre ile orman veya diğer doğal bitki örtüsü tiplerinin temas ettiği ya da birbirine karıştığı geçiş zonlarıdır. Küresel değerlendirmeler WUI'nin kara yüzeyinin yaklaşık %4,7'sini kaplamasına karşın yaklaşık 3,5 milyar insanı barındırdığını göstermektedir. Bu ölçek, orman-kent arayüzünü yalnızca yangın yönetiminin değil; arazi kullanımı, habitat sürekliliği, su güvenliği, iklim uyumu ve afet risk azaltımının ortak çalışma alanlarından biri hâline getirmektedir (Schug vd., 2023).

Bölümün temel yaklaşımı, kent ile çevresindeki doğal alanları birbirinden ayrılmış iki sistem olarak değil, orman-havza-kent sürekliliği içinde değerlendirmektir. Bu bakış açısında yukarı havzadaki arazi örtüsü ve orman yapısı su ve karbon döngülerini; yangın, kuraklık ve şiddetli yağış gibi tehlikeler hidrolojik tepkiyi; kentleşme biçimi ise maruziyet ve hassasiyeti etkiler. Böylece afet riski, tek bir tehlikenin sonucu olmaktan çıkarak ekolojik, hidrolojik ve kentsel süreçlerin birlikte şekillendirdiği bir sosyal-ekolojik özellik kazanır. Doğa tabanlı çözümler de bu bütünlüğü destekleyebilecek araçlardır; ancak etkileri yerel ekoloji, mekânsal ölçek, bakım gereksinimi ve farklı ekosistem hizmetleri arasındaki ödünleşimler dikkate alınarak değerlendirilmelidir (Seddon vd., 2020; Bush ve Doyon, 2019).

Bu bölümün amacı; orman-kent arayüzlerinde değişen afet dinamiklerini, yangın sonrası havza tepkisini, kentsel ekosistem hizmetlerini, su güvenliğini ve karbon-su ilişkilerini ortak bir çerçevede ele almak; ardından bu bilimsel çerçeveyi mekânsal planlama, çok düzeyli yönetişim ve Türkiye için uygulanabilir planlama ilkeleriyle ilişkilendirmektir. Yaklaşım, kurum veya uygulamaları karşılaştırmalı biçimde değerlendirmekten çok, farklı ölçek ve

sektörlerde yürütülen çalışmalar arasında tamamlayıcılık kurulabilecek alanları görünür kılmayı amaçlamaktadır.

2. Orman-Kent Arayüzleri ve Değişen Riskler

2.1. Kentleşme, İklim Değişikliği ve Arayüzün Tanımı

Orman-kent arayüzleri, doğal bitki örtüsü ile yerleşimlerin birbirine yaklaştığı fiziksel sınırlar olmanın ötesinde, insan faaliyetleri ile ekolojik süreçlerin karşılıklı olarak etkileştiği dinamik peyzajlardır. Bu alanlarda konutlar, ulaşım ağları, enerji altyapısı, rekreasyon kullanımları ve doğal habitatlar aynı mekânsal sistem içinde yer alır. Bu nedenle WUI'deki planlama kararları, yalnızca yapılaşma güvenliği bakımından değil, yangın tehlikesi, habitat parçalanması, ekolojik bağlantılar ve arazi örtüsü değişimleri bakımından da önem taşır. Schug vd. (2023), WUI'nin küresel ölçekte hem nüfus hem de yapı yoğunluğu bakımından dikkat çekici bir yayılıma sahip olduğunu; bu nedenle insan-doğa etkileşimlerinin yönetiminde temel bir arazi kullanım sınıfı olarak ele alınabileceğini göstermektedir.

WUI'nin genişlemesi ile yangına maruziyet arasındaki ilişki de giderek daha görünür hâle gelmektedir. Chen vd. (2024), 1985-2020 dönemine ilişkin küresel analizlerinde WUI alanlarının arttığını ve milyonlarca insanın yangın tehdidi bulunan alanlarla mekânsal olarak kesiştiğini ortaya koymuştur. Bu bulgu, yangın riskinin yalnızca yanıcı madde miktarı veya meteorolojik koşullarla açıklanamayacağını; yerleşim örüntüsü, erişim, tahliye kapasitesi ve doğal alanlarla temas biçimi gibi mekânsal özelliklerin de değerlendirmeye katılması gerektiğini göstermektedir.

2.2. Yangın, Bileşik ve Zincirleme Afetler

Orman-kent arayüzlerinde yangın, çoğu zaman tek başına başlayan ve tek başına sona eren bir tehlike değildir. Uzun kurak dönemler ve yüksek sıcaklıklar yakıt nemini ve bitki stresini etkileyebilir; yangının ardından bitki örtüsü, ölü örtü ve toprak yüzeyindeki değişimler havzanın sonraki yağışlara vereceği tepkiyi değiştirebilir. Böylece aynı peyzajda kuraklık, yangın, yüzeysel akış, erozyon, sediment taşınımı ve taşkın birbirini izleyen bir süreçler dizisi oluşturabilir. Afet dirençliliği açısından önemli olan, bu zincirin yalnızca ilk halkasını değil, sonraki hidrolojik ve jeomorfolojik tepkileri de planlama kapsamına almaktır.

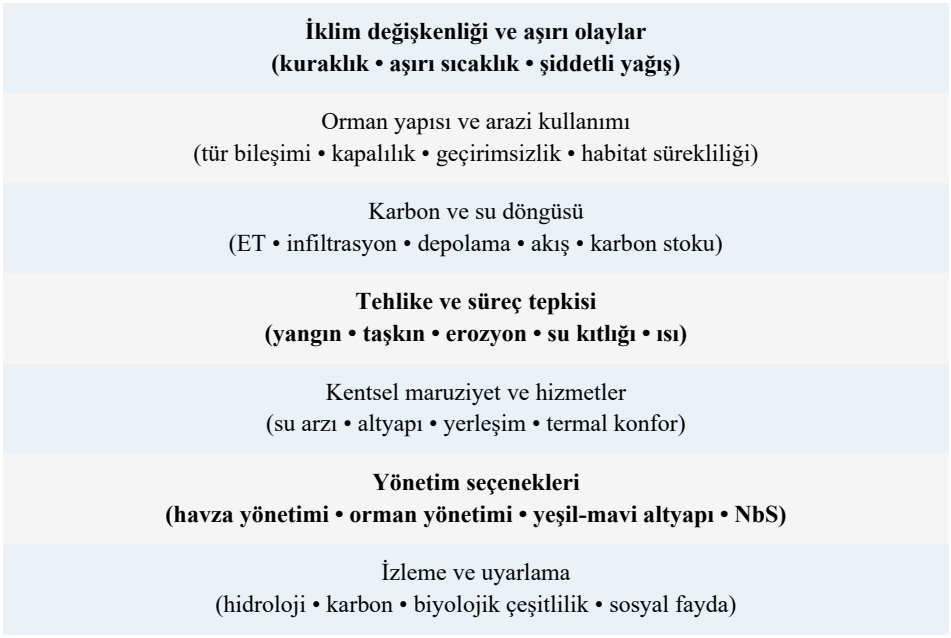
Yangın sonrası taşkın ve debris flow çalışmalarında yağışın şiddeti, süresi, zamansal dağılımı ve mekânsal değişkenliği temel belirleyiciler arasında yer almaktadır. Collar vd. (2024), yangın görmüş havzalarda yağış bilgisinin hidrolojik ve erozyonal modellerin temel girdilerinden biri olduğunu; özellikle yüksek şiddetli yağışların taşkın ve debris flow oluşumuyla yakından ilişkili

bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle yangın sonrası değerlendirmelerde yağış eşiği, havza eğimi, yanma şiddeti, drenaj ağı ve mansapta bulunan yerleşimlerin birlikte ele alınması, riskin daha bütüncül değerlendirilmesini sağlar.

2.3. Yangın Sonrası Havza Tepkisinin Süreç Temelli Okunması

Havza ölçeğinde süreç, basitleştirilmiş olarak şu zincir üzerinden okunabilir: yangın şiddeti ve bitki örtüsü kaybı, yüzey özelliklerini ve yağışın tutulma biçimini değiştirir; bu değişim infiltrasyon ve yüzeysel akış bileşenlerine yansır; akımın miktarı ve hızı sediment üretimi ve taşınımıyla birleştiğinde mansaptaki akarsu koridorları ve yerleşimler üzerinde yeni bir risk profili oluşabilir. Her yangın sonrasında aynı tepkinin ortaya çıkacağı varsayılmamalıdır. Toprak tipi, öncül nem, yanma şiddeti, eğim, yağış rejimi ve toparlanma süresi hidrolojik yanıtı belirleyen temel bağlamsal değişkenlerdir (Collar vd., 2024).

Bu süreç temelli yaklaşım, yangın yönetimi ile havza yönetimi arasında doğal bir bağlantı kurar. Yangın öncesinde orman yapısının ve yakıt sürekliliğinin yönetilmesi, yangın sonrasında ise toprağın korunması, akış yollarının izlenmesi, dere koridorlarının işlevlerinin sürdürülmesi ve yüksek riskli yağışlara yönelik erken değerlendirme yapılması birbirini tamamlayan uygulamalardır. Ekosistem temelli afet risk azaltımı literatürü, bitki örtüsü ve diğer ekosistem bileşenlerinin belirli tehlikelerin azaltılmasına katkı sağlayabildiğini; bununla birlikte etkinliğin ekosistem tipi ve yerel koşullara bağlı olduğunu göstermektedir (Sudmeier-Rieux vd., 2021).



Şekil 1. Orman-havza-kent sürekliliğinde iklim ve afet etkileşimlerinin kavramsal akışı.

3. Kentsel Ekosistem Hizmetleri ve Doğa Tabanlı Dirençlilik

3.1. Ormanların ve Kentsel Yeşil Alanların Çok İşlevli Rolü

Kent ormanları, parklar, korular, sulak alanlar, dere koridorları, yeşil kuşaklar ve diğer bitkilendirilmiş alanlar aynı anda birden fazla ekosistem hizmeti üretebilir. Yağış suyunun tutulması, gölgeleme, evapotranspirasyon, hava kalitesinin desteklenmesi, habitat oluşturma ve rekreasyon bu işlevlerden bazılarıdır. Kentsel ekosistem hizmetlerine ilişkin değerlendirmeler, bu işlevlerin kentsel yaşam kalitesi ve dirençlilikle ilişkilendirilmesinin planlama açısından önemli olduğunu göstermektedir (Haase vd., 2014; McPhearson vd., 2015).

Ormanlar açısından benzer bir çok işlevlilik havza ölçeğinde görülür. Orman örtüsü, yağışın intersepsiyonu, toprak koruma, suyun akış yolları ve mikroiklim üzerinde etkili olabilir; aynı zamanda karbonu biyokütle ve toprak havuzlarında depolar. Bununla birlikte bu hizmetlerin büyüklüğü ve yönü; iklim, topoğrafya, toprak, tür bileşimi, meşcere yapısı ve yönetim biçimine göre değişir. Orman ve ağaçların iklim uyumundaki rolünü inceleyen çalışmalar, ormanlı havzaların su ve toprak düzenleme işlevlerinin önemli olabileceğini, ancak ekosistem hizmetleri arasında bağlama bağlı ödünleşimlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Pramova vd., 2012).

Bu nedenle doğa tabanlı çözüm kavramı, yalnızca yeşil alan miktarını artırmakla eş anlamlı görülmemelidir. Uygulamanın ekolojik bağlama

uygunluğu, biyolojik çeşitlilik etkileri, su kullanımı, bakım ihtiyacı, uzun dönemli işlevsellik ve sosyal faydaların dağılımı birlikte değerlendirilmelidir. Seddon vd. (2020), özellikle düşük biyolojik çeşitlilik değerine sahip veya ekolojik bağlama uygun olmayan uygulamaların beklenen çoklu yararları sağlamayabileceğine dikkat çekmektedir. Benzer biçimde Bush ve Doyon (2019), doğa tabanlı çözümlerin zaman, mekân, işlev ve sosyal faydalar bakımından ödünleşimler içerebileceğini; planlamanın bu ödünleşimleri görünür kılmada önemli rol oynadığını göstermektedir.

3.2. Yağış Suyu Yönetimi ve Kentsel Isı Adası

Kentsel yüzeylerin geçirimsizleşmesi, yağışın toprağa sızdığı alanları azaltarak akışın daha kısa sürede drenaj sistemlerine ulaşmasına neden olabilir. Bu koşullarda yağmur bahçeleri, biyolojik hendekler, geçirgen yüzeyler, parklar, sulak alanlar ve bitkilendirilmiş dere koridorları; suyun tutulması, geciktirilmesi, sızdırılması veya kontrollü biçimde taşınması yoluyla gri altyapıyı tamamlayabilir. Sünger kent uygulamalarına ilişkin derlemeler, bu yaklaşımın kentsel taşkın yönetimi ile suyun yerinde tutulması ve yeniden kullanımını aynı sistem içinde ele alma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Han vd., 2023).

Yeşil alanların ikinci önemli işlevi termal düzenlemedir. Ağaç gölgesi ve evapotranspirasyon, yüzey ve hava sıcaklıklarının azaltılmasına katkıda bulunabilir. Ancak bu faydaların kent içinde her mahallede aynı düzeyde oluşması beklenmemelidir; ağaç örtüsü, yeşil alana erişim, yapılaşma biçimi ve sosyoekonomik özellikler sıcaklık maruziyetini farklılaştırabilir. Güncel bir kapsam incelemesi, kentsel sıcaklık ile yeşil alana erişimdeki eşitsizliklerin sağlık ve çevresel etkiler bakımından birlikte ele alınmasının önemini ortaya koymaktadır (Silva vd., 2026). Bu nedenle yeşil-mavi altyapı planlamasında yalnızca toplam alan değil, mekânsal dağılım ve erişilebilirlik de önemli bir performans ölçütüdür.

4. Kent-Havza İlişkisi ve Hidrolojik Dirençlilik

4.1. Kentsel Su Güvenliği ve Değişen Hidrolojik Koşullara Uyum

Bir kentin su güvenliği, şebeke ve depolama altyapısının yanı sıra suyun üretildiği havzanın hidrolojik işleyişine bağlıdır. Yağışın ne kadarının evapotranspirasyonla atmosfere döndüğü, ne kadarının toprak ve yeraltı suyu depolarına katıldığı ve ne kadarının akışa dönüştüğü; arazi örtüsü, iklim ve su kullanımıyla birlikte su arzının uzun dönemli karakterini belirler. Bu nedenle su güvenliğinin değerlendirilmesinde havza, yalnızca suyun toplandığı coğrafi alan

değil, doğal sermaye ile yapılı altyapının kesiştiği işlevsel sistem olarak ele alınmalıdır.

Bu çerçevede 'su iflası' (water bankruptcy) kavramı, geçici bir kuraklık veya dönemsel su açığından farklı bir durumu tanımlamak amacıyla önerilmiştir. Madani (2026), kavramı insan-su sistemlerinde uzun dönemli çekimlerin hidrolojik taşıma kapasitesini aşması, suya bağlı doğal sermayenin aşınması ve geçmiş koşullara dönüşün giderek güçleşmesi üzerinden tanımlamaktadır. Kavramın planlama açısından değeri, alarm üretmekten çok, su yönetiminde kısa dönemli arz açığı ile yapısal hidrolojik dengesizliği birbirinden ayırmaya yardımcı olmasıdır. Bu ayrım; su kayıplarının azaltılması, talep yönetimi, yeniden kullanım, kaynak çeşitlendirmesi ve havza ekosistemlerinin korunması gibi araçların birlikte değerlendirilmesini destekler.

4.2. Havza Su Bütçesi ve Kentsel Su Arzı

Havza hidrolojisinin temelinde kütlenin korunumu yer alır. Uzun veya kısa bir değerlendirme dönemi için sadeleştirilmiş su bütçesi şu biçimde ifade edilebilir:

$$\mathbf{P = ET + Q + \Delta S}$$

Burada P yağışı, ET evapotranspirasyonu, Q havzadan çıkan toplam akışı ve ΔS toprak nemi, yeraltı suyu, kar veya yüzey depolarındaki değişimi temsil eder. Bu eşitlik basit görünmekle birlikte kent-havza ilişkisini açıklamak için güçlü bir çerçeve sunar. Arazi örtüsü veya orman yapısındaki değişim, özellikle evapotranspirasyon, intersepsiyon, infiltrasyon ve depolama bileşenlerini etkileyerek akış rejimini değiştirebilir. Buna karşılık kentleşme, geçirimsiz yüzeylerin artışı yoluyla daha hızlı yüzeysel akış üretebilir. Dolayısıyla yukarı havzadaki orman yönetimi ile aşağı havzadaki kentsel yağış suyu yönetimi aynı su bütçesinin farklı mekânsal bileşenleri olarak düşünülmelidir.

Havza ölçeğinde dirençlilik, yalnızca yıllık toplam su miktarıyla ilgili değildir. Akımın mevsimselliği, taban akışının sürekliliği, pik debilerin büyüklüğü, kurak dönemlerin uzunluğu ve su kalitesi de kentlerin kullanabileceği suyun güvenilirliğini belirler. Rodriguez vd. (2023) tarafından havza çalışmaları üzerine yürütülen sistematik derleme, arazi kullanımı ve arazi örtüsü değişimlerinin özellikle hidrolojik düzenleme ve toprak erozyonunun kontrolü gibi düzenleyici ekosistem hizmetleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle arazi kullanım kararlarının, havza ölçeğinde üretilen ekosistem hizmetleriyle birlikte değerlendirilmesi önem taşır.

4.3. Orman Yönetiminde Karbon-Su Ödünleşimleri

Orman yönetiminin iklim ve su politikaları açısından en önemli özelliklerinden biri, karbon ve su döngülerinin birbirinden bağımsız olmamasıdır. Ağaçların büyümesi için gerçekleşen gaz değişimi ve evapotranspirasyon, karbon kazanımı ile su kullanımını aynı fizyolojik süreçler üzerinden birbirine bağlar. Bu nedenle ormanlarda karbon stokunu veya üretimi artırmaya yönelik bir uygulamanın su verimi üzerindeki etkisi, tür, yaş, kapalılık, iklim ve toprak koşullarına göre değişebilir. Orman su kullanım etkinliğine ilişkin güncel sentezler, iklim ve yönetimin karbon-su eşleşmesini önemli ölçüde etkileyebildiğini ve seyreltme gibi müdahalelerin bu ilişkiyi değiştirebildiğini göstermektedir (Zhang vd., 2023).

Türkiye'de eşleştirilmiş deney havzalarında yürütülen uzun dönemli bir çalışma, bu ödünleşimi somut biçimde göstermektedir. Özkan vd. (2025), %11 ve %18 düzeyindeki hafif seyreltmeler sonrasında uygulama havzasında dört yıllık dönemde yaklaşık 25 mm/yıl ek su verimi gözlendiğini; buna karşılık kaldırılan biyokütle nedeniyle karbon stoklarındaki azalmanın daha uzun süre devam ettiğini bildirmiştir. Bu sonuç, 'karbon açısından en yüksek' ve 'su verimi açısından en yüksek' seçeneğin her zaman aynı yönetim alternatifi olmayabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla iklim dirençli orman yönetiminde amaç tek bir ekosistem hizmetini maksimize etmekten çok, karbon depolama, su üretimi, biyolojik çeşitlilik ve afet dirençliliği arasında bağlama uygun bir denge kurmaktır (Özkan vd., 2025; Zhang vd., 2023).

Bu yaklaşım ağaçlandırma ve restorasyon için de geçerlidir. Tür seçimi, dikim sıklığı, yaş yapısı ve hedeflenen kapalılık; karbon birikimi kadar su kullanımı ve kuraklık hassasiyeti üzerinde de etkili olabilir. Bu nedenle restorasyon başarısının yalnızca dikilen ağaç sayısı veya kısa dönemli biyokütle artışı üzerinden değil, havza su bütçesi, ekosistem bütünlüğü ve uzun dönemli işlevsellik üzerinden izlenmesi daha sağlıklı bir değerlendirme sağlar (Seddon vd., 2020; Calfapietra vd., 2025).

5. Arazi Bozulumu, Mekânsal Planlama ve Eşgüdüm

5.1. Arazi Bozulumunun Kentsel ve Bölgesel Etkileri

Arazi bozulumunun etkileri, meydana geldiği parselin sınırlarında kalmaz. Toprağın kapatılması, sıkışması, erozyon veya kirlenme; infiltrasyon, su depolama, biyolojik aktivite ve kirleticilerin taşınması gibi süreçleri etkileyebilir. Kentsel alanlardaki arazi bozulumunu inceleyen Ferreira vd. (2018), toprak mühürlenmesi ve sıkışmasının ekosistem hizmetlerini sınırlayabildiğini; kentleşmenin hidrolojik süreçler ve su kalitesi üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiğini göstermektedir. Bu nedenle arazi bozulumu, kent içi toprak

yönetimi ile havza ölçeğindeki su ve sediment süreçlerini birbirine bağlayan bir planlama konusu olarak ele alınmalıdır.

Restorasyon ve doğa tabanlı çözümler açısından toprak sağlığı da kritik bir bileşendir. Calfapietra vd. (2025), doğa tabanlı çözümlerin başarısının değerlendirilmesinde toprak göstergelerinin ve uzun dönemli izlemenin önemini vurgulamaktadır. Bu yaklaşım, kent içindeki yağmur bahçesinden havza ölçeğindeki ekosistem restorasyonuna kadar farklı uygulamalarda aynı temel ilkeye işaret eder: uygulama tasarımı kadar, toprağın süreç üretme kapasitesinin korunması ve izlenmesi de önemlidir.

5.2. Türkiye'de Bütünleşik Mekânsal Planlama İçin Uygulama Çerçevesi

Türkiye'de orman-kent arayüzleri ve kent-havza ilişkileri, özellikle Akdeniz ikliminin görüldüğü alanlarda yangın, kuraklık, aşırı sıcaklık ve şiddetli yağış gibi farklı tehlikelerin aynı peyzajda ele alınmasını gerektiren zengin bir uygulama alanı sunmaktadır. Bu durum bir sorun listesi oluşturmaktan çok, ormancılık, havza yönetimi, kent planlama, afet yönetimi ve iklim uyumu disiplinlerinin ortak göstergeler ve mekânsal veri setleri üzerinden birlikte çalışabilmesi için güçlü bir fırsat yaratmaktadır.

Bütünleşik yaklaşımda orman sınırı, dere koridoru, su toplama havzası, yerleşim dokusu, tahliye güzergâhı ve yeşil-mavi altyapı birbirinden kopuk katmanlar olarak değil, aynı peyzajın işlevsel bileşenleri olarak değerlendirilir. Bu yaklaşım, doğa tabanlı çözümlerin kentsel planlamaya entegrasyonunu inceleyen çalışmalarla uyumludur. Bush ve Doyon (2019), mekânsal planlamanın doğa tabanlı çözümlerin çok işlevliliğini ve ödünleşimlerini yönetmede önemli bir araç olabileceğini göstermektedir. Böyle bir çerçeve, mevcut planlama ve yönetim araçlarını değiştirmekten çok, aralarındaki bilgi akışını ve mekânsal tutarlılığı güçlendirmeyi hedefler.

6. Net Sıfır Kentler ve Doğal Karbon Yutakları

6.1. Ormanların ve Yeşil Alanların Karbon Dengesindeki Rolü

Ormanlar küresel karbon döngüsünün temel bileşenlerinden biridir. Pan vd. (2011), ormanların küresel ölçekte önemli bir karbon yutağı oluşturduğunu göstermiştir. Kent çevresindeki ormanlar ile kent içindeki ağaçlık alanlar ve yeşil koridorlar, karbon depolamanın yanında mikroiklim düzenleme, yağış suyu yönetimi, habitat sağlama ve rekreasyon gibi ek faydalar üretebilir. Bu çok işlevlilik, doğal yutakların iklim politikalarındaki değerini yalnızca depolanan karbon miktarına indirgememek gerektiğini gösterir.

Bununla birlikte biyolojik karbon depoları kalıcı ve değişmez yapılar değildir. Yangın, kuraklık, böcek ve hastalıklar ağaç büyümesini azaltabilir, mortaliteyi

artırabilir ve depolanmış karbonun bir bölümünün yeniden atmosfere dönmesine yol açabilir. Doğal bozulmalar ile iklim değişikliği arasındaki ilişkiyi inceleyen Dye vd. (2024), orman karbonunun uzun dönemli kararlılığının bozulma rejimleri, meşcere yapısı ve iklim koşullarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Bu nedenle doğal karbon yutakları, emisyon azaltımının yerine geçen sınırsız bir dengeleme mekanizması olarak değil, ekosistemlerin korunması ve dirençliliğinin güçlendirilmesiyle birlikte değerlendirilen tamamlayıcı bir iklim bileşeni olarak görülmelidir (Seddon vd., 2020; Dye vd., 2024).

6.2. Karbon Kalıcılığı ve Bozulma Riski

Karbon yönetiminde yalnızca stok miktarı değil, stokun zaman içindeki dayanıklılığı da önemlidir. Yüksek karbon yoğunluğuna sahip bir orman, aynı zamanda yangın veya kuraklık karşısında yüksek kayıp olasılığı taşıyorsa, planlama açısından 'karbon kalıcılığı' ayrıca değerlendirilmelidir. Dye vd. (2024), doğal bozulmaların karbon depolama ve sekestrasyon üzerindeki etkilerini; olayın türü, şiddeti, sıklığı ve iklim koşullarıyla ilişkili bir risk alanı olarak ele almaktadır. Bu yaklaşım, yangın yönetimi ile karbon yönetimini birbirine bağlayan önemli bir ortak zemindir.

Kalıcılık perspektifi, orman yönetiminde tek hedefli optimizasyon yerine dirençlilik odaklı bir yaklaşımı destekler. Tür ve yaş çeşitliliği, yangına ve kuraklığa uyum, yakıt yapısı, yenilenme kapasitesi ve havza koşulları; karbon stokunun uzun dönemde korunmasını etkileyebilir. Böylece karbon muhasebesi, yalnızca belirli bir tarihteki stokun ölçülmesinden çıkarak stokun gelecekteki bozulmalara karşı dayanıklılığını da içeren daha kapsamlı bir değerlendirmeye dönüşür.

6.3. Belediye Sınırlarından Havza ve Peyzaj Ölçeğine

Kentlerin emisyon envanterleri idari sınırlar üzerinden hazırlanabilir; ancak su, habitat bağlantısı, yangın rejimi ve birçok ekosistem hizmeti bu sınırlarla örtüşmez. Bu nedenle iklim dirençliliği açısından belediye sınırı ile işlevsel ekolojik sınırların birlikte okunması yararlıdır. Özellikle içme suyu havzaları, orman-kent arayüzleri ve bölgesel ekolojik koridorlar, kentlerin kendi sınırları dışında gerçekleşen fakat kent yaşamını doğrudan etkileyen süreçleri görünür kılar. Çok düzeyli iklim uyumu literatürü de ulusal, bölgesel ve yerel ölçekler arasındaki bağlantının kentsel uyum kapasitesinin önemli bileşenlerinden biri olduğunu göstermektedir (Brunetta ve Caputo, 2026).

7. Rio Sinerjileri ve Çok Düzeyli Yönetişim

7.1. İklim, Biyolojik Çeşitlilik ve Arazi Gündemlerinin Birlikte Okunması

İklim değişikliği, biyolojik çeşitlilik kaybı ve arazi bozulumu farklı bilimsel ve kurumsal alanlar üzerinden ele alınsa da aynı peyzajda birbirini etkileyen süreçlerdir. Orman restorasyonu, örneğin, aynı anda karbon, habitat, toprak ve su üzerinde sonuç üretebilir. Bu nedenle uygulama düzeyinde bir hedefe yönelik müdahalenin diğer ekosistem hizmetleri üzerindeki etkilerinin de izlenmesi önemlidir. Rio Sözleşmelerinin eylem gündemlerini karşılaştıran Folkard-Tapp vd. (2026), iklim, biyolojik çeşitlilik ve arazi alanlarındaki eylemlerin tamamlayıcılık, iş birliği, kapsayıcılık ve güvenilirlik ilkeleri üzerinden daha güçlü biçimde ilişkilendirilebileceğini göstermektedir.

Bu bölümün orman-havza-kent yaklaşımı, söz konusu bütünleşmeyi yerel ölçekte somutlaştıran bir örnek sunar. Bir dere koridorunun restorasyonu taşkın azaltımı, habitat sürekliliği ve termal konfor açısından birlikte değerlendirilebilir; bir orman yönetimi müdahalesi karbon, su verimi ve yangın dirençliliği açısından eş zamanlı olarak izlenebilir. Böylece farklı çevresel hedefler birbirine rakip gündemler olarak değil, aynı mekânsal sistemde ortak göstergelerle değerlendirilebilecek tamamlayıcı amaçlar hâline gelir.

7.2. Planlama, Veri ve Çok Düzeyli Yönetişim

Bütünleşmenin uygulamadaki karşılığı, farklı yönetim düzeylerinde üretilen verilerin ve planların birbirini desteklemesidir. Çok düzeyli iklim uyumu çalışmalarında ulusal stratejiler, bölgesel planlar, yerel uyum eylemleri ve sektörel politikalar arasındaki bağlantıların uyum kapasitesini etkilediği görülmektedir (Brunetta ve Caputo, 2026). Orman-havza-kent bağlamında bu bağlantı; ortak mekânsal veri altyapısı, izleme göstergeleri, risk haritaları ve yatırım önceliklerinin birbirini tamamlaması şeklinde kurulabilir.

Buradaki amaç tek tip bir yönetim modeli önermek değildir. Havzalar, kentler ve orman ekosistemleri farklı ekolojik ve kurumsal özelliklere sahiptir. Daha işlevsel yaklaşım, her ölçeğin kendi yetki ve bilgisini korurken, ortak sorunlarda veri ve hedef uyumunu güçlendirmektir. Doğa tabanlı çözüm literatüründeki bağlama uygunluk ve çok işlevlilik ilkeleri de aynı yönde bir çerçeve sunmaktadır (Bush ve Doyon, 2019; Seddon vd., 2020).

8. Türkiye İçin Bilimden Uygulamaya Geçiş Perspektifi

Türkiye açısından orman-kent ve kent-havza ilişkilerinin birlikte ele alınması, mevcut ormancılık, su yönetimi, mekânsal planlama ve afet risk azaltma çalışmalarının ortak bir mekânsal çerçevede buluşturulmasına katkı sağlayabilir.

Özellikle orman-kent arayüzlerinin haritalanması, içme suyu havzalarının hidrolojik göstergelerle izlenmesi, yangın sonrası riskli alt havzaların belirlenmesi ve yeşil-mavi altyapının kent içindeki dağılımının değerlendirilmesi; farklı kurumların yürüttüğü çalışmaları tamamlayabilecek ortak bilgi katmanları oluşturabilir.

Uygulamada dört ilke öne çıkmaktadır. Birincisi, risk değerlendirmesinin tehlike haritalarıyla sınırlı kalmayıp havza süreçleri ve kentsel maruziyeti birlikte içermesidir. İkincisi, doğa tabanlı çözümlerin performansının su, karbon, biyolojik çeşitlilik ve sosyal faydalar bakımından birlikte izlenmesidir. Üçüncüsü, orman yönetiminde karbon-su ödünleşimlerinin havza ölçeğinde değerlendirilmesidir. Dördüncüsü ise doğal karbon yutaklarının miktarı kadar bozulmalara karşı kalıcılığının da izleme sistemine dâhil edilmesidir. Bu ilkelerin ortak özelliği, yeni ve bağımsız bir planlama katmanı oluşturmaktan çok mevcut planlama süreçleri arasında bilimsel bağ kurmaya dayanmasıdır.

Bu çerçevede üniversiteler ve araştırma kurumları; uzaktan algılama, saha izleme, hidrolojik modelleme, karbon modelleme ve ekosistem hizmeti değerlendirmelerini yerel karar süreçlerine aktarabilecek önemli bilgi ortaklarıdır. Uygulayıcı kurumların saha deneyimi ile akademik izleme ve modelleme kapasitesinin birlikte kullanılması, müdahalelerin yalnızca tasarım aşamasında değil, uygulama sonrasında da değerlendirilebilmesini sağlar. Böylece dirençlilik, tek seferlik bir proje çıktısı olmaktan çıkarak izleme, öğrenme ve uyarlamaya dayanan sürekli bir yönetim sürecine dönüşür.

Tablo 1. Orman-havza-kent sisteminde başlıca süreçler ve tamamlayıcı yönetim seçenekleri.

Süreç / tehlike	Havza veya ekosistem mekanizması	Kentsel yansıma	Tamamlayıcı yönetim yaklaşımı
Kuraklık	ET, toprak nemi, taban akışı ve depolama bileşenlerinde değişim	Su arzı güvenilirliğinin azalması, sıcaklık baskısı	Havza su bütçesi, talep yönetimi, ekosistem restorasyonu
Orman yangını	Bitki örtüsü ve yüzey özelliklerinde değişim; yangın sonrası akış ve sediment tepkisi	WUI maruziyeti; sonraki yağışlarda taşkın ve sediment riski	Yangın öncesi orman/yakıt yönetimi, yangın sonrası havza izleme
Şiddetli yağış	Pik akımın ve yüzeysel akışın artması	Kentsel taşkın ve drenaj yükü	Dere koridorları, geçirgen yüzeyler, yağmur bahçeleri, sünger kent
Kentleşme	Toprak mühürlenmesi, infiltrasyon alanının azalması	Daha hızlı yüzeysel akış, ısı adası ve ekosistem hizmeti kaybı	Yeşil-mavi altyapı, toprak koruma, mekânsal bağlantı
Orman yönetimi	ET, su verimi, biyokütle ve karbon stoklarında değişim	Su güvenliği ve bölgesel karbon dengesi üzerinde dolaylı etki	Karbon-su ödünleşimi odaklı havza ölçekli planlama
Doğal bozulmalar	Yangın, kuraklık, böcek ve hastalıklarla karbon stoklarının kararlılığında değişim	Doğal yutakların uzun dönemli güvenilirliğinde azalma	Karbon kalıcılığı, dirençli meşcere yapısı ve uzun dönem izleme

9. Sonuç ve Değerlendirme

Orman-kent arayüzleri, kentleşme ile doğal süreçlerin en yoğun biçimde kesiştiği peyzajlardır. Yangın, kuraklık, şiddetli yağış ve sıcaklık gibi iklim tehlikeleri bu alanlarda arazi kullanımı, ekosistem yapısı ve kentsel maruziyetle birlikte etkili olur. Bu nedenle dirençlilik planlamasının temel sorusu yalnızca 'hangi tehlike oluşabilir?' değil, 'bu tehlike orman-havza-kent sistemi boyunca hangi süreçleri harekete geçirir?' olmalıdır. Bu süreç temelli bakış, yangın sonrası

taşkından su kıtlığına, karbon kalıcılığından kentsel ısıya kadar farklı konuların aynı analitik çerçevede ele alınmasını sağlar.

Ormanlar ve kentsel yeşil-mavi altyapı bu sistemin çok işlevli doğal bileşenleridir. Ancak sağladıkları faydalar bağlama bağlıdır. Özellikle karbon ve su arasında ortaya çıkabilen ödünleşimler, orman yönetiminde tek bir ekosistem hizmetinin maksimize edilmesinin her zaman en dirençli sonuç olmayacağını göstermektedir. Eşleştirilmiş havza çalışmaları ve güncel karbon-su literatürü, yönetim kararlarının su verimi, karbon stoku ve ekosistem dayanıklılığı birlikte değerlendirilerek verilmesinin önemini ortaya koymaktadır (Özkan vd., 2025; Zhang vd., 2023).

Sonuç olarak orman-havza-kent sürekliliği; iklim uyumu, afet risk azaltımı, su güvenliği, karbon yönetimi ve ekosistem hizmetleri arasında ortak bir bilimsel dil kurulmasına olanak tanır. Bu yaklaşım herhangi bir kurum veya planlama aracını ikame etmekten çok, farklı uygulama alanlarının birbirini tamamlamasını hedefler. Havza su bütçesinin, yangın sonrası hidrolojik tepkinin, karbon kalıcılığının ve doğa tabanlı çözümlerin çoklu yararlarının ortak göstergeler üzerinden izlenmesi; net sıfır, iklim dirençli ve doğa ile uyumlu kentler için daha tutarlı bir uygulama zemini sağlayabilir.

Kaynakça

Brunetta, G., & Caputo, M. (2026). Multilevel governance of urban climate adaptation in the European Union: An overview. Urban Science, 10(1), 50. https://doi.org/10.3390/urbansci10010050

Bush, J., & Doyon, A. (2019). Building urban resilience with nature-based solutions: How can urban planning contribute? Cities, 95, 102483. https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102483

Calfapietra, C., Di Lonardo, S., Peruzzi, E., Doni, S., & Masciandaro, G. (2025). Perspectives from nature-based solutions to restore soil and ecosystems. European Journal of Soil Science, 76(6), e70134. https://doi.org/10.1111/ejss.70134

Chen, B., Wu, S., Jin, Y., Song, Y., Wu, C., Venevsky, S., Xu, B., Webster, C., & Gong, P. (2024). Wildfire risk for global wildland–urban interface areas. Nature Sustainability, 7(4), 474–484. https://doi.org/10.1038/s41893-024-01291-0

Collar, N. M., Moody, J. A., & Ebel, B. A. (2024). Rainfall as a driver of post-wildfire flooding and debris flows: A review and synthesis. Earth-Science Reviews, 260, 104990. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104990

Dye, A. W., Houtman, R. M., Gao, P., Anderegg, W. R. L., Fettig, C. J., Hicke, J. A., Kim, J. B., Still, C. J., Young, K., & Riley, K. L. (2024). Carbon, climate, and natural disturbance: A review of mechanisms, challenges, and tools for understanding forest carbon stability in an uncertain future. Carbon Balance and Management, 19, 35. https://doi.org/10.1186/s13021-024-00282-0

Ferreira, C. S. S., Walsh, R. P. D., & Ferreira, A. J. D. (2018). Degradation in urban areas. Current Opinion in Environmental Science & Health, 5, 19–25. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.001

Folkard-Tapp, H., Chan, S., Reyes de la Lanza, S., & Pettorelli, N. (2026). Assessing the robustness of the Action Agendas of the Rio Conventions. Frontiers in Environmental Science, 14, 1698286. https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1698286

Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., Wurster, D., & Elmqvist, T. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. Ambio, 43(4), 413–433. https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0

Han, J., Wang, C., Deng, S., & Lichtfouse, E. (2023). China's sponge cities alleviate urban flooding and water shortage: A review. Environmental Chemistry Letters, 21(3), 1297–1314. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01559-x

Madani, K. (2026). Water bankruptcy: The formal definition. Water Resources Management, 40, 78. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04484-0

McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T., & Frantzeskaki, N. (2015). Resilience of and through urban ecosystem services. Ecosystem Services, 12, 152–156. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012

Özkan, U., Serengil, Y., Çeler, E., Gökbulak, F., Yurtseven, İ., Uygur Erdoğan, B., & Sağlam, R. (2025). Thinning impacts on carbon and water budgets in a temperate deciduous forest ecosystem. Croatian Journal of Forest Engineering, 46(1), 77–91. https://doi.org/10.5552/crojfe.2025.2166

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 333(6045), 988–993. https://doi.org/10.1126/science.1201609

Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H., & Somorin, O. A. (2012). Forests and trees for social adaptation to climate variability and change. WIREs Climate Change, 3(6), 581–596. https://doi.org/10.1002/wcc.195

Rodriguez, B. C., Palma-Torres, V. M., Castañeda, T. J. E., Codtiyeng, S. K., Castillo, J. F., Sasi, A. P. V., Tercero, M. U., & Andrada, R. T. (2023). Drivers and impacts of land use and land cover changes on ecosystem services provided by the watersheds in the Philippines: A systematic literature review. International Forestry Review, 25(4), 473–490. https://doi.org/10.1505/146554823838028201

Schug, F., Bar-Massada, A., Carlson, A. R., Cox, H., Hawbaker, T. J., Helmers, D., Hostert, P., Kaim, D., Kasraee, N. K., Martinuzzi, S., Mockrin, M. H., Pfoch, K. A., & Radeloff, V. C. (2023). The global wildland–urban interface. Nature, 621(7977), 94–99. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06320-0

Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C. A. J., Smith, A., & Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 375(1794), 20190120. https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0120

Silva, M. B., Bressane, A., Almendra, R., Lyra, A. M. G. C., & Machado, V. M. (2026). Urban heat riskscape and green injustice: A scoping review of health and environmental impacts. Urban Forestry & Urban Greening, 118, 129305. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2026.129305

Sudmeier-Rieux, K., Arce-Mojica, T., Boehmer, H. J., Doswald, N., Emerton, L., Friess, D. A., Galvin, S., Hagenlocher, M., James, H., Laban, P., Lacambra, C., Lange, W., McAdoo, B. G., Moos, C., Mysiak, J., Narvaez, L., Nehren, U., Peduzzi, P., Renaud, F. G., & Walz, Y. (2021). Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. Nature Sustainability, 4(9), 803–810. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00732-4

Zhang, Z., Zhang, L., Xu, H., Creed, I. F., Blanco, J. A., Wei, X., Sun, G., Asbjornsen, H., & Bishop, K. (2023). Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. Forest Ecology and Management, 534, 120853. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120853

5. Bölüm

Orman Ürünleri Sektöründe Odun Açığını Kapatmak *Arz Güvenliği, Döngüsel Kullanım ve Ekosistem Hizmetleri Bağlamında Bir Değerlendirme*

Hikmet YAZICI[1], Vedat HEKİMOĞLU[2]; Hakan ÇETİN[3]

Öz

Orman ürünlerine yönelik talep artışı, ormanların yalnızca odun hammaddesi sağlayan alanlar olarak değil, aynı zamanda karbon depolayan, su rejimini düzenleyen, biyolojik çeşitliliği destekleyen ve rekreasyon olanakları sunan ekosistemler olarak yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bölüm, yüklenen taslak metindeki "odun açığını kapatma" tartışmasını güncel bilimsel ve kurumsal kaynaklarla yeniden yapılandırmaktadır. Temel sav, odun açığının yalnızca yeni tomruk kaynakları bularak veya ithalatı artırarak çözülemeyeceğidir. Daha dayanıklı çözüm; sürdürülebilir arzın sınırları içinde üretim verimliliğinin artırılması, ürün ömrünün uzatılması, atık odunun kaskad biçimde değerlendirilmesi, ithalatta biyogüvenliğin sağlanması ve pazar dışı ekosistem hizmetlerinin karar süreçlerine dâhil edilmesinden oluşan bileşik bir politika yaklaşımıdır.

Anahtar kelimeler: odun açığı, sürdürülebilir orman yönetimi, tomruk ticareti, biyogüvenlik, ekosistem hizmetleri, ekonomik değerleme, döngüsel ekonomi, kaskad kullanım.

[1] Doç.Dr., ZBEÜ Çaycuma MYO Tasarım Bölümü ORCID: (000-0002-9522-9283)
[2] Öğr. Gör ZBEÜ Çaycuma MYO Ormacılık Bölümü ORCID: (0000-0003-4088-0762)
[3] Öğr. Gör. ; ZBEÜ Çaycuma MYO Tasarım Bölümü ORCID (0000-0002-1969-4941)

1. Giriş:

"Odun açığı" ifadesi, farklı ölçüm düzeylerini birbirine karıştırmaya elverişlidir. Fiziksel açık, belirli bir dönemde yurt içi arzın talebi karşılayamaması anlamına gelir. Kalite açığı, toplam hacim yeterli olsa bile belirli çap, tür, rutubet, dayanım veya standarda sahip malzemenin bulunamamasını ifade eder. İşleme açığı ise tomruğun kereste, panel, lif veya mühendislik ürünü hâline dönüştürülmesindeki kapasite, verim ve lojistik yetersizliklerden kaynaklanır. Ekonomik açık, ürünün fiziksel olarak mevcut olmasına rağmen maliyetinin kullanıcılar bakımından karşılanamaz hâle gelmesidir. Bu nedenle doğru politika sorusu "daha fazla tomruk nereden bulunabilir?" değil, "aynı toplumsal ve sanayi işlevi daha düşük birincil odun kullanımıyla nasıl sağlanabilir?" sorusudur.

Yüklenen taslak metin, ormanların pazar dışı faydalarının ekonomik değerlenmesini ve tomruk ithalatı seçeneklerini birlikte ele almaktadır. Bununla birlikte taslakta 2020 lı yıllara ait Yeni Zelanda, Şili ve Rusya ticaret verileri güncelmiş gibi sunulmakta; bazı ülke ve tür adları bilimsel adlandırma kurallarına uygun kullanılmamakta; ayrıca "pazarı olmayan mal" kavramı tekrarlarla ve yer yer kavramsal belirsizliklerle işlenmektedir. Bu bölümde tarihsel örnekler yalnızca dönemin düşünsel arka planını göstermek için kullanılmakta, güncel durum için FAO, OGM, IPPC ve Birleşmiş Milletler'in güncel çerçeveleri esas alınmaktadır [4] [5].

2. Türkiye'de odun arzının yönetimsel çerçevesi

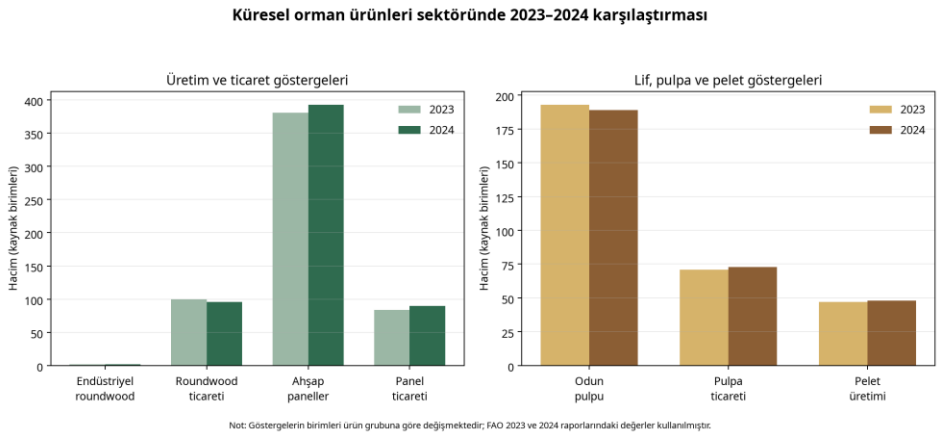
Türkiye'de odun arzı, orman amenajman planları, silvikültürel müdahaleler, koruma statüleri, yangın ve iklim riski, üretim maliyetleri, ulaşılabilirlik ve odun işleyen sanayinin kalite talebi birlikte değerlendirilerek ele alınmalıdır. Orman Genel Müdürlüğü, ormancılık istatistikleri ile üretim, satış ve stok faaliyetlerini yayımlayan temel ulusal veri kaynağıdır. Bu kaynaklar kullanılırken üretim, dikili hacim, piyasaya arz edilen hacim, ithalat, ihracat ve sanayinin gerçek tüketiminin aynı kavramlar olmadığı özellikle belirtilmelidir.

Arz açığını kapatmaya dönük herhangi bir ulusal strateji, öncelikle fiziksel ve ekonomik muhasebeyi birleştirmelidir. Fiziksel muhasebe, orman alanı, yıllık artım, planlanan üretim, gerçekleşen üretim, ürün sınıfı, fire, stok ve geri kazanılmış odun akımlarını izler. Ekonomik muhasebe ise ürün fiyatlarını, üretim ve taşıma maliyetlerini, ithalatın döviz ve lojistik risklerini, karbon maliyetlerini ve ekosistem hizmetlerinin fırsat maliyetlerini dikkate alır. Bu iki muhasebe birbirinin yerine geçmez; birlikte kullanıldıklarında karar kalitesini artırırlar.

Türkiye bakımından özellikle üç ayrım önemlidir. Birincisi, ormandaki biyolojik artım ile sanayinin istediği nitelikteki tomruk hacmi aynı değildir. İkincisi, her teknik olarak üretilebilir hacim, ekolojik ve hukuki bakımdan üretime açılabilir değildir. Üçüncüsü, ithal tomruk kısa vadede fiyat veya miktar baskısını azaltabilse bile taşıma, kur, liman, karantina, salgın ve tedarikçi ülke politikaları bakımından yeni riskler üretir. Bu sebeple ithalat, arz güvenliği politikasının tamamı değil, koşullara bağlı araçlarından biri olarak değerlendirilmelidir.

3. Küresel eğilimler: Üretim artarken ticaret neden aynı yönde hareket etmeyebilir?

FAO'nun 2023 verilerine göre küresel endüstriyel roundwood üretimi 1,92 milyar m³'e, küresel roundwood ticareti ise 100 milyon m³'e gerilemiştir. Aynı yıl ahşap panel üretimi 381 milyon m³ olmuş, panel ticareti 84 milyon m³'e düşmüştür [3]. FAO'nun 2024 verileri endüstriyel roundwood üretiminin 1,96 milyar m³'e yükseldiğini, fakat roundwood ticaretinin 96 milyon m³'e gerilediğini göstermektedir. Ahşap panel üretimi 393 milyon m³'e, panel ticareti 90 milyon m³'e çıkmıştır [2].



Şekil 1. Küresel orman ürünleri sektöründe 2023–2024 karşılaştırması.

Bu şekil iki sonucu birlikte ortaya koymaktadır. İlk olarak, küresel orman ürünleri ekonomisi yalnızca tomruk ticaretinden oluşmamaktadır; paneller, lif, pulpa, geri kazanılmış kâğıt, pelet ve mühendislik ürünü ahşaplar giderek daha önemli hâle gelmektedir. İkinci olarak, tomruk ticaretinin azalması mutlaka odun talebinin azaldığı anlamına gelmez. Ülkeler tomruk yerine kereste, panel veya işlenmiş ürün ithal ederek işleme faaliyetlerinin bir bölümünü kaynak

ülkeye kaydırabilir. Bu nedenle Türkiye'nin hedefi yalnızca tomruk tedarikini artırmak değil, sanayinin ihtiyaç duyduğu nitelikli ürünü en düşük toplam çevresel ve ekonomik maliyetle sağlamaktır.

Şekil1'de küresel orman ürünleri sektöründe seçilmiş üretim ve ticaret göstergelerinin 2023 ve 2024 yıllarındaki değişimini göstermektedir. Sol panelde yer alan göstergelere göre endüstriyel yuvarlak odun üretimi her iki yılda da oldukça düşük bir düzeyde kalırken, yuvarlak odun ticaretinde 2024 yılında sınırlı bir gerileme görülmektedir. Buna karşılık ahşap panel üretimi 2024 yılında 2023'e kıyasla artmış, panel ticareti de hafif bir yükseliş göstermiştir. Sağ panelde ise odun hamuru üretiminin 2024 yılında bir miktar azaldığı, selüloz ticaretinin ve pelet üretiminin ise sınırlı ölçüde arttığı görülmektedir. Genel olarak grafikler, 2023–2024 döneminde küresel orman ürünleri sektöründe göstergelerin aynı yönde değişmediğini; bazı ürün gruplarında artış, bazılarında ise yatay seyir veya sınırlı gerileme yaşandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, küresel orman ürünleri piyasasında ürün gruplarına göre farklılaşan üretim ve ticaret eğilimlerinin bulunduğuna işaret etmektedir. Değerler, şeklin altında belirtilen FAO verileri esas alınarak yaklaşık olarak gösterilmiştir.

Grafik, seçilmiş orman ürünlerinde üretim ve ticaret göstergelerinin 2023 ve 2024 yıllarındaki seyrini karşılaştırmaktadır. 2024 yılında ahşap panel üretimi ve ticaretinde artış görülürken, yuvarlak odun ticareti ile odun hamuru üretiminde sınırlı gerileme meydana gelmiştir. Selüloz ticareti ve pelet üretimi ise küçük artışlar göstermiştir. Bulgular, küresel orman ürünleri sektöründeki değişimlerin ürün gruplarına göre farklılaştığını ve sektör genelinde tek yönlü bir eğilim bulunmadığını göstermektedir. Veriler FAO kaynaklı olup değerler yaklaşık olarak sunulmuştur.

Şekil 1'deki karşılaştırma, küresel orman ürünleri piyasasında 2023–2024 döneminde farklı ürün gruplarının farklı eğilimler sergilediğini göstermektedir. Ahşap panel üretimi ve panel ticaretindeki artış, işlenmiş orman ürünlerine yönelik üretim ve ticaret kapasitesinin güçlendiğine işaret ederken, yuvarlak odun ticaretindeki sınırlı düşüş ham odun ticaretinde daha temkinli bir görünüm olduğunu ortaya koymaktadır. Odun hamuru üretimindeki gerilemeye karşın selüloz ticareti ve pelet üretimindeki küçük artışlar, lif bazlı ürünlerde ve biyokütleye dayalı enerji ürünlerinde piyasa dinamiklerinin farklılaştığını göstermektedir. Bu nedenle küresel orman ürünleri sektöründeki gelişmeler değerlendirilirken yalnızca toplam üretim miktarına değil, ürünlerin işlenme düzeyine, kullanım alanına ve ticaret eğilimlerine de birlikte bakılması gerekmektedir.

Şekil 1'de yuvarlak odun ticaretinde 2024 yılında sınırlı bir gerileme görülmektedir. FAO'nun küresel verilerine göre de endüstriyel yuvarlak odun üretimi 2024'te yaklaşık yüzde 2 artarken, uluslararası ticareti yaklaşık yüzde 1 azalmıştır. Bu durum, üretimin artmasına rağmen ülkelerin ham odunu dış pazarlara sunmak yerine kendi sanayilerinde kullanma eğiliminin güçlenebileceğini göstermektedir. ürkiye bakımından bu eğilim, ithal tomruğa dayalı bir arz stratejisinin daha kırılgan hâle gelmesi anlamına gelebilir. Tedarikçi ülkelerin ihracat kısıtlamaları getirmesi, taşıma maliyetlerinin yükselmesi, jeopolitik riskler veya döviz kurundaki dalgalanmalar, ithalat yoluyla kapatılmak istenen odun açığını pahalılaştırabilir. Ayrıca küresel ticarete konu olan yuvarlak odun miktarının azalması, Türkiye'nin uygun kalite ve türde hammadde bulmasını zorlaştırabilir.

Buna karşılık bu gelişme, yerli odun arzının daha verimli kullanılmasını teşvik edebilir. Türkiye'de kamu ormanlarından sağlanan üretimin planlı biçimde artırılması ve sanayinin daha çok yerli hammaddeyle beslenmesi, ithalata bağımlılığı azaltabilir. Strateji ve Bütçe Başkanlığı raporunda Türkiye'de 2022 yılı itibarıyla endüstriyel odun üretiminin 25,5 milyon m^3 düzeyine ulaştığı ve toplam odun hammaddesi kullanımının büyük ölçüde yerli kaynaklarla karşılandığı belirtilmektedir (T.C. Strateji ve Bütçe Başkanlığı, Orman Ürünleri Özel İhtisas Komisyonu Raporu).

Ancak bu durum, küresel ticaret daralırken Türkiye'de kesimlerin sınırsız biçimde artırılması gerektiği anlamına gelmez. Yerli arz artışı; ormanların yıllık artımı, yangın ve kuraklık riski, su kaynakları, karbon stoku ve biyolojik çeşitlilik göstergeleriyle birlikte değerlendirilmelidir. Şekil 1'de en belirgin olumlu eğilim, ahşap panel üretiminde ve panel ticaretinde görülmektedir. FAO'ya göre küresel panel üretimi 2024'te yaklaşık yüzde 5, panel ticareti ise yaklaşık yüzde 6 artmıştır. Türkiye bu eğilimden yararlanabilecek güçlü bir üretim altyapısına sahiptir. FAO'nun 2024 üretim verilerinde Türkiye, küresel ahşap panel üretiminin yaklaşık yüzde 3'ünü gerçekleştiren ülkeler arasında yer almaktadır.

Türkiye'de panel ve mobilya sektörlerinin ihracata dönük kapasitesinin gelişmiş olması, küresel talep artışının ihracat gelirlerine ve sanayi istihdamına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. UNECE–FAO Türkiye sektör sunumunda, geçmişte levha ihtiyacının bir bölümünün ithalatla karşılandığı, yapılan yatırımlar sonucunda levha ithalatının büyük ölçüde azaldığı ve üretimin yaklaşık dörtte birinin ihraç edildiği belirtilmektedir. Bununla birlikte panel ihracatındaki büyüme, odun arzı üzerinde ek baskı yaratabilir. Panel üretiminde kullanılan yonga, lif, talaş ve düşük çaplı odun gibi girdilere yönelik talep artarsa, yerli hammadde için mobilya, kâğıt, enerji ve diğer kullanım

alanlarıyla rekabet oluşabilir. Özellikle üretim kapasitesi hammadde arzından daha hızlı büyürse, üç sonuç ortaya çıkabilir.Yonga ve lif fiyatları yükselebilir, panel üreticilerinin ithal ara girdilere bağımlılığı artabilir ve ormanlardan daha yüksek üretim talebi gelebilir.

Bu nedenle panel sektöründeki büyümenin başarısı yalnızca ihracat miktarıyla değil, birim odun başına yaratılan katma değer, kullanılan geri kazanılmış hammadde oranı ve üretim artışının ekolojik maliyeti ile ölçülmelidir.

Şekil 1'in sağ paneli, odun hamuru ve selüloz ticaretinde sınırlı hareketlilik olduğunu göstermektedir. Küresel ölçekte odun hamuru üretimi 2024'te yaklaşık yüzde 3, ticareti ise yüzde 1 civarında artmıştır. İlave arzın önemli bir bölümü Brezilya, Şili ve Uruguay gibi Güney Amerika ülkelerinden gelmiştir (FAO, Global forest products trade and production show signs of recovery in 2024).

Türkiye için bu gelişmenin iki farklı sonucu olabilir. Birincisi, küresel selüloz arzının artması, Türkiye'de kâğıt ve karton sanayisinin ithal selüloz teminini kısa vadede kolaylaştırabilir. Özellikle büyük ölçekli ve düşük maliyetli üreticilerin piyasaya daha fazla ürün sunması, küresel fiyat baskısı yaratabilir. Bu durum, Türkiye'de kâğıt üreticilerinin hammadde maliyetlerini geçici olarak azaltabilir. İkincisi, Türkiye'nin kâğıt ve selüloz alanında dış tedarike bağımlılığı varsa, bu avantaj kalıcı olmayabilir. Navlun, döviz kuru, enerji maliyetleri ve tedarikçi ülkelerdeki arz koşulları değiştiğinde ithal selüloz maliyeti hızla yükselebilir. Bu nedenle Türkiye açısından yalnızca selüloz ithalatını artırmak yerine, atık kâğıdın ayrı toplanması, geri kazanılmış lif kullanımının artırılması ve kâğıt üretiminde su ve enerji verimliliğinin geliştirilmesi daha dayanıklı bir strateji oluşturur.

Şekil 1'de pelet üretiminde sınırlı bir artış görülmektedir. FAO, küresel pelet üretiminin 2024'te yaklaşık 48 milyon tonla yeniden 2022 düzeyine ulaştığını ve Avrupa ile Asya-Pasifik bölgelerinde biyokütle enerjisi talebinin önemli rol oynadığını bildirmektedir.(FAO, Global forest products trade and production show signs of recovery in 2024)

Bu eğilim Türkiye'de düşük kaliteli odun, orman artığı, talaş ve diğer biyokütle kaynaklarına yönelik talebi artırabilir. Pelet sektörü doğru tasarlanırsa, kereste ve panel üretiminde ortaya çıkan temiz yan ürünlerin değerlendirilmesini sağlayarak atık miktarını azaltabilir. Bu, kaskad kullanım yaklaşımıyla uyumludur. Ancak pelet üretiminin bir riski, malzeme olarak kullanılabilecek odunun doğrudan enerjiye yönlendirilmesidir. Panel, levha, kâğıt veya mobilya üretiminde kullanılabilecek nitelikteki hammaddenin pelet sektörüne kayması, odun arzı üzerindeki rekabeti artırabilir. Ayrıca orman

tabanındaki dal, tepe ve ölü odunun aşırı toplanması toprak verimliliğini ve biyolojik çeşitliliği olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle Türkiye'de pelet politikası şu hiyerarşiye dayanmalıdır:

Önce uzun ömürlü ürünlerde kullanım, sonra yeniden kullanım ve geri dönüşüm, en son aşamada enerji amaçlı değerlendirme; Pelet üretiminde yalnızca atık ve yan ürünlerin kullanılması, ormandan enerji amacıyla doğrudan hammadde çekilmesine göre daha düşük riskli bir seçenek olacaktır.

Tablo1'deki küresel eğilimler Türkiye'nin dış ticaretini ürün gruplarına göre farklı biçimde etkileyebilir:

Tablo1:Küresel eğilimşin Türkiyenin dış ticaretine olan etkisi

Küresel eğilim	**Türkiye'nin dış ticaretine olası etkisi**
Yuvarlak odun ticaretinde gerileme	Tomruk ithalatında tedarik ve fiyat riskinin artması
Panel üretimi ve ticaretinde artış	Türkiye'nin panel ve mobilya ihracatında fırsat; fakat yonga ve lif girdilerinde rekabet
Odun hamuru arzında artış	Kâğıt sanayisi için geçici ithalat avantajı; döviz ve navlun bağımlılığının sürmesi
Pelet üretiminde toparlanma	Biyokütle ihracatı ve enerji fırsatı; düşük kaliteli odun ve artıklar için sektörler arası rekabet
İşlenmiş ürünlerin küresel ticaretindeki toparlanma	Türkiye'nin hammadde ihraç etmek yerine panel, mobilya ve işlenmiş ürün ihraç etmesi için avantaj

Buradan çıkan temel sonuç, Türkiye'nin ham odun tedarikçisi veya düşük katma değerli ürün ihracatçısı olmak yerine, sınırlı yerli hammaddeden daha yüksek katma değer üreten bir sanayi modeli geliştirmesi gerektiğidir. Türkiye'nin panel ve mobilya sektörlerindeki mevcut kapasitesi bu dönüşüm için önemli bir avantajdır.

Tablo 1'in Türkiye açısından verdiği ana mesaj şudur: Küresel orman ürünleri piyasasında toparlanma, Türkiye'ye ihracat fırsatı sunmaktadır; ancak bu fırsat, yerli odun arzının sınırsız biçimde artırılmasıyla değil, kaynak verimliliği ve yüksek katma değerli üretimle değerlendirilmelidir.

Bu çerçevede Türkiye için öncelikli politika yönelimleri şunlardır:

1. Panel, mobilya ve işlenmiş ahşap ürünlerinde ihracat kapasitesi korunmalı; ancak yeni kapasite kararları güvence altına alınmış hammadde arzına bağlanmalıdır.

2. Yuvarlak odun ithalatı kalıcı çözüm olarak değil, kalite ve miktar bakımından ortaya çıkan belirli açıkları karşılayan, izlenebilir ve risk temelli bir araç olarak kullanılmalıdır.
3. Yonga, lif, talaş ve temiz ahşap atıklarının ayrı toplanması ve sınıflandırılması zorunlu hâle getirilmelidir.
4. Pelet üretiminde öncelik, ormandan doğrudan odun temini yerine sanayi yan ürünleri ve temiz geri kazanılmış biyokütleye verilmelidir.
5. Panel ve kâğıt sektörlerinde birim odun başına katma değer, geri kazanılmış hammadde oranı ve enerji tüketimi izlenmelidir.
6. Odun arzı hedefleri belirlenirken yıllık artımın yanı sıra yangın, kuraklık, karbon stoku, su ve biyolojik çeşitlilik göstergeleri birlikte kullanılmalıdır.
7. Dış ticaret verileri ham odun, ara ürün ve işlenmiş ürün ayrımında düzenli yayımlanmalı; böylece ihracat artışının gerçek kaynağı ve hammadde maliyeti görülebilmelidir.

Sonuç olarak Şekil 1, Türkiye için basit biçimde "küresel üretim artıyor, Türkiye de üretimi artırmalıdır" sonucunu desteklememektedir. Daha doğru yorum, küresel talebin özellikle işlenmiş ürünlerde toparlandığı; Türkiye'nin bu talebi ihracat fırsatına çevirebilmesi için odunu daha verimli kullanması, geri dönüşümü artırması ve ekolojik sınırları aşmadan yüksek katma değerli ürünlere yönelmesi gerektiğidir.

FAO'nun 2050 projeksiyonları da belirsizliğin yüksek olduğunu göstermektedir. Mevcut pazar eğilimlerine dayalı senaryolarda roundwood üretiminin 2022–2050 arasında yüzde 6–32 aralığında artabileceği; yeni ürünler ve ikame talepleri eklendiğinde roundwood tüketiminde 2050'ye kadar yıllık 272 milyon m^3'e varan ek artış oluşabileceği belirtilmektedir [6]. Ancak bu projeksiyonlar, hasat verimliliği, geri dönüşüm, orman ve ağaçlandırma yatırımları ile agroforestry gibi seçeneklerin birlikte uygulanabileceğini de vurgulamaktadır. Dolayısıyla projeksiyonlar kaçınılmaz bir kıtlık hükmü değil, politika seçeneklerinin sonuçlarını test eden senaryolardır.

4. Tomruk ithalatı: Kısa vadeli rahatlama, uzun vadeli risk

Tomruk ithalatı, yurt içindeki belirli tür ve kalite açıklarını geçici olarak kapatabilir. Bununla birlikte ithalat kararının yalnızca birim fiyat üzerinden verilmesi eksik kalır. Tam maliyet hesabına deniz ve kara taşımacılığı, liman elleçleme, depolama, kurutma, sınıflandırma, döviz kuru, gecikme, sigorta, gümrük, karantina, zararlı organizma riski ve ürünün işlenebilirlik özellikleri dâhil edilmelidir.

Bitki sağlığı bakımından risk özellikle kabuklu ve işlenmemiş odun hareketlerinde yükselir. IPPC'nin ISPM 15 standardı odun ambalaj malzemesine

ilişkindir; standarda göre malzeme kabuğu alınmış olmalı ve onaylı ısıl işlem ya da uygun fumigasyon koşulları sağlanmalıdır. Geleneksel ısıl işlem için odunun özünde en az 56 °C sıcaklığın 30 sürekli dakika korunması temel koşullardan biridir [4]. Bu standardın doğrudan her tür tomruk ithalatına uygulanacağı varsayılmamalı; ithal edilen ürünün niteliğine ve ithalatçı ülkenin ulusal bitki sağlığı düzenlemelerine göre ayrıca değerlendirme yapılmalıdır.

Bu çerçevede Türkiye için önerilecek ithalat rejimi üç katmanlı olmalıdır: menşe ve tedarik zinciri izlenebilirliği; tür, kabuk, rutubet ve işlem durumuna dayalı risk sınıflandırması; liman ve depolama alanlarında karantina, örnekleme ve acil müdahale kapasitesi. Ucuz tomruk, istilacı zararlıların yerleşmesi hâlinde orman ekosistemleri ve tarım alanları için çok daha yüksek toplumsal maliyetler doğurabilir. Bu nedenle biyogüvenlik, ticareti yavaşlatan dışsal bir bürokrasi değil, arz güvenliğinin zorunlu bileşenidir.

5. Pazar dışı orman hizmetleri ve ekonomik değerleme

Ormanların odun üretimi dışındaki katkıları; karbon tutumu, su kalitesinin düzenlenmesi, toprak koruma, rekreasyon, peyzaj, biyoçeşitlilik, hava kalitesi ve kültürel faydalar şeklinde ortaya çıkar. Bu hizmetlerin piyasa fiyatının bulunmaması onların ekonomik değersiz olduğu anlamına gelmez. Ancak parasal değer de tek başına kararın bütününü temsil etmez. Değerleme, tercihleri, maliyetleri ve fırsat maliyetlerini görünür kılan bir karar destek aracıdır.

Birleşmiş Milletler'in SEEA Ekosistem Muhasebesi çerçevesi, ekosistem alanı, ekosistem durumu, fiziksel ekosistem hizmetleri, parasal ekosistem hizmetleri ve parasal ekosistem varlık hesaplarını birbirine bağlamaktadır. Çerçeve 2021'de Birleşmiş Milletler İstatistik Komisyonu tarafından kabul edilmiş ve farklı ülkelerde politika geliştirme süreçlerinde kullanılmaya başlanmıştır [5]. Bu yaklaşım, ormanın yalnızca stok miktarını değil, ekosistem hizmetlerinin nerede üretildiğini ve bu hizmetlerden kimlerin yararlandığını da izlemeyi mümkün kılar.

Orman hizmetlerinin değerlemesinde pazar fiyatı, üretim fonksiyonu, kaçınılan maliyet, seyahat maliyeti, hedonik fiyat, koşullu değerleme ve seçime dayalı deneyler gibi yöntemler kullanılabilir. Orman ekosistem hizmetlerinin değerlendirilmesine ilişkin bilimsel derlemeler, ekonomik değerlemenin ekolojik üretim fonksiyonlarıyla ve kararın mekânsal bağlamıyla birlikte kurulması gerektiğini vurgulamaktadır [7]. Örneğin su arıtma hizmetinin değeri, ormanın genel bir hektar değerine indirgenemez; aşağı havzadaki arıtma maliyeti, yararlanan nüfus ve alternatif altyapı seçenekleriyle birlikte incelenmelidir.

Pazar dışı faydaların parasallaştırılması "doğaya fiyat biçmek" şeklinde yorumlanmamalıdır. Parasal sonuçlar, alternatif kullanım biçimleri arasında şeffaf karşılaştırma yapmayı sağlar; biyolojik çeşitlilik, geri döndürülemez kayıp ve eşitlik

gibi unsurlar ise yalnızca parasal değerle temsil edilemez. Bu nedenle Türkiye'de karar modeli, ekonomik değerlemeyi çok ölçütlü değerlendirme, hukuki koruma sınırları ve ekolojik eşikler ile birlikte kullanmalıdır.

6. Odun açığını azaltmada döngüsel ve kaskad yaklaşım

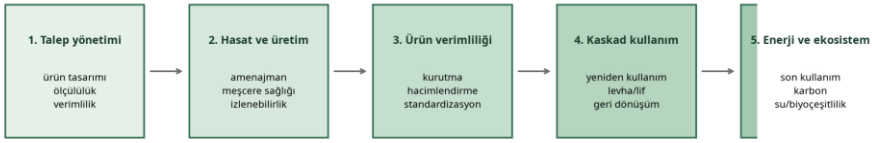
Birincil tomruk arzını artırmadan odun ürünleri arzını yükseltmenin en doğrudan yolu, ürün başına odun kullanımını azaltmak ve kullanım ömrünü uzatmaktır. Bunun için kereste kurutma ve sınıflandırma kayıplarının azaltılması, kesim planlarının ürün sınıfına göre optimize edilmesi, yapı elemanlarının yeniden kullanımı, mobilya ve panel atıklarının ayrıştırılması, lif ve levha üretiminde geri kazanılmış odun kullanımının artırılması ve son aşamada enerji geri kazanımının uygulanması gerekir.

Kaskad kullanım, odunun önce yüksek katma değerli ve uzun ömürlü malzeme olarak kullanılması; kullanım ömrü sonunda yeniden kullanım, geri dönüşüm ve ancak teknik olarak uygun olduğunda enerjiye dönüştürülmesi ilkesine dayanır. Odun atıklarının geri dönüşümüne ilişkin derlemeler, atık odunun parçacık levha ve diğer malzeme uygulamaları için önemli bir ikincil hammadde olduğunu; ancak yapıştırıcılar, ağır metaller, kreozot ve kirleticiler nedeniyle otomatik olarak tüm atık odunun geri dönüştürülebilir kabul edilemeyeceğini belirtmektedir [8]. Bu nedenle ayrıştırma, sınıflandırma ve kirletici giderme teknolojileri kritik darboğazlardır.

Tablo 1'de yer alan politika seçenekleri, tek başına uygulanabilecek birbirinden bağımsız araçlar değildir. Bu seçeneklerin etkili olabilmesi için talebin azaltılmasından üretim ve hasat süreçlerinin iyileştirilmesine, ürün verimliliğinin artırılmasından yeniden kullanım ve geri dönüşüme kadar uzanan bütüncül bir politika dizisi gerekmektedir. Bu nedenle Şekil 2, tabloda karşılaştırılan seçenekleri uygulama mantığı içinde sıralamak amacıyla hazırlanmıştır. Şekildeki sıralama, odun açığına öncelikle yeni kaynak arayarak değil, mevcut talebi daha verimli yöneterek ve mevcut odun kaynaklarından daha yüksek fayda sağlayarak müdahale edilmesini esas almaktadır. Böylece üretim, kullanım ve kullanım sonrası aşamalar arasında bağlantı kurulmakta; son aşamada enerji kullanımı, karbon dengesi ve ekosistem hizmetleri birlikte değerlendirilmektedir.

Odun açığını azaltmaya yönelik politikaların başarısı, yalnızca hasat miktarının artırılmasına değil, odunun yaşam döngüsünün bütün aşamalarında kaynak verimliliğinin sağlanmasına bağlıdır. Bu yaklaşımda ilk öncelik, ürün tasarımı, döngüsellik ve verimlilik yoluyla gereksiz odun talebini azaltmaktır. Daha sonra hasat ve üretim süreçlerinin amenajman, meşcere sağlığı ve izlenebilirlik ilkeleriyle yürütülmesi; ürünlerin kurutma, hacimlendirme ve standardizasyon yoluyla daha verimli kullanılması; kullanım ömrünü tamamlayan ürünlerin yeniden kullanılması

ve geri dönüştürülmesi gerekmektedir. Şekil 2, bu çoklu politika yaklaşımını birbirini izleyen ve birbirini destekleyen beş aşama hâlinde göstermektedir.



Şekil 2. Odun açığını azaltmak için çoklu politika sıralaması.

Şekil2'de odun açığının azaltılmasını talep yönetiminden başlayarak hasat ve üretim, ürün verimliliği, kaskad kullanım ve son kullanım aşamalarına uzanan bütünleşik bir politika sıralaması içinde göstermektedir. İlk aşamada ürün tasarımı, döngüsellik ve kaynak verimliliği yoluyla oduna yönelik gereksiz talebin azaltılması hedeflenmektedir. İkinci aşama, amenajman, meşcere sağlığı ve izlenebilirlik ilkeleri doğrultusunda hasat ve üretimin ekolojik sınırlar içinde gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Üçüncü aşamada kurutma, hacimlendirme ve standardizasyon uygulamalarıyla odunun kullanılabilirliği ve birim hammadde başına elde edilen değer artırılmaktadır. Dördüncü aşama, ürünlerin yeniden kullanılması, levha ve benzeri ikincil ürünlere dönüştürülmesi ve geri dönüştürülmesi yoluyla kaskad kullanımın geliştirilmesini ifade etmektedir. Son aşamada ise kullanım ömrünü tamamlayan odunun enerjiye dönüştürülmesi, karbon dengesi ve ekosistem üzerindeki etkiler birlikte değerlendirilmektedir. Bu sıralama, odun arzını artırmadan önce talebin azaltılmasını, mevcut kaynağın daha verimli kullanılmasını ve atık oluşumunun sınırlandırılmasını esas almaktadır.

Odun açığını azaltmaya yönelik politikaların talep yönetiminden son kullanıma kadar izlenebilecek çoklu bir sıralama içinde uygulanabileceğini göstermektedir. Politika yaklaşımı; önce ürün tasarımı ve verimlilik yoluyla talebin azaltılmasını, ardından ekolojik sınırlar içinde hasat ve üretimin iyileştirilmesini, ürün kayıplarının kurutma ve standardizasyonla azaltılmasını, ürünlerin yeniden kullanım ve geri dönüşüm yoluyla kaskad biçimde değerlendirilmesini ve son aşamada enerji ile ekosistem etkilerinin birlikte ele alınmasını önermektedir.

Şekil 2'de yer alan politika sıralaması, odun açığını azaltmak için talep yönetiminden başlayarak üretim, ürün verimliliği, kaskad kullanım ve son kullanım aşamalarına uzanan bir yaklaşım sunmaktadır. Ancak her aşama, yanlış tasarlandığında yeni ekonomik, ekolojik veya yönetişim riskleri doğurabilir. Bu nedenle her politika adımı, ölçülebilir hedefler, izleme göstergeleri ve düzeltici önlemlerle birlikte uygulanmalıdır.

6.1. Talep yönetimi

Bu aşama; ürün tasarımı, döngüsellik ve kaynak verimliliği yoluyla gereksiz odun talebinin azaltılmasını amaçlamaktadır.

Tablo2: Talep yönetimi aşamasında olası riskler ve risk azaltma önlemleri

Olası risk	**Riskin açıklaması**	**Alınabilecek önlemler**
Talebin başka malzemelere kayması	Odun kullanımının azaltılması, plastik, metal veya beton gibi çevresel etkisi yüksek malzemelerin kullanımını artırabilir.	Alternatif ürünler için karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizleri yapılmalı; kararlar yalnızca odun tüketimindeki azalmaya göre verilmemelidir.
Döngüsellik iddiasının gerçeği yansıtmaması	Bir ürünün geri dönüştürülebilir olarak tasarlanması, uygulamada gerçekten toplanıp geri dönüştürüleceği anlamına gelmez.	Tasarım standartları, toplama altyapısı ve geri dönüşüm kapasitesi birlikte planlanmalı; üreticilere geri alma ve raporlama yükümlülüğü getirilmelidir.
Tüketimin başka biçimde artması	Daha verimli ürünler, kullanım maliyetini düşürerek toplam tüketimi artırabilir.	Sadece birim ürün verimliliği değil, toplam odun tüketimi ve malzeme ayak izi de izlenmelidir.
Kalite ve dayanıklılığın düşmesi	Odun kullanımını azaltmak amacıyla daha düşük kaliteli veya kısa ömürlü ürünler teşvik edilebilir.	Ürünlerin asgari dayanıklılık, onarılabilirlik ve kullanım ömrü standartları belirlenmelidir.
KOBİ'lerin uyum maliyeti	Yeni tasarım, etiketleme ve raporlama kuralları küçük işletmeler için yüksek maliyet yaratabilir.	Aşamalı geçiş, teknik danışmanlık, ortak tasarım merkezleri ve yatırım teşvikleri sağlanmalıdır.
Tüketici davranışlarının dikkate alınmaması	Daha dayanıklı veya onarılabilir ürünler, tüketici tercihleri ve fiyat baskısı nedeniyle yeterince talep görmeyebilir.	Tüketiciyi bilgilendiren etiketleme, kamu alımları ve onarım hizmetlerini destekleyen teşvikler uygulanmalıdır.

Öncelikli önlemler: Ürünlerin kullanım ömrünü uzatmak, onarılabilirliği artırmak, gereksiz ambalajı azaltmak ve kamu alımlarında kaynak verimli ürünlere öncelik vermek.

İzlenebilecek göstergeler: Kişi veya sektör başına odun tüketimi, ürün başına kullanılan odun miktarı, ortalama ürün ömrü, onarım oranı, geri dönüştürülebilir ürün oranı ve alternatif malzemelerin yaşam döngüsü etkileri.

6.2.Hasat ve üretim

Bu aşama; amenajman, meşcere sağlığı ve izlenebilirlik ilkeleri doğrultusunda odun üretiminin ekolojik sınırlar içinde yürütülmesini kapsamaktadır.

Tablo 3. Hasat ve üretim aşamasında olası ekolojik, yönetsel ve toplumsal riskler ile alınabilecek önlemler

Olası risk	Riskin açıklaması	Alınabilecek önlemler
Ekolojik sınırların aşılması	Üretim hedeflerinin artırılması, ormanların kendini yenileme kapasitesini aşan kesim baskısı yaratabilir.	Bölgesel ekolojik taşıma kapasitesi ve sürdürülebilir kesim düzeyi belirlenmeli; bu sınırlar bağlayıcı hâle getirilmelidir.
Biyolojik çeşitlilik kaybı	Tek tür ağırlıklı üretim, yaşlı ağaçların ve ölü odunun azaltılması habitat kaybına neden olabilir.	Yaş, tür ve yapı çeşitliliği korunmalı; koruma alanları, ekolojik koridorlar ve ölü odun hedefleri belirlenmelidir.
Toprak ve su kaynaklarının zarar görmesi	Ağır makineler ve yanlış hasat yöntemleri toprak sıkışmasına, erozyona ve su rejiminin bozulmasına yol açabilir.	Hassas alanlarda mevsimsel kısıtlamalar uygulanmalı; düşük etkili hasat teknolojileri ve tampon bölgeler kullanılmalıdır.
İklim değişikliğine karşı kırılganlık	Kuraklık, yangın, zararlı ve hastalıklar üretim planlarını geçersiz kılabilir.	İklim senaryoları amenajman planlarına dâhil edilmeli; dirençli tür karışımları, yangın yönetimi ve izleme sistemleri kurulmalıdır.
Yasadışı kesim ve kayıt dışı ticaret	Arz açığı, kayıt dışı üretim ve menşei belirsiz ürünlerin piyasaya girmesi için teşvik yaratabilir.	Dijital izlenebilirlik, saha denetimi, uydu görüntüleri ve bağımsız sertifikasyon kullanılmalıdır.
Sosyal çatışmalar	Orman köylüleri, yerel topluluklar veya diğer kullanıcılarla üretim kararları arasında çatışma çıkabilir.	Katılımcı planlama yapılmalı; yerel toplulukların hakları, geçim kaynakları ve itiraz mekanizmaları güvence altına alınmalıdır.
Tek hedefli üretim planlaması	Sadece tomruk miktarına odaklanılması karbon, su, rekreasyon ve biyolojik çeşitlilik hizmetlerini geri plana itebilir.	Amenajman planlarında odun üretimi ile ekosistem hizmetleri birlikte değerlendirilmelidir.

Öncelikli önlemler: Sürdürülebilir kesim sınırlarının belirlenmesi, ürün bazlı planlama, izlenebilirlik, bağımsız denetim ve ekosistem hizmetlerinin amenajman kararlarına dâhil edilmesi.

İzlenebilecek göstergeler: Yıllık kesim miktarı ile artım arasındaki oran, orman örtüsü değişimi, biyolojik çeşitlilik göstergeleri, toprak erozyonu, su kalitesi, yasadışı kesim vakaları ve sertifikalı/izlenebilir ürün oranı.

6.1.3. Ürün verimliliği

Bu aşama; kurutma, hacimlendirme, kalite sınıflandırması ve standardizasyon yoluyla aynı miktardaki hammaddeden daha fazla kullanılabilir ürün elde edilmesini amaçlamaktadır.

Tablo 4. Kurutma, kalite sınıflandırması ve standardizasyon uygulamalarında riskler ile alınabilecek önlemler

Olası risk	Riskin açıklaması	Alınabilecek önlemler
Enerji tüketiminin artması	Kurutma tesisleri, özellikle fosil yakıt kullanıyorsa emisyonları ve üretim maliyetini artırabilir.	Atık biyokütle, yenilenebilir enerji ve ısı geri kazanım sistemleri kullanılmalı; enerji verimliliği standartları uygulanmalıdır.
Kalite sınıflandırmasında hatalar	Yanlış sınıflandırma, iyi kalite ürünün düşük değerli kullanım alanına yönlendirilmesine veya güvenlik sorunlarına yol açabilir.	Ortak teknik standartlar, kalibre edilmiş ölçüm cihazları, yetkin personel ve bağımsız kalite denetimi sağlanmalıdır.
Standardizasyonun küçük işletmeleri dışlaması	Yüksek teknik gereklilikler, küçük işletmelerin piyasadan çekilmesine neden olabilir.	Bölgesel ortak kurutma ve sınıflandırma merkezleri kurulmalı; KOBİ'lere eğitim ve finansman desteği verilmelidir.
Kurutma kusurları	Aşırı veya yetersiz kurutma çatlama, şekil bozukluğu, mantar oluşumu veya dayanım kaybı yaratabilir.	Ürün türüne ve nihai kullanımına uygun kurutma protokolleri oluşturulmalı; nem ölçümü ve parti bazlı kayıt tutulmalıdır.
Firelerin başka bir aşamaya aktarılması	Kurutma ve sınıflandırma sırasında oluşan düşük kaliteli yan ürünler atık hâline gelebilir.	Yan ürünler levha, pelet, kompozit ürün veya başka malzeme uygulamalarında değerlendirilmelidir.
Yanlış teşvik tasarımı	Destekler yalnızca kurulu kapasiteyi artırırsa gerçek kaynak tasarrufu sağlanmayabilir.	Teşvikler tesis sayısına değil, azaltılan fireye, enerji verimliliğine ve birim hammadde başına elde edilen katma değere bağlanmalıdır.

Öncelikli önlemler: Enerji verimli kurutma, ortak teknik standartlar, ürün bazlı kalite sınıflandırması, personel eğitimi ve yan ürünlerin değerlendirilmesi.

İzlenebilecek göstergeler: Kurutma kaynaklı fire oranı, ürün başına enerji tüketimi, uygun nem oranına sahip ürün payı, sınıflandırılmış ürün oranı ve birim odun başına katma değer.

6.1.4. Kaskad kullanım

Kaskad kullanım, odunun önce daha yüksek katma değerli ve daha uzun ömürlü ürünlerde değerlendirilmesini; kullanım ömrü sonunda yeniden kullanım, geri dönüşüm ve ancak son aşamada enerji amaçlı değerlendirmeyi ifade eder.

Tablo 5: Kaskad kullanım, yeniden kullanım ve geri dönüşüm aşamalarında olası riskler ile alınabilecek önlemler

Olası risk	**Riskin açıklaması**	**Alınabilecek önlemler**
Kirleticilerin yeniden dolaşıma girmesi	Boya, emprenye maddesi, yapıştırıcı, ağır metal veya başka kimyasallar içeren ahşap ürünler geri dönüşüm zincirine girebilir.	Temiz ve kirlenmiş ahşap ayrı toplanmalı; kirletici sınırları ve laboratuvar testleri uygulanmalıdır.
Geri dönüştürülmüş malzeme kalitesinin düşmesi	Liflerin tekrar tekrar işlenmesi, mekanik özelliklerin ve ürün kalitesinin azalmasına yol açabilir.	Her malzeme akışı için kalite sınıfı belirlenmeli; kullanım sayısı ve performans sınırları izlenmelidir.
Toplama sistemlerinin yetersizliği	Ayrı toplama yapılmadığında geri dönüştürülebilir ahşap karışık atığa dönüşebilir.	Belediyeler, üreticiler ve geri dönüşüm işletmeleri arasında bölgesel toplama ve sınıflandırma ağları kurulmalıdır.
Kaskad kullanımın enerji kullanımına yenilmesi	Enerji fiyatları veya teşvikler, ahşabın malzeme olarak kullanılmasından önce yakılmasını cazip hâle getirebilir.	Malzeme olarak yeniden kullanım ve geri dönüşüm, enerji amaçlı yakmaya göre önceliklendirilmelidir.
Taşıma kaynaklı emisyonlar	Düşük miktarlı veya dağınık atıkların uzun mesafelere taşınması çevresel faydayı azaltabilir.	Bölgesel tedarik ağları, transfer merkezleri ve lojistik optimizasyonu geliştirilmelidir.
Yanlış geri dönüşüm beyanları	Geri dönüştürülmüş içerik oranları doğrulanmadan beyan edilebilir.	Kütle dengesi, ürün pasaportu, üçüncü taraf doğrulaması ve düzenli raporlama uygulanmalıdır.
Pazar talebinin yetersiz olması	Geri kazanılmış ürünler için istikrarlı alıcı bulunamazsa sistem ekonomik olarak sürdürülemez.	Kamu alımlarında geri kazanılmış içerik kriterleri, ürün standartları ve uzun vadeli alım anlaşmaları geliştirilmelidir.

Öncelikli önlemler: Temiz ahşap akışlarının ayrıştırılması, kaskad kullanım hiyerarşisinin mevzuata alınması, geri dönüştürülmüş ürün standartlarının oluşturulması ve kamu alımlarıyla pazarın desteklenmesi.

İzlenebilecek göstergeler: Yeniden kullanılan ve geri dönüştürülen ahşap miktarı, ayrı toplanan ahşap oranı, kirletici uygunsuzlukları, geri kazanılmış içerik oranı ve enerjiye yönlendirilen malzemenin toplam içindeki payı.

6.1.5. Enerji ve ekosistem

Şeklin son aşaması, kullanım ömrünü tamamlayan ahşabın enerjiye dönüştürülmesi ile karbon dengesi ve ekosistem etkilerinin birlikte değerlendirilmesini kapsamaktadır.

Tablo 6: Odun esaslı biyokütle enerjisi ve ekosistem hizmetleri muhasebesinde çevresel, ekonomik ve yönetsel riskler

Olası risk	**Riskin açıklaması**	**Alınabilecek önlemler**
Karbon nötrlüğünün otomatik kabul edilmesi	Biyokütlenin yakılması, yeniden büyüme süresi, taşıma, işleme ve arazi kullanım etkileri dikkate alınmadan "karbonsuz" kabul edilebilir.	Karbon hesapları yaşam döngüsü yaklaşımıyla yapılmalı; zaman boyutu, alternatif kullanım ve ormanların karbon stokları hesaba katılmalıdır.
Malzeme olarak kullanılabilecek odunun erken yakılması	Yüksek katma değerli veya geri dönüştürülebilir ahşabın enerji için kullanılması kaynak verimliliğini azaltır.	Enerji kullanımı yalnızca yeniden kullanım ve geri dönüşüm seçenekleri tükendikten sonra değerlendirilmelidir.
Hava kirliliği	Uygun olmayan yakıt veya teknoloji, partikül madde, azot oksit ve diğer kirleticilerin salımını artırabilir.	Emisyon standartları, sürekli ölçüm, uygun filtreleme ve yakıt kalite kriterleri uygulanmalıdır.
Orman ekosistemlerinde besin kaybı	Bütün ağaçların veya dal ve tepe artıklarının aşırı toplanması, toprağın organik madde ve besin dengesini bozabilir.	Ekosistemde bırakılması gereken artık miktarı belirlenmeli; hassas topraklarda biyokütle çıkarımı sınırlandırılmalıdır.
Ekosistem hizmetlerinin parasallaştırılmasında yanlılık	Karbon veya tomruk gelirinin kolay ölçülmesi, biyolojik çeşitlilik ve kültürel değerlerin geri plana itilmesine neden olabilir.	Fiziksel göstergeler parasal göstergelerden ayrı raporlanmalı; belirsizlikler, dağılımsal etkiler ve nitel değerler açıklanmalıdır.
Çifte sayım	Karbon tutumu, emisyon azaltımı	SEEA uyumlu ortak hesap sistemi,

Olası risk	Riskin açıklaması	Alınabilecek önlemler
	ve orman hizmetleri aynı ekonomik fayda içinde birden fazla kez hesaplanabilir.	açık sınırlar ve bağımsız metodoloji denetimi kullanılmalıdır.
Enerji tesislerinin yerel çevresel etkileri	Büyük ölçekli tesisler trafik, gürültü, hava kirliliği ve su kullanımı baskısı yaratabilir.	Tesis yeri seçimi, kapasite planlaması ve yerel çevresel etki değerlendirmesi birlikte yapılmalıdır.

Öncelikli önlemler: Enerji kullanımını kaskad hiyerarşisinin son basamağı olarak konumlandırmak, yaşam döngüsü karbon hesabı yapmak, emisyon standartlarını uygulamak ve ekosistem hizmetlerini fiziksel göstergelerle birlikte raporlamak.

İzlenebilecek göstergeler: Birim enerji başına yaşam döngüsü emisyonu, hava kirleticileri, enerjiye yönlendirilen ahşap oranı, orman karbon stoku, toprak organik maddesi ve ekosistem hizmetlerinin fiziksel durumu.

6.1.6.Aşamalar arasındaki geçişlerde ortaya çıkabilecek riskler

Şekildeki aşamalar birbirinden tamamen bağımsız değildir. Bir aşamadaki başarısızlık, sonraki aşamanın etkisini azaltabilir. Örneğin talep yönetimi uygulanmadan üretim kapasitesinin artırılması, ormanlar üzerindeki baskıyı yükseltebilir. Ürünlerin başlangıçta geri dönüştürülebilir veya onarılabilir tasarlanmaması, kaskad kullanım aşamasında teknik ve ekonomik sorunlara yol açabilir. Benzer şekilde, üretim sırasında menşei ve kimyasal içeriği izlenmeyen ahşabın sonradan güvenli biçimde geri dönüştürülmesi zorlaşır.

Bu nedenle aşağıdaki yatay önlemler bütün aşamalar için uygulanmalıdır:

1. Ortak veri ve izlenebilirlik sistemi: Hammaddenin ormandan nihai ürüne ve atık aşamasına kadar izlenebilmesi sağlanmalıdır.
2. Yaşam döngüsü yaklaşımı: Bir seçeneğin faydası yalnızca bulunduğu aşamada değil, tüm yaşam döngüsü boyunca değerlendirilmelidir.
3. Ekolojik eşikler: Orman alanı, karbon stoku, biyolojik çeşitlilik, toprak ve su için asgari koruma eşikleri belirlenmelidir.
4. Bağımsız denetim: Üretim, geri dönüşüm, karbon hesabı ve çevresel beyanlar üçüncü taraflarca doğrulanmalıdır.
5. Şeffaf raporlama: Ekonomik faydalarla birlikte maliyetler, belirsizlikler ve olumsuz etkiler de açıklanmalıdır.
6. Uyarlanabilir yönetim: Kuraklık, yangın, zararlı, piyasa dalgalanması veya yeni teknolojiler gibi gelişmelere göre politikalar düzenli olarak güncellenmelidir.

7. Paydaş katılımı: Orman köylüleri, yerel yönetimler, sanayi, çevre kuruluşları ve bilim insanları karar alma süreçlerine dâhil edilmelidir.

Şekildeki politika sıralamasının temel riski, aşamaların yalnızca üretim ve arz artışı bakımından yorumlanmasıdır. Oysa amaç, daha fazla odun çıkarmak değil; gereksiz talebi azaltmak, mevcut hammaddeden daha fazla fayda sağlamak, ürünleri mümkün olduğunca uzun süre ekonomide tutmak ve son kullanımın ekolojik maliyetlerini sınırlamaktır.

Bu nedenle politika önceliği şu şekilde kurulmalıdır:

Önce talebi ve kayıpları azaltmak; sonra üretim ve ürün verimliliğini artırmak; ardından yeniden kullanım ve geri dönüşümü geliştirmek; enerji kullanımını ise malzeme seçenekleri tükendikten sonra değerlendirmek.

Bu sıralama, odun açığını azaltırken orman ekosistemlerinin taşıma kapasitesinin aşılmasını ve çevresel yükün başka sektörlere aktarılmasını önlemeye yardımcı olur.

7. Tartışma: İthalat mı, verimlilik mi, koruma mı?

Odun açığı tartışmasında üç yaklaşım öne çıkar. Birinci yaklaşım ithalatı, iç piyasadaki arz baskısını azaltan hızlı çözüm olarak görür. Bu yaklaşımın güçlü tarafı, belirli kalite ve tür gereksinimlerine kısa sürede yanıt verebilmesidir. Zayıf tarafı ise dışsal riskleri ve yerli işleme kapasitesinin zayıflamasını yeterince hesaba katmamasıdır.

İkinci yaklaşım yerli üretimin artırılmasını savunur. Bu yaklaşım, yerel istihdamı ve tedarik kontrolünü destekleyebilir. Ancak sürdürülebilir üretim, biyolojik artımın tamamının ekonomik üretime açılması demek değildir. Yangın, kuraklık, biyoçeşitlilik, su rejimi ve rekreasyon gibi işlevler üretim kararının sınırlarını belirler. Bu nedenle "artımı aşmayan kesim" ilkesi gerekli olmakla birlikte her durumda yeterli değildir; mekânsal ve ekolojik eşikler de dikkate alınmalıdır.

Üçüncü yaklaşım, talep yönetimi ve döngüsel kullanımı öne çıkarır. Bu yaklaşım daha yavaş sonuç verebilir; fakat ürün ömrünü uzattığı, geri kazanımı artırdığı ve sanayiyi teknolojiye yönelttiği için daha kalıcıdır. FAO'nun 2050 değerlendirmesi, gelecekteki odun talebinin yalnızca hasat artışıyla değil, işleme verimliliği, geri dönüşüm, ağaçlandırma ve agroforestry seçeneklerinin birleşimiyle karşılanabileceğine işaret etmektedir [6]. En sağlam politika, üç yaklaşımın hiyerarşik bir bileşimidir: önce talep ve fire azaltılmalı, sonra sürdürülebilir yerli arz ve işleme verimliliği artırılmalı, kalan açık için biyogüvenlik koşullu ve çeşitlendirilmiş ithalat kullanılmalıdır.

Odun açığının azaltılması, yalnızca kısa vadede piyasaya daha fazla tomruk sunulmasıyla çözülebilecek tek boyutlu bir sorun değildir. İthalat, yerli üretimde verimlilik artışı, odunun kurutulması ve sınıflandırılması, yeniden kullanım, ürün ikamesi ve pazar dışı orman hizmetlerinin ekonomik değerinin dikkate alınması birbirini tamamlayan farklı politika seçenekleridir. Bu seçeneklerin her biri odun arzı üzerinde farklı sürelerde ve farklı kanallardan etki yaratmakta; buna karşılık ekonomik, ekolojik, lojistik ve yönetişim bakımından çeşitli riskler taşımaktadır. Bu nedenle çözüm seçeneklerinin yalnızca kısa vadeli arz katkılarıyla değil, uzun vadeli katkıları, başlıca riskleri ve uygulanabilmeleri için gerekli ön koşullar bakımından birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tablo 7: Odun açığını azaltma seçeneklerinin karşılaştırılması

Seçenek	**Kısa vadeli etkisi**	**Uzun vadeli katkısı**	**Başlıca riski**	**Ön koşul**
Tomruk ithalatı	Kalite ve miktar açığını hızlı kapatabilir	Tedarik çeşitlendirmesi sağlayabilir	Kur, lojistik, zararlı ve jeopolitik risk	Risk temelli karantina ve izlenebilirlik
Yerli üretim verimliliği	Kullanılabilir ürün hacmini artırır	Sanayi rekabetçiliğini güçlendirir	Ekolojik sınırların aşılması	Amenajman, silvikültür ve ürün bazlı planlama
Kurutma ve sınıflandırma	Fireyi ve kalite kaybını azaltır	Birim odun başına katma değeri artırır	Yatırım ve enerji maliyeti	Teknik standartlar ve eğitim
Yeniden kullanım ve geri dönüşüm	İkincil hammadde sağlar	Birincil tomruk talebini azaltır	Kirleticiler ve kalite düşüşü	Ayrı toplama, sınıflandırma ve denetim
Ürün ikamesi	Bazı kullanım alanlarında talebi dağıtır	Sistemik arz baskısını azaltabilir	Yaşam döngüsü etkilerinin yanlış hesaplanması	Karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizi
Pazar dışı hizmet muhasebesi	Doğrudan tomruk üretmez	Koruma kararlarının gerekçesini güçlendirir	Çifte sayım ve parasallaştırma yanlılığı	SEEA uyumlu fiziksel–parasal hesaplar

Tablo 7'de odun açığının azaltılmasına yönelik seçenekleri kısa vadeli etkileri, uzun vadeli katkıları, başlıca riskleri ve uygulanma ön koşulları bakımından karşılaştırmaktadır. Tablo, tomruk ithalatının kalite ve miktar açığını kısa sürede kapatabilmesine karşın kur, lojistik, zararlı organizmalar ve jeopolitik gelişmeler gibi dışsal risklere açık olduğunu göstermektedir. Buna karşılık yerli üretimde verimlilik artışı, kurutma ve sınıflandırma teknolojileri ile yeniden kullanım ve geri dönüşüm, mevcut kaynaklardan daha fazla yararlanarak birim odun başına elde edilen faydayı artırma potansiyeline sahiptir. Ancak bu seçeneklerin başarılı olabilmesi için ekolojik sınırların gözetilmesi, teknik standartların geliştirilmesi, eğitim ve denetim kapasitesinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Ürün ikamesi, bazı kullanım alanlarında oduna yönelik talebi azaltarak arz baskısını dağıtabilir; ancak bunun gerçek katkısı, alternatif ürünlerin yaşam döngüsü etkilerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine bağlıdır. Pazar dışı hizmet muhasebesi ise doğrudan tomruk arzını artırmamakla birlikte, ormanların karbon tutma, su düzenleme, biyolojik çeşitliliği koruma ve rekreasyon gibi hizmetlerini görünür kılarak koruma kararlarının ekonomik ve politik gerekçesini güçlendirmektedir.

Odun açığını azaltma seçeneklerinin aynı işlevi görmediğini ortaya koymaktadır. İthalat kısa vadeli arz sorunlarına hızlı yanıt verirken, yerli üretimde verimlilik, kurutma ve sınıflandırma, yeniden kullanım ve ürün ikamesi daha çok kaynak verimliliğini ve talep yönetimini güçlendirmektedir. Pazar dışı hizmet muhasebesi ise doğrudan odun üretmese de ormanların korunmasının ekonomik değerini görünür kılmaktadır. Bu nedenle kalıcı bir çözüm, tek bir seçeneğe dayanmak yerine ithalatı risk temelli ve sınırlı bir araç olarak kullanırken verimlilik artışı, geri dönüşüm, ürün ikamesi ve koruma politikalarını birlikte ele alan dengeli bir yaklaşımı gerektirmektedir.

7.1. Politika Yapıcılar İçin Somut Eylem Planı

Tablo, odun açığının tek bir araçla giderilemeyeceğini; kısa vadeli arz güvenliği ile uzun vadeli kaynak verimliliği ve orman korumasının birlikte yürütülmesi gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle politika yaklaşımı, ithalatı geçici ve risk kontrollü bir araç olarak kullanırken, yerli üretimin verimliliğini artırmaya, odun kayıplarını azaltmaya, geri dönüşümü geliştirmeye ve ormanların pazar dışı hizmetlerini karar alma süreçlerine dâhil etmeye dayanmalıdır.

7.1.1. Kısa vadede arz açığının kontrollü biçimde yönetilmesi

İlk aşamada, piyasadaki kalite ve miktar açığının üretim baskısı yaratmasını önlemek amacıyla sınırlı ve hedefli tomruk ithalatı kullanılmalıdır. Ancak

ithalat genel ve kalıcı bir çözüm olarak değil, yerli üretim ve verimlilik politikaları sonuç verene kadar uygulanacak geçiş aracı olarak tasarlanmalıdır.

Bu kapsamda:

- İthalat yapılacak tür, kalite ve ürün grupları için ihtiyaç analizi hazırlanmalıdır.
- Tedarikçi ülkeler, yalnızca fiyat bakımından değil, sürdürülebilir üretim, hukuki uygunluk ve lojistik güvenilirlik açısından değerlendirilmelidir.
- Zararlı organizmaların taşınmasını önlemek için risk temelli karantina, sertifikasyon ve izlenebilirlik sistemi kurulmalıdır.
- Kur ve navlun değişimlerine karşı kamu ve sektör için erken uyarı göstergeleri oluşturulmalıdır.
- İthalatın yerli orman ürünleri sanayisini zayıflatmaması için yerli işleme kapasitesi ve katma değer üretimi izlenmelidir.

Önerilen göstergeler: İthal edilen tomruk miktarı, ülke ve tür bazında tedarik yoğunlaşması, karantina ihlali sayısı, ithalat maliyetinin iç piyasa fiyatına etkisi ve yerli işleme kapasitesindeki değişim.

7.1.2. Yerli üretimde verimliliğin ekolojik sınırlar içinde artırılması

Orta vadede öncelik, daha fazla orman alanı kullanmak değil, mevcut üretim ve işleme süreçlerinden daha fazla kullanılabilir ürün elde etmek olmalıdır. Bunun için amenajman planları, silvikültürel uygulamalar ve sanayinin ürün ihtiyaçları arasında daha güçlü bir uyum sağlanmalıdır.

Bu doğrultuda:

- Orman amenajman planları, ekolojik kapasite ve bölgesel sanayi ihtiyaçları birlikte dikkate alınarak güncellenmelidir.
- Üretim planlamasında yalnızca tomruk miktarı değil, ürün kalitesi, çap sınıfları ve nihai kullanım alanları da dikkate alınmalıdır.
- Düşük kaliteli veya atıl kalan odun kaynaklarının hangi ürünlerde değerlendirilebileceği belirlenmelidir.
- Hasat, taşıma ve depolama süreçlerinde oluşan kayıplar ölçülmeli ve azaltılmalıdır.
- Verimlilik artışı sağlanırken biyolojik çeşitlilik, toprak, su kaynakları, karbon depolama ve ormanların dirençliliği için bağlayıcı sınırlar belirlenmelidir.
- Üretim artışı sağlayan uygulamalar, bağımsız ekolojik etki değerlendirmesine tabi tutulmalıdır.

Buradaki temel ilke, **“daha fazla kesim” değil, “aynı ekolojik sınırlar içinde daha yüksek kullanılabilir ürün ve daha düşük kayıp”** yaklaşımı olmalıdır.

7.1.3. Kurutma, sınıflandırma ve işleme altyapısının geliştirilmesi

Tabloda belirtildiği gibi, kurutma ve sınıflandırma faaliyetleri doğrudan tomruk arzını artırmasa da fireyi, kalite kaybını ve yanlış ürün kullanımını azaltarak mevcut kaynağın ekonomik değerini yükseltir.

Bu amaçla:

- Bölgesel kurutma ve sınıflandırma merkezleri kurulmalı veya mevcut tesisler modernize edilmelidir.
- Odun nemi, dayanıklılığı, kalite sınıfı ve kullanım alanı için ortak teknik standartlar oluşturulmalıdır.
- Küçük ve orta ölçekli işletmelerin ekipman yatırımlarına düşük faizli kredi, yatırım desteği veya vergi teşviki sağlanmalıdır.
- Enerji verimli kurutma teknolojileri desteklenmeli; enerji maliyetinin çevresel etkileri izlenmelidir.
- Mesleki eğitim programlarıyla işletmelerin teknik personel kapasitesi artırılmalıdır.
- Kamu alımlarında standartlara uygun kurutulmuş ve sınıflandırılmış ürünlere öncelik verilmelidir.

Başarı göstergeleri: Kurutma sonrası fire oranı, kalite sınıflandırmasına tabi ürün oranı, birim odun başına katma değer, enerji tüketimi ve standartlara uygun üretim oranı.

7.1.4. Yeniden kullanım ve geri dönüşüm sisteminin kurulması

Odun açığını azaltmanın en düşük maliyetli yollarından biri, yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir ahşabın birincil hammadde yerine ikincil hammadde olarak ekonomiye kazandırılmasıdır. Bunun için yalnızca atık toplama değil, malzemenin kaynağında ayrıştırılması ve kaliteye göre sınıflandırılması gerekir.

Bu kapsamda:

- İnşaat, mobilya, ambalaj ve belediye atıkları için ayrı ahşap toplama sistemleri kurulmalıdır.
- Geri kazanılmış ahşap için kirletici madde, boya, emprenye ve yapısal uygunluk standartları belirlenmelidir.
- Geri dönüştürülmüş malzeme kullanan üreticilere kamu alımı, etiketleme veya vergi teşvikleri sağlanmalıdır.
- Atık ahşabın yakılması ile malzeme olarak yeniden kullanılması arasında hiyerarşi kurulmalıdır.

- Kirleticilerin ürün döngüsüne yeniden girmesini önlemek için denetim ve izleme sistemi geliştirilmelidir.
- Belediyeler, sanayi kuruluşları ve geri dönüşüm işletmeleri arasında bölgesel tedarik ağları oluşturulmalıdır.

Başarı göstergeleri: Toplanan ahşap atığı miktarı, yeniden kullanılan veya geri dönüştürülen oran, düzenli depolamaya giden ahşap miktarı ve geri kazanılmış hammadde kullanan işletme sayısı.

7.1.5. Ürün ikamesinin yaşam döngüsü yaklaşımıyla değerlendirilmesi

Ürün ikamesi, bazı kullanım alanlarında odun talebini azaltabilir; ancak her alternatif ürün otomatik olarak daha sürdürülebilir değildir. Bu nedenle ikame kararları yalnızca fiyat veya kısa vadeli hammadde tasarrufu üzerinden verilmemelidir.

Politika yapıcılar:

- Ahşap, plastik, metal, beton ve diğer alternatifleri kullanım alanı bazında karşılaştırmalıdır.
- Karşılaştırmalarda hammadde çıkarımı, üretim, taşıma, kullanım ömrü ve kullanım sonu aşamalarını kapsayan yaşam döngüsü analizleri kullanılmalıdır.
- Alternatif ürünlerin karbon, enerji, su, atık ve geri dönüştürülebilirlik etkileri birlikte değerlendirilmelidir.
- Kamu yatırımlarında ve kamu alımlarında yaşam döngüsü maliyeti ve çevresel performans kriterleri uygulanmalıdır.
- Ürün ikamesi sonucunda başka bir sektörde yeni çevresel baskı oluşup oluşmadığı izlenmelidir.

Bu yaklaşım, odun talebini azaltırken çevresel yükü başka bir hammaddeye aktarma riskini sınırlar.

7.1.6. Ormanların pazar dışı hizmetlerinin karar sistemine dâhil edilmesi

Ormanların karbon tutma, su rejimini düzenleme, erozyonu önleme, biyolojik çeşitliliği koruma ve rekreasyon gibi hizmetleri tomruk üretiminden elde edilen gelirle sınırlı değildir. Bu hizmetler görünür hâle getirilmediğinde, koruma kararları ekonomik açıdan olduğundan daha maliyetli görünebilir.

Bu nedenle:

- Orman ekosistem hizmetleri için fiziksel hesaplar oluşturulmalıdır.
- Hesaplama sistemi Birleşmiş Milletler'in Çevresel-Ekonomik Muhasebe Sistemi (SEEA) ile uyumlu hâle getirilmelidir.
- Fiziksel göstergeler ile parasal değerler ayrı ayrı raporlanmalı, parasallaştırma belirsizlikleri açıkça belirtilmelidir.

- Karbon, su, toprak ve biyolojik çeşitlilik göstergeleri orman planlarına dâhil edilmelidir.
- Çifte sayımı önlemek amacıyla ortak metodoloji ve merkezi veri standardı kullanılmalıdır.
- Koruma kararlarının değerlendirilmesinde yalnızca tomruk geliri değil, kaybedilecek ekosistem hizmetleri de hesaba katılmalıdır.

Bu uygulama, orman korumanın odun arzını kısıtlayan bir maliyet değil, uzun vadeli ekonomik ve ekolojik dayanıklılığı koruyan bir yatırım olarak değerlendirilmesini sağlar.

Tablo8: Odun açığının azaltılması ve sürdürülebilir odun arzının geliştirilmesine yönelik aşamalı eylem planı

Dönem	Öncelikli eylemler	Beklenen sonuç
İlk 6 ay	Odun açığı ve ürün grupları için veri tabanı oluşturulması; ithalat risk haritası hazırlanması; karantina ve izlenebilirlik standartlarının güncellenmesi	Kısa vadeli arz risklerinin kontrol altına alınması
6–18 ay	Kurutma ve sınıflandırma yatırımlarına destek; bölgesel geri dönüşüm ağlarının kurulması; yerli üretim kayıplarının ölçülmesi	Kullanılabilir odun miktarının artırılması ve firelerin azaltılması
18–36 ay	Amenajman ve ürün bazlı planlamanın güncellenmesi; yaşam döngüsü analizlerinin kamu alımlarına dâhil edilmesi; teknik eğitim programlarının yaygınlaştırılması	Kaynak verimliliği ve sanayi rekabetçiliğinde artış
3–5 yıl	SEEA uyumlu orman hizmetleri muhasebesi; koruma ve üretim kararlarının ortak değerlendirme sistemine alınması; ithalata bağımlılık hedeflerinin uygulanması	Daha dayanıklı, çeşitlendirilmiş ve sürdürülebilir odun politikası

7.1.7.Kurumsal sorumluluk ve koordinasyon

Eylem planının başarısı, tek bir kurumun çabasına bırakılmamalıdır. Orman yönetiminden sorumlu kurum, ticaret ve sanayi kurumları, çevre otoriteleri, belediyeler, gümrük ve karantina birimleri, üniversiteler ve özel sektör arasında sürekli bir koordinasyon mekanizması kurulmalıdır.

Bu mekanizma kapsamında:

- Yıllık **Odun Arzı ve Orman Kaynakları Raporu** yayımlanmalı,

- ithalat, yerli üretim, geri dönüşüm, fire, ekolojik göstergeler ve fiyat hareketleri birlikte izlenmeli,
- hedeflerin gerçekleşme düzeyi her yıl bağımsız olarak değerlendirilmelidir.

7.1.8.Temel politika hedefi

Bu eylem planının temel hedefi, odun açığını yalnızca daha fazla tomruk tedarik ederek kapatmak değil; aynı ekolojik sınırlar içinde daha fazla kullanılabilir ürün elde etmek, kayıpları azaltmak, ikincil hammaddeleri ekonomiye kazandırmak ve koruma kararlarının gerçek ekonomik değerini görünür kılmaktır.

Bu nedenle önerilen politika sıralaması şu şekilde özetlenebilir:

1. **Kısa vadede:** Risk temelli ve geçici ithalatla arz kesintilerini yönetmek.
2. **Orta vadede:** Yerli üretim, kurutma, sınıflandırma ve işleme verimliliğini artırmak.
3. **Aynı anda:** Yeniden kullanım, geri dönüşüm ve ürün ikamesini geliştirmek.
4. **Uzun vadede:** Ormanların ekolojik sınırlarını ve pazar dışı hizmetlerini karar alma sisteminin merkezine yerleştirmek.

8. Sonuç ve öneriler

Odun açığını kapatmak, tomruk arzını mekanik biçimde artırmaktan ibaret değildir. Güncel küresel veriler, üretim, ticaret ve ürün gruplarının aynı yönde hareket etmediğini göstermektedir. Bu durum, Türkiye bakımından da "tomruk açığı" ile "orman ürünleri arzı açığı"nın ayrıştırılmasını zorunlu kılar. Sanayinin ihtiyacı bazı durumlarda daha fazla tomruk değil, daha iyi kurutulmuş kereste, daha yüksek randıman, standartlaştırılmış panel, geri kazanılmış lif veya uzun ömürlü mühendislik ürünü olabilir.

İthalat, belirli koşullarda gerekli bir arz aracı olabilir; ancak biyogüvenlik ve tam maliyet analizi olmadan stratejik çözüm değildir. IPPC'nin kabuk, ısıl işlem, fumigasyon ve kayıt koşulları, işlenmemiş odun ve odun ambalajı hareketlerinde risk temelli denetimin önemini göstermektedir [4]. Türkiye'de liman ve depolama altyapısı, tür ve menşe bazlı risk sınıflandırması ile hızlı teşhis kapasitesi güçlendirilmeden ithalat hacmini artırmak, gelecekte daha büyük bir orman sağlığı maliyeti doğurabilir.

Pazar dışı orman hizmetlerinin ekonomik değerlemesi ise odun üretiminin alternatifi değil, kararların toplumsal sonuçlarını görünür kılan tamamlayıcı bir araçtır. SEEA Ekosistem Muhasebesi'nin fiziksel ve parasal hesapları, orman varlıklarının yalnızca piyasada satılan ürünlerle ölçülmesini aşmak için güçlü bir çerçeve sunmaktadır [5]. Bununla birlikte parasal değerler, ekolojik eşiklerin veya geri döndürülemez kayıpların yerine geçirilemez.

Bu bölümün önerdiği politika sıralaması şöyledir: (i) ürün ve kalite bazında gerçek odun açığını ölçmek; (ii) üretim, kurutma, sınıflandırma ve lojistik randımanını yükseltmek; (iii) yeniden kullanım ve geri dönüşümü kaskad ilkesiyle büyütmek; (iv) sürdürülebilir yerli arzı ekolojik eşiklerle birlikte planlamak; (v) zorunlu ithalatı biyogüvenlik ve tam maliyet koşullarına bağlamak; (vi) pazar dışı ekosistem hizmetlerini ulusal kaynak muhasebesine ve proje analizlerine entegre etmek. Böylece odun arzı ile ormanların çoklu işlevleri arasında daha dengeli, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir bir karar düzeni kurulabilir.

Odun açığının azaltılmasına yönelik politika seçenekleri yalnızca üretim veya arz miktarındaki artışa göre değerlendirilmemelidir. Bir seçeneğin kısa vadede odun arzını artırması, onun ekonomik açıdan en uygun, ekolojik açıdan sürdürülebilir veya toplumsal açıdan adil olduğu anlamına gelmez. Örneğin tomruk ithalatı fiziksel arz açığını kısa sürede azaltabilir; ancak taşıma maliyetleri, döviz kuru, biyogüvenlik, karbon salımı ve yerli üreticiler üzerindeki etkiler dikkate alındığında toplam sonuç farklılaşabilir. Benzer biçimde, yerli üretimde verimlilik artışı daha fazla kullanılabilir ürün sağlayabilir; fakat bu artış habitat, su, karbon stoku veya biyolojik çeşitlilik üzerindeki eşikleri zorluyorsa uzun vadede sürdürülebilir olmayabilir.

Bu nedenle Tablo 9, odun açığına ilişkin kararların tek bir göstergeye veya yalnızca ekonomik maliyete dayandırılmasını önlemek amacıyla hazırlanmıştır. Tablo; fiziksel arz, ekonomik maliyet, ekolojik sınırlar, sanayi verimliliği, biyogüvenlik ve toplumsal refah boyutlarını birlikte ele almakta; her karar boyutu için izlenmesi gereken göstergeleri ve yanıtlanması gereken temel politika sorusunu ortaya koymaktadır. Böylece farklı seçeneklerin karşılaştırılabilir, ölçülebilir ve zaman içinde izlenebilir bir değerlendirme çerçevesine oturtulması amaçlanmaktadır.

Odun açığını azaltmaya yönelik politika seçeneklerinin başarısı, yalnızca piyasaya sunulan odun miktarındaki artışla ölçülemez. Kararların fiziksel arz, ekonomik maliyet, ekolojik sınırlar, sanayi verimliliği, biyogüvenlik ve toplumsal refah bakımından birlikte değerlendirilmesi gerekir. Bu kapsamda, her politika seçeneğinin hem sağlayacağı doğrudan katkıların hem de ortaya çıkarabileceği dışsal maliyetlerin düzenli olarak izlenmesi önem taşımaktadır. Tablo 9, bu çok boyutlu değerlendirme yaklaşımını karar boyutları, önerilen izleme göstergeleri ve her boyutun yanıtlaması gereken politika soruları üzerinden ortaya koymaktadır.

Tablo 9. Karar ölçütleri ve önerilen izleme göstergeleri

Karar boyutu	İzleme göstergeleri	Politika sorusu
Fiziksel arz	Yıllık artım, üretim, stok, ürün sınıfı, fire	Hangi ürün grubunda gerçek açık var?
Ekonomik maliyet	Birim maliyet, taşıma, kur, enerji, karbon maliyeti	En düşük toplam maliyet hangi seçenekte?
Ekolojik sınır	Habitat, su, karbon, yangın ve biyoçeşitlilik göstergeleri	Arz artışı hangi eşikleri zorluyor?
Sanayi verimliliği	Randıman, kurutma kaybı, ürün ömrü, geri kazanım oranı	Aynı işlev daha az odunla sağlanabilir mi?
Biyogüvenlik	Menşe, kabuk, işlem, zararlı tespiti, karantina süresi	İthalatın beklenen dışsal maliyeti nedir?
Toplumsal refah	Rekreasyon, su arıtma, karbon, yerel gelir ve dağılım	Kararın kazananları ve kaybedenleri kimlerdir?

Tablo 9'da odun açığını azaltmaya yönelik politika seçeneklerinin çok boyutlu olarak değerlendirilmesi için kullanılabilecek temel karar boyutlarını ve izleme göstergelerini sunmaktadır. Fiziksel arz boyutu, gerçek açığın hangi ürün gruplarında ve ne ölçüde ortaya çıktığını belirlemeye yöneliktir. Ekonomik maliyet boyutu, yalnızca ürün fiyatını değil; taşıma, döviz kuru, enerji ve karbon maliyetlerini de dikkate alarak seçeneklerin toplam maliyetini değerlendirmektedir. Ekolojik sınır göstergeleri, arz artışının habitat, su kaynakları, karbon stoku, yangın riski ve biyolojik çeşitlilik üzerindeki etkilerini izlemeyi amaçlamaktadır. Sanayi verimliliği göstergeleri, aynı işlevin daha az odun kullanılarak sağlanıp sağlanamayacağını ortaya koymaktadır. Biyogüvenlik boyutu özellikle ithalatın menşei, işlem koşulları, zararlı organizma riski ve karantina gereklilikleri bakımından değerlendirilmesini sağlamaktadır. Toplumsal refah göstergeleri ise kararların rekreasyon, su sağlama, karbon tutma, yerel gelir ve gelir dağılımı üzerindeki etkilerini dikkate alarak politika seçeneklerinin kazananlarını ve kaybedenlerini görünür hâle getirmektedir.

Odun açığına ilişkin kararların yalnızca arz miktarı veya birim fiyat üzerinden alınmaması gerektiğini göstermektedir. Fiziksel arz göstergeleri gerçek açığın niteliğini ortaya koyarken, ekonomik göstergeler seçeneklerin toplam maliyetini; ekolojik göstergeler ise arz artışının orman ekosistemleri üzerindeki sınırlarını belirlemektedir. Sanayi verimliliği, aynı işlevin daha az odunla sağlanıp sağlanamayacağını; biyogüvenlik göstergeleri ithalatın dışsal risklerini; toplumsal refah göstergeleri ise kararların toplum kesimleri arasındaki dağılımsal etkilerini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu çerçeve, politika seçeneklerinin yalnızca kısa vadeli faydalarına değil, uzun vadeli ekonomik, ekolojik ve toplumsal sonuçlarına göre karşılaştırılmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, odun açığının tek bir arz artırıcı politikayla çözülemeyeceğini ve farklı politika seçeneklerinin farklı maliyet ve riskler taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle politika tercihi, her seçeneğin fiziksel katkısını, toplam ekonomik maliyetini, ekolojik sınırlar üzerindeki etkisini, sanayi verimliliğine katkısını, biyogüvenlik riskini ve toplumsal refah sonuçlarını birlikte değerlendiren bir izleme sistemine dayanmalıdır. Tablo 2'de önerilen göstergeler, bu değerlendirmeyi uygulamaya aktaracak temel ölçüm çerçevesini sunmaktadır. Böylece tablo, sonuç bölümünde ulaşılan politika önerilerinin yalnızca nitel bir değerlendirme olarak kalmasını önlemekte ve kararların düzenli olarak izlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Politika uygulaması açısından tablo 2'deki göstergeler üç farklı amaçla kullanılabilir:

Başlangıç durumunu belirlemek: Odun açığının hangi ürün, bölge veya kullanım alanında yoğunlaştığını ortaya koymak.

Politika seçeneklerini karşılaştırmak: İthalat, yerli üretim verimliliği, geri dönüşüm veya ürün ikamesi gibi seçeneklerin toplam etkilerini değerlendirmek.

Uygulama sonuçlarını izlemek: Alınan kararların arz, maliyet, ekosistem, sanayi ve toplum üzerindeki sonuçlarını zaman içinde takip etmek.

Bu yönüyle tablo, karar alma sürecinde kullanılabilecek bir izleme ve değerlendirme matrisi işlevi görmektedir. Örneğin fiziksel arz göstergelerinde iyileşme sağlanırken ekolojik sınır göstergelerinde kötüleşme görülüyorsa, yalnızca arz artışına dayanarak politikanın başarılı olduğu sonucuna varılamaz. Aynı şekilde, ithalat birim maliyet bakımından avantajlı görünse bile biyogüvenlik riski veya karbon maliyeti hesaba katıldığında toplam maliyet daha yüksek olabilir.

Tablo 9'de odun açığını azaltma seçeneklerinin fiziksel arz, ekonomik maliyet, ekolojik sınırlar, sanayi verimliliği, biyogüvenlik ve toplumsal refah bakımından birlikte değerlendirilmesini sağlayan karar ölçütlerini sunmaktadır. Göstergeler, gerçek arz açığının belirlenmesi, seçeneklerin toplam maliyetlerinin karşılaştırılması, ekolojik eşiklerin izlenmesi, kaynak verimliliğinin ölçülmesi, ithalat risklerinin değerlendirilmesi ve kararların toplum üzerindeki dağılımsal etkilerinin ortaya konulması amacıyla önerilmiştir. Bu çerçeve, politika başarısının yalnızca odun arzındaki artışla değil, ekonomik, ekolojik ve toplumsal sonuçların birlikte izlenmesiyle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Kaynakça

[1] Orman Genel Müdürlüğü. Ormancılık İstatistikleri. https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane/kitaplik/Ormancilik-istatistikleri

[2]: https://www.fao.org/newsroom/detail/global-forest-products-trade-and-production-show-signs-of-recovery-in-2024/en "FAO, Global forest products trade and production show signs of recovery in 2024"

[3]: https://www.fao.org/newsroom/detail/global-forest-products-facts-and-figures-2023-shows-fall-in-global-trade-in-wood-and-paper-products/en "FAO, Global forest products facts and figures 2023"

[4]: https://www.ippc.int/static/media/files/publication/en/2019/02/ISPM_15_2018_En_WoodPackaging_Post-CPM13_Rev_Annex1and2_Fixed_2019-02-01.pdf "IPPC, ISPM 15: Regulation of wood packaging material in international trade"

[5]: https://seea.un.org/ecosystem-accounting "United Nations, SEEA Ecosystem Accounting"

[6]: https://www.fao.org/3/cd1211en/online/src/html/projections-increases-wood-demand.html "FAO, The State of the World's Forests 2024: Projections to 2050"

[7]: https://research.fs.usda.gov/treesearch/54252 "Binder et al., Assessment and valuation of forest ecosystem services: State of the science review"

[8]: https://www.mdpi.com/2073-4360/13/11/1752 "Besserer et al., Cascading Recycling of Wood Waste: A Review"

[9] Finland. National Forest Strategy 2035. https://mmm.fi/en/nfs2035

[10] Husgafvel ve diğerleri. Forest sector circular economy development in Finland. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.176

[11] Forest Europe. The Swedish forest as a strategic resource for climate, economy, and biodiversity. https://foresteurope.org/the-swedish-forest-as-a-strategic-resource-for-climate-economy-and-biodiversity/

[12] Natural Resources Canada. The State of Canada's Forests: Annual Report 2024. https://natural-resources.canada.ca/sites/admin/files/documents/2025-07/StateofForestReport-2024-EN.pdf

[13] Natural Resources Canada. Industry profile: Sustainable forest sector. https://natural-resources.canada.ca/sustainable-jobs/industry-profile-sustainable-forest-sector

[14] Gagnon ve diğerleri. Forest Products and Circular Economy Strategies: A Canadian Perspective. https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/673

[15] USDA Forest Service. Wood Innovations. https://www.fs.usda.gov/science-technology/energy-forest-products/wood-innovation

[16] USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. https://research.fs.usda.gov/fpl

[17] Tarım ve Orman Bakanlığı. Ormancılık İstatistikleri 2024. https://istatistik.tarimorman.gov.tr/Sayfa/Detay/2045

[18] Orman Genel Müdürlüğü. 2026 Yılı Performans Programı. https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane-sitesi/PerformansPrograms/OGM%202026%20Y%C4%B1l%C4%B1%20Performans%20Program%C4%B1.pdf

[19] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2025–2028 Ulusal Döngüsel Ekonomi Stratejisi ve Eylem Planı. https://cygm.csb.gov.tr/haberler/2025-2028-ulusal-dongusel-ekonomi-stratejisi-ve-eylem-plani-yururluge-girdi-296346

[20] Orman Genel Müdürlüğü. Ekosistem Tabanlı Fonksiyonel Orman Amenajman Planları. https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane-sitesi/mevzuat-sitesi/