

İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler

Editör: Doç. Dr. Evren SEYREK



İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler

Editör

Doç. Dr. Evren SEYREK



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozguryayinlari.com

✉ info@ozguryayinlari.com

İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler

Editor: Doç.Dr.Evren SEYREK

Language: Turkish

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-5757-50-0

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub920>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Seyrek, E. (ed) (2025). *İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub920>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozguryayinlari.com/>



Önsöz

İnşaat mühendisliği, tarihsel süreç içerisinde toplumların gelişiminde belirleyici bir rol üstlenmiş; yapı güvenliği, altyapı sürekliliği ve yaşam alanlarının sürdürülebilirliği açısından stratejik bir konumda olmuştur. Günümüzde bu disiplin, yalnızca mühendislik hesapları ile sınırlı kalmayıp çevresel, ekonomik ve sosyal parametrelerin bütüncül bir biçimde değerlendirilmesini zorunlu kılan çok boyutlu bir yaklaşım gerektirmektedir.

Bu kitap, “İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler” başlığı altında, yapı, ulaştırma ve geoteknik mühendisliği bağlamında güncel gelişmeleri, bilimsel araştırma bulgularını ve uygulama pratiklerini bir araya getirmeyi amaçlamakta olup; araştırmacılar, akademisyenler, uygulayıcı mühendisler ve lisansüstü öğrenciler için güvenilir bir başvuru kaynağı sunmayı hedeflemektedir.

Kitapta, yapı ve yapı malzemesi alanında petek kirişler ve kullanım alanları, soğukta şekil verilmiş çelik yapılar ve diğer yapı sistemleri ile mukayesesine ve hafif beton üretiminde hafif agrega kullanımı üzerine değerlendirmelere yer verilmiştir. Ulaştırma alanında, akıllı kentler ve akıllı ulaşım sistemleri ile menfez sistemlerinin ulaştırma altyapılarında kullanımı konuları bu kitapta bölüm olarak sunulmuştur. Geoteknik alanında ise derin kazılardaki iksa yöntemleri tartışılmış ve bir vaka analizi paylaşılmıştır.

Bu kitabın İnşaat mühendisliği literatürüne ve uygulama alanına değerli katkılar sunmasını temenni eder, eseri okuyucuları ile buluşturma fırsatı sunan Özgür Yayınları’na teşekkür ederim.

Doç. Dr. Evren SEYREK

Editör

İçindekiler

Önsöz

iii

Bölüm 1

Petek Kirişler ve Kullanım Alanlarına İlişkin Bir İnceleme	1
<i>Mustafa Halûk Saraçoğlu</i>	

Bölüm 2

Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Doğal ve Yapay Hafif Agregalar	17
<i>Abmet Özcan</i>	
<i>Mehmet Burhan Karakoç</i>	

Bölüm 3

Yapı Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Yapılar Eksenli Bir Değerlendirme	35
<i>Semih Konceli</i>	
<i>Gökhan Güçlü</i>	
<i>Uğur Kaşkas</i>	

Bölüm 4

Akıllı Kentlerde Sürdürülebilir Hareketlilik: Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Rolü	59
<i>Polat Yalınz</i>	

Bölüm 5

Ulaştırma Altyapısında Menfezlerin Yapısı ve Uygulamaları	73
<i>Polat Yalınz</i>	

Bölüm 6

Kent İçi Derin Kazılarda İksa Uygulamalarının Değerlendirilmesi: Bir Vaka Çalışması	85
<i>Ersin Güler</i>	

Petek Kirişler ve Kullanım Alanlarına İlişkin Bir İnceleme

Mustafa Halûk Saraçoğlu¹

Özet

Mühendislik ve mimarlık alanında gelişen yeni fikirler ve teknolojiler, yapıların tasarım anlayışını sürekli değiştirmektedir. Ancak bazı yapı elemanlarının yıllar boyunca değişmeden kullanılması, tasarımcılar için güvenilir bir dayanak noktası oluşturmaktadır. Bu bağlamda, petek kirişler uzun süredir kullanılan ve günümüzde de önemini koruyan çelik yapı elemanlarıdır. Bu çalışmada, petek kirişlerin tarihsel gelişimi, üretim yöntemleri, kullanım alanları ve yapısal üstünlükleri literatür ışığında kapsamlı şekilde incelenmiştir. Altıgen ve dairesel açıklıklı tipler en yaygın imalat yöntemleri arasında yer almakta, her biri üretim süresi, maliyet ve tasarım esnekliği bakımından farklı üstünlükler sunmaktadır. Literatürde, petek kirişlerin uzun açıklıkları ekonomik biçimde geçebilme, tesisat sistemleriyle uyum, titreşim direnci ve estetik katkı gibi çok yönlü üstünlüklere sahip olduğu vurgulanmaktadır. Petek kirişlerin statik ve dinamik davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ayrıntılı biçimde incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Daire, kare, beşgen, altıgen, elmas, sekizgen gibi farklı geometrilerdeki gövde boşluk tiplerine sahip petek kirişlerin statik ve dinamik davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmış ve boşluk geometrisinin yer değiştirme, gerilme ve titreşim özellikleri üzerinde belirleyici etkileri olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, gövde birleşim bölgelerinde yapılan yapısal iyileştirmelerin kirişlerin dayanımını artırdığı gösterilmiştir. Çalışmada petek kirişlerin üretim süreci ayrıntılı olarak açıklanmış; altıgen ve dairesel açıklıklı imalat yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, otopark yapıları, endüstriyel tesisler, ofis binaları ve enerji yapıları gibi bu kirişlerin modern yapılardaki başlıca kullanım alanları örneklerle ele alınmıştır. Sonuç olarak, petek kirişler modern yapılarda hem mühendislik hem de mimarlık açısından önemli avantajlar sağlayan yenilikçi ve verimli bir tasarım çözümü olarak öne çıkmaktadır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Yapı ABD, Kütahya, TÜRKİYE, mhaluk.saracoglu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3842-5699

1. Giriş

Mühendislik ve mimarlık alanında, her yıl yeni fikirler, yenilikler ve teknolojiler ortaya çıkmakta; bu da yarının binalarını şekillendirmektedir. Ancak belirli yapı elemanlarının yıllar boyunca tutarlı kalması, tasarımcılar için güven verici bir dayanak noktasıdır. Petek kirişler uzun süredir mimaride yaygın olarak kullanılmakta ve günümüzde de önemli bir rol oynamaktadır.

Bu tür yapı elemanlarının tasarımı için gerekli hesaplamalar pek çok araştırmacı tarafından yapılarak literatürde yerini almıştır.

Yapılan bir çalışmada, çelik petek kirişlerin minimum ağırlık tasarımında rastgele sayı dizilerinin etkisi İyileştirilmiş Armoni Arama Yöntemi (IHS) tabanlı bir optimizasyon algoritmasıyla incelenmiştir. Armoni arama, müzikal süreçlerden esinlenen sayısal bir optimizasyon tekniğidir. Tasarım kısıtlamaları, Çelik Yapı Enstitüsü Yayın No: 5 ve BS5950 standartlarına dayandırılmış, problem ayırık programlama yapısında formüle edilmiştir. Optimizasyon sürecinde Evrensel Kiriş kesitleri, altıgen delik boyutları ve kiriş boyunca açıklık sayısı tasarım değişkenleri olarak kullanılmıştır [1].

Petek kirişlerinin statik ve dinamik davranışları üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS 22 R1 sonlu elemanlar paket programı kullanarak incelenmiştir. Daire, kare, beşgen ve altıgen gibi farklı gövde açıklığı tiplerinin kirişlerin yer değiştirme, gerilme ve serbest titreşim davranışları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Analizlerde IPE120, IPE180 ve IPE240 profilleri kullanılmış, malzeme olarak doğrusal izotrop homojen çelik kabul edilmiştir. Sınır koşulları sabit-sabit, sabit-mafsallı ve sabit-serbest olarak tanımlanmıştır. Sonuçlar, gövde açıklığı tipinin kirişlerin yer değiştirmeleri, von-Mises gerilmeleri, kesme gerilmeleri ve doğal frekansları üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir [2].

Altıgen, sekizgen ve elmas gövde açıklıklarına sahip çelik petek kirişlerin eksenel yükler altındaki davranışını ABAQUS sonlu elemanlar paket programını kullanarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hesap sonuçları, gövde birleşim yerlerine eklenen çift plakaların gerilme-şekil değiştirme davranışını iyileştirdiğini, ancak deplasman üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını göstermiştir. 75 kN yük altında en düşük deplasman 12,839 mm ile altıgen profilde elde edilmiş, elmas ve sekizgen açıklıklı profillerde ise daha yüksek deplasman değerleri bulunmuştur. Bu çalışma, gövde birleşim yerlerine plaka eklenmesinin uzun vadeli yapısal dayanımı artırmak için önerildiğini ortaya koymaktadır [3].

Farklı gövde boşluk tiplerine sahip eğri eksenli petek kirişlerin serbest titreşim davranışını sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Daire, kare,

beşgen ve altıgen boşluklu IPE220, IPE240 ve IPE300 profilleri, çeşitli mesnet koşulları altında modal analize tabi tutulmuş ve çalışma sonucunda boşluk geometrisinin kirişlerin titreşim özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir [4].

Eğri eksenli petek kirişlerin statik davranışını üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş ve gövde boşluk geometrisinin yer değiştirme ve gerilme değerlerine etkisi araştırılmıştır. Daire, kare, beşgen ve altıgen boşluk tipleri modellenmiş; 10 düğümlü dört köşeli elemanlar ve lineer, izotrop homojen çelik malzemesi kullanılmıştır. Sınır koşullarını ankastre–ankastre, ankastre–basit ve ankastre–serbest olarak uygulanmıştır. Analizler sonucunda boşluk tipinin yer değiştirme, von-Mises ve maksimum asal gerilmeler üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu gösterilmiştir [5].

2. Materyal ve Yöntem

Petek kirişler, düzenli ve tekrarlayan delik desenine sahip elemanlardır. Bu desen, iki kiriş yarısının uzunlamasına kesilip kaydırılması ve ardından tek bir genişletilmiş kiriş oluşturmak için kaynaklanmasıyla elde edilir. Bu kirişler, 20. yüzyılın ikinci yarısından bu yana çeşitli inşaat projelerinde kullanılmaktadır ve son yıllarda çok yönlü kullanım alanları nedeniyle adeta bir “rönesans” yaşamaktadır.

Petek kirişler, çelik profil kirişlerin modern bir çeşidi olup üretim süreci çift aşamalı bir işlem içerir. Petek kirişler modern mimaride de geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

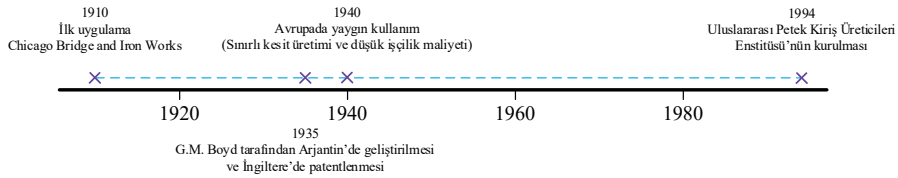
2.1. Petek Kirişlerin Tarihçesi

Geniş başlıklı çelik kirişlerde servis hatlarının geçirilmesine olanak sağlamak amacıyla gövde açıklıkları oluşturulması fikri, çeliğin yapısal bir malzeme olarak kullanımının erken dönemlerine dayanmaktadır. Gövde açıklıklı kirişlerin tasarımı, AISC Tasarım Kılavuzu 2: Gövdeli Açıklıklara Sahip Çelik ve Kompozit Kirişlerin Tasarımında ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bununla birlikte, kılavuzda belirtilen tasarım ilkelerinin, tekrarlayan açıklıklarla oluşturulan genişletilmiş gövde kesitlerine sahip petek kirişler için geçerli olmadığı açıkça ifade edilmiştir [6].

Literatürde, petek kirişler altıgen ve dairesel açıklıklarla genişletilmiş kesitler olarak tanımlanmaktadır. Gövdeli açıklıklara sahip genişletilmiş kesitli kirişlerin ilk uygulaması 1910 yılında Chicago Bridge and Iron Works tarafından gerçekleştirilmiştir [7]. Bu fikir, 1935 yılında G.M. Boyd tarafından Arjantin’de geliştirilmiş ve daha sonra Birleşik Krallık’ta patent altına alınmıştır [8].

Özellikle 1940'lı yıllarda, Avrupa'da çelik fabrikalarının sınırlı kesit üretim kapasiteleri ve düşük işçilik maliyetleri nedeniyle petek kirişlerin kullanımı hızla yaygınlaşmıştır. Manuel genişletme teknikleri sayesinde, daha büyük kesit boyutlarının ekonomik biçimde elde edilmesi mümkün olmuştur. Buna karşın, Amerika Birleşik Devletleri'nde yüksek işçilik maliyetleri ve üretim koşullarının farklılığı sebebiyle söz konusu kirişlerin kullanımı uzun süre sınırlı kalmıştır.

Üretim teknolojilerinde otomasyonun gelişmesi ve mimar ile mühendislerin daha verimli ve ekonomik tasarım yöntemlerine duyduğu ihtiyaç, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren Amerika'da da petek kirişlerin kullanımını artırmıştır. Bu süreç, genişletilmiş kesitlerin dünya genelinde yaygınlaşmasına zemin hazırlamış; 1994 yılında ise bu kirişlerin tasarımı ve üretimine yönelik standartların geliştirilmesi amacıyla Uluslararası Petek Kiriş Üreticileri Enstitüsü kurulmuştur. Şekil 1'de petek kirişlerin gelişimi ile ilgili zaman çizelgesi gösterilmektedir.



Şekil 1. Petek Kirişlerin Tarihçesi – Zaman Çizelgesi

2.2. Petek Kirişlerin İmalatı

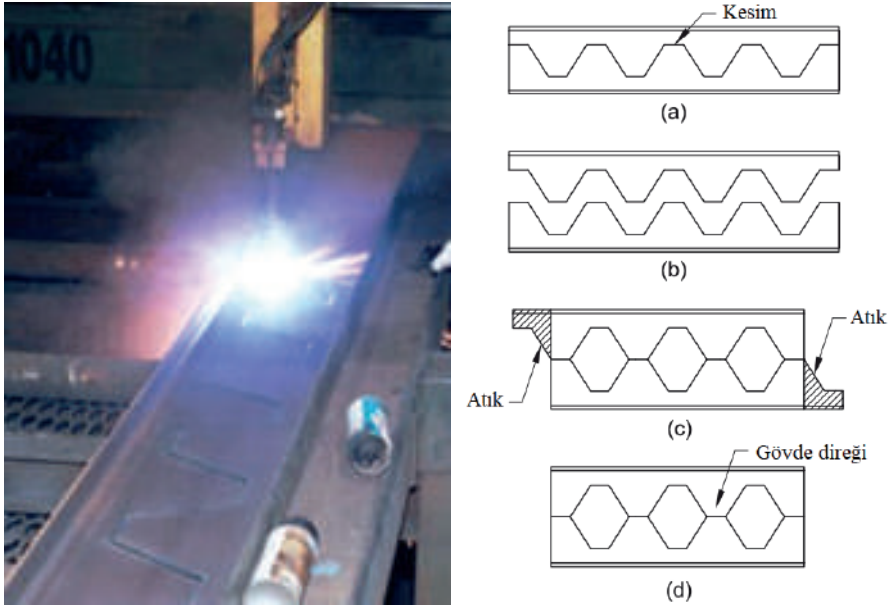
Petek kirişlerde altıgen veya dairesel delikler kullanılabilir. Bu iki tip petek kiriş tasarım açısından benzerlik gösterirken üretim sırasında bazı farklılıkları vardır. Dairesel delikli petek kirişler, delik boyutu ve dağılımını esnek bir şekilde değiştirmeye olanak tanır; bu da dolgu miktarını azaltır ve üretim sürecini değiştirmeden farklı hücre çapları kullanılabilmesine olanak sağlar.

Altıgen ve dairesel delikli petek kirişler, genellikle belirli bir projedeki özel konum ve ihtiyaçlara uygun olarak tasarlanmaktadır. Her iki kiriş tipinin üretim süreçleri benzerlik göstermekte olup, aralarında bazı farklılıklar bulunmaktadır.

Altıgen delikli petek kirişler, geniş başlıklı bir kesitin gövdesi boyunca bilgisayar ile kontrollü olarak iki parçaya ayrılması ile zikzak deseninde yapılan kesimler sonucunda üretilir. Üretim süreci Şekil 2'de adım adım

gösterilmektedir. İlk olarak kesit uygun desende kesilir (Şekil 2a), ardından elde edilen iki yarım parça birleştirilir (Şekil 2b). Daha sonra kiriş uçlarında oluşan atık parçalar temizlenir (Şekil 2c) ve iki bölüm, altıgen delikli petek kirişi oluşturacak şekilde kaynaklanır (Şekil 2d). Bu aşamadan sonra, gövde kalınlığının nispeten küçük olması durumunda kenarların keskinliğinin giderilmesine gerek duyulmadan, gövdenin bir tarafından tam veya kısmi penetrasyonlu alın kaynağı uygulanmaktadır.

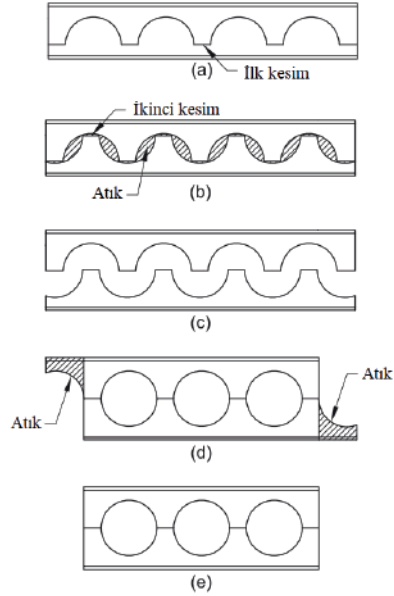
Dairesel delikli petek kirişler ise iç içe geçmiş yarım daire biçimli kesim desenleri ile benzer bir yöntem kullanılarak üretilmektedir. Tekrarlayan dairesel deseni elde edebilmek için iki ayrı kesme geçişi yapılması gerekmektedir (Şekil 3). İki kesme geçişi, üretim sürecinde çeliğin daha fazla işlenmesine yol açtığından, dairesel delikli petek kirişlerin üretim süresi altıgen delikli petek kirişlere göre bir miktar daha uzundur. Ayrıca dairesel kesim işlemi, zikzak desen kesimlerine kıyasla daha fazla atık ortaya çıkarmaktadır (Şekil 3b). İki kesim tamamlandıktan sonra elde edilen yarım parçalar, kaydırılarak yeniden birleştirilir ve kaynak işlemi ile dairesel delikli petek kiriş oluşturulur. Dairesel delikli petek kiriş üretim sürecine ait bir fotoğraf Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 2. Altıgen delikli petek kiriş imalatı [9]

Dairesel delikli petek kirişler, özel projeler ve alışılmadık tasarımlar için derinlik ve özelleştirme imkânı sunar. Öte yandan, altıgen delikli petek

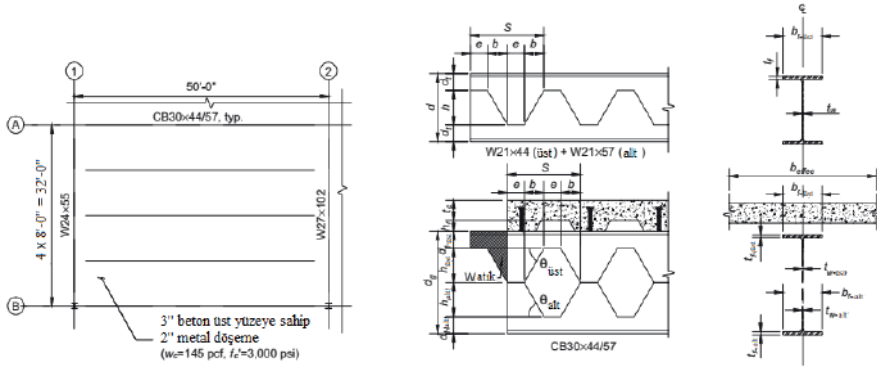
kirişler maliyet etkinliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve standart kullanım kolaylığı nedeniyle halen birçok projede tercih edilmektedir.



Şekil 3. Dairesel delikli petek kiriş imalatı [9]

Petek kirişlerin üretim süreci, I profilden imal edilmiş çelik kirişin iki ayrı parçaya ayrılmasını içerir. Açıklık aralıkları eşit olduğu sürece, bu iki kiriş yarısı birbirine kaynaklanarak asimetrik bir kesit oluşturabilir. Bu yaklaşım, özellikle üst T-parçasının beton döşeme ile çalıştığı kompozit uygulamalarda üstünlük sağlayacaktır.

Kompozit tasarımlarda, üst T-parçası için daha küçük bir çelik profil ve alt T-parçası için daha büyük bir çelik profil kullanılarak asimetrik kesitler elde etmek genellikle maliyet açısından daha etkin bir çözüm olmaktadır. Petek kirişlerin de kullanıldığı bir döşeme örneği Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Petek kirişlerin kullanıldığı bir döşeme örneği [9]

2.3. Petek Kirişlerin Kullanım Alanları

Petek kirişlerin çelik profillerden imal edilmiş kirişlere göre çeşitli yapısal üstünlükleri bulunmaktadır. Bu tip kirişlerde gövde yüksekliğinin artması sonucunda daha büyük mukavemet momenti, güçlü eksen göre daha büyük atalet momenti ve daha yüksek derinlik/ağırlık oranı oluşmaktadır. Bu artışlar sonucunda daha uzun açıklıklar geçilirken aynı zamanda maliyet etkin çözümler oluşturarak önemli ekonomik tasarruflar sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu üstünlükler daha karmaşık analiz gereksinimlerini de beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, petek kirişlerin tasarımında hem yapısal verimlilik hem de ekonomik uygulanabilirlik açısından dikkatli değerlendirmeler gerekir.

Petek kirişlerin temel kullanım amacı, daha hafif kesitler ile uzun açıklıkların geçilebilmesidir. Genel olarak 10 metre üzerindeki açıklıklarda pratik çözümler sunarken, 12 metre üzerindeki açıklıklarda ise oldukça ekonomik bir alternatif oldukları gösterilmiştir [10]. Bu kirişler kullanılarak daha büyük alanlara sahip döşemeler tasarlanmasına olanak tanımaktadır. Böylece tasarımcıya planlamada daha fazla esneklik sağlamaktadır. Bu durum da tasarımda önemli bir üstünlük oluşturmaktadır.

Petek kirişlerin başlıca üstünlükleri arasında, daha uzun açıklıkların daha az kolon ile geçilebilmesi yer almaktadır. Bu özellik, hem fazladan kolonsuz alanların elde edilmesini hem de kat alanı kullanımında esneklik oluşturulmasına imkân sağlamaktadır. Daha uzun kirişlerle açıklıkların geçilmesi daha az yapısal eleman gereksinimine yol açmaktadır. Böylece montaj süresi kısalmak ve maliyetler de düşecektir.

Bu özellikleri nedeniyle petek kirişler, uzun açıklık gereksinimi bulunan eğitim yapıları, ofis binaları, otopark yapıları, depolar, endüstriyel tesisler ve hastaneler gibi yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedirler.

2.3.1 Otopark Yapıları

Son yıllarda petek kirişlerin otopark yapılarında kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Otopark yapılarında açıklıklar genellikle yaklaşık 18 metre civarındadır ve bu yapılarda kullanım kolaylığı, çoğu zaman taşıma kapasitesinden daha kritik bir tasarım kriteri olarak öne çıkmaktadır. Otopark yapılarının zemin sistemlerinin, açık ağılı çelik kirişler veya çelik kirişler yerine, geniş başlıklı profil kirişleri ve çelik kirişler veya petek kirişleri kullanılarak tasarlanması önerilir [11].



Şekil 5. Otopark yapılarında petek kirişler [9, 12-14]

Mevcut en hafif 76 cm derinliğe sahip geniş başlıklı kesit olan W30×90 ile karşılaştırıldığında, petek kirişlerin kullanımı yaklaşık %33 oranında ağırlık tasarrufu sunmaktadır. Bu durum yalnızca doğrudan malzeme maliyetlerinde tasarruf sağlamamakta, aynı zamanda yapının genel kütlelerini azaltarak yanal yükler ile temel tasarımındaki yükleri de düşürmektedir.

Açık ağılı çelik kiriş geometrisi, yalnızca yapısal fayda sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda mimari ve fonksiyonel avantajlar da sunmaktadır. Gövde açıklıklarından geçen ışık, otoparkın iç mekânını doğal olarak aydınlatmakta; bu özellik özellikle kat yüksekliğinin sınırlı olduğu otoparklarda, masif kirişli sistemlere kıyasla daha aydınlık ve ferah bir ortam oluşturmaktadır. Şekil 5'te petek kirişlerin kullanıldığı otopark yapılarından örnekler gösterilmektedir.

2.3.2. Endüstriyel Tesisler

Endüstriyel tesislerde, asma katlar, havai konveyör sistemleri, hava işleme üniteleri, proses ekipmanları ve ofis alanları gibi yapılar için ek kullanım alanı sağlamak kritik bir tasarım gereksinimidir. Uzun açıklıklı petek kirişler, bu tür uygulamalarda yapısal performans açısından üstünlük sağlar. Bu kirişler, asma katları ve ekipman yüklerini taşıyabilmek için gereken kolon sayısını azaltarak mekânsal verimliliği artırır. Şekil 6'da çeşitli endüstriyel yapılarını genel olarak göstermektedir.



Şekil 6. Endüstri yapılarında petek kirişler

2.4. Petek Kirişlerin Üstünlükleri

Petek kirişler modern projelerde hâlen geniş bir kullanım alanına sahiptir. Büyük şehirlerdeki otoparklar, geniş açıklıklı ofis binaları ve enerji tesisleri gibi yapılar, bu kirişlerle ekonomik, dayanıklı ve esnek şekilde inşa

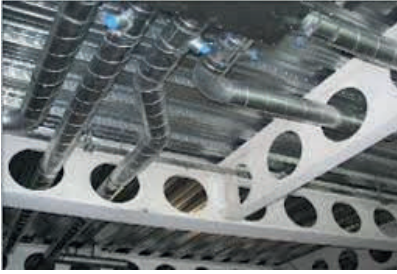
edilebilmektedir. Kirişlerin hafifliği, yüksek mukavemeti ve maliyet etkinliği, yoğun yapılaşmanın yaşandığı şehirlerde önemli avantajlar sağlar.

Günümüzde, artan şehir nüfusu ile ek alan ihtiyacı da hızla artmaktadır. Özellikle otopark gibi yapılar, büyük şehirlerde araç sahiplerinin ihtiyaçlarını karşılamak açısından kritik bir rol oynamaktadır. Petek kirişler, beton gibi geleneksel malzemelere kıyasla önemli maliyet ve malzeme tasarrufu sağlayarak bu tür uygulamalarda ideal bir çözüm sunmaktadır.

Aynı zamanda, modern iş dünyasında yeni girişimler ve yaratıcı fikirler sürekli olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, açık ofis yapıları ve esnek kullanım alanları gerektirmektedir. Petek kirişler, mimarların çelik eklemelerine gerek kalmadan gereken yapısal dayanımı sağlamalarına olanak tanır. Kirişlerin esnek tasarımı, düşük maliyetle güçlü ve uyarlanabilir alanlar oluşturmayı mümkün kılar; böylece ihtiyaca göre büyük veya küçük alanlar tasarlanabilir.

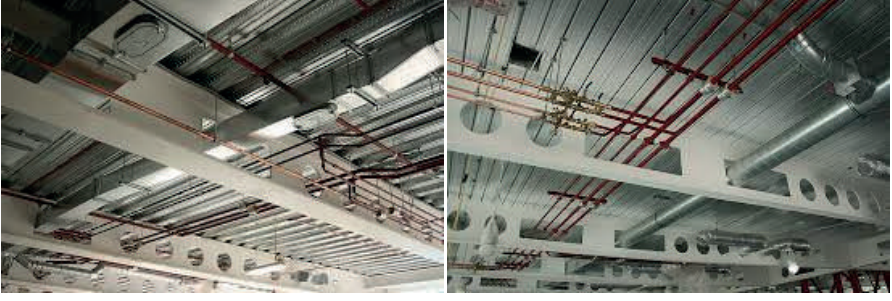
2.4.1. Servis, Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme ile Uyum

Petek kirişlerin en önemli üstünlüklerinden birisi, tesisat sistemlerinin doğrudan kiriş açıklıklarından geçirilebilmesidir. Şekil 7, açık ağ kesitleri kullanılarak her kat için birkaç santimetre yükseklik tasarrufu sağlanabileceğini göstermektedir.



Şekil 7. Petek kirişlerde havalandırma ve iklimlendirme tesisatları

Petek kirişlerdeki boşluklar, Şekil 8’de gösterildiği üzere boru, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme ve yangın söndürme sistemleri ile diğer mekanik ve elektrik tesisatlarının montajı için doğrudan kullanılabilir.



Şekil 8. Petek kirişlerde tesisat montajı

Ofis binalarında petek kirişlerin kullanımı, mal sahiplerine ve gelecekteki kiracılara ek kablolama ve altyapı yerleşimi için yüksek esneklik sağlar. Boruların ve kabloların kiriş derinliği içerisinde geçmesi, özellikle tıbbi tesislerde, gaz, veri ve diğer kritik tesisatların bina inşaatı tamamlandıktan sonra da taşınabilmesini veya eklenmesini kolaylaştırır.

Ayrıca, tüm tesisatlar kiriş derinliği içinde konumlandırıldığında, tavan doğrudan yapıya sabitlenebilir (Şekil 9). Enerji üretim tesisleri ve yoğun boru altyapısına sahip diğer endüstriyel yapılarda petek kirişler önemli fayda sağlanabilir.



Şekil 9. Petek kirişlerde tavan yapısı [9]

2.4.2. İnşaat Verimliliği

Yapılarda petek kirişlerin kullanımı doğrudan veya dolaylı olarak verimlilik sağlar. Uzun açıklıklı kirişler, gerekli kolon sayısını azaltarak daha az temel inşaatı gerektirir ve bu durum doğrudan maliyet tasarrufu oluşturur. Yapıdaki eleman sayısının azalması, imalat ve montaj süreçlerinde de ek tasarruf sağlayacaktır.

Çelik montaj, inşaat programında kritik bir konumda ise daha kısa inşaat süresi dolaylı olarak finansman ve genel proje koşullarında ek üstünlük sağlayacaktır. Ayrıca, inşaatın erken tamamlanması, mal sahibinin projeden daha erken gelir elde etmesine olanak tanır.

Bu özellikler, petek kirişlerin özellikle büyük ölçekli endüstriyel ve ticari projelerde tercih edilmesinde önemli bir rol oynar.

2.4.3. Titreşim Direnci

Petek kirişler, eşdeğer ağırlıktaki geniş başlıklı profillerden imal edilmiş kirişlere kıyasla yaklaşık 1,5 kat daha derin bir kesite sahiptir. Bu derinlik artışı, kirişlere yüksek rijitlik kazandırır ve çelik profil kirişlerine kıyasla daha fazla titreşim direnci sağlayacaktır. Artan rijitlik, döşeme veya çatı sistemleri üzerindeki titreşim etkilerini de önemli ölçüde azaltır.

AISC Tasarım Kılavuzu 11, çelik çerçeve yapısal sistemlerde insan aktivitelerinden kaynaklanan titreşimleri kapsamaktadır [15]. Tam ölçekli testler, kompozit petek kirişler üzerinde gerçekleştirilmiş ve döşeme sistemleri için uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır. Bu sonuç hem kompozit hem de kompozit olmayan petek kirişler için benzer bir uygulamanın uygun olduğunu göstermektedir.

2.4.4. Estetik

Petek kirişler tasarımcılara mimari açıdan önemli yapısal elemanlar oluşturma konusunda yüksek esneklik sağlamaktadır. Bu kirişler üretim sırasında kolayca eğri eksenli duruma getirilebilir (Şekil 10). Geleneksel geniş başlıklı kirişlerin aksine, mekanik yöntemler veya ısı uygulanarak yapılan sonradan eğri eksenli duruma getirilmek yerine, petek kirişlere üretim sürecinde doğrudan uygun eğrilik kazandırılır. Ayrıca, kirişin üst ve alt yarıları kaynaklanmadan önce T bağlantıları bükülerek, kirişlerin kavislendirilmesi mümkün olur.



Şekil 10. Eğri eksenli petek kiriş [9]

Şekil 11’de gösterildiği gibi, açıkta kalan konik elemanlar da estetik ve yapısal amaçlarla kullanılabilir. Konik kirişler, kesme desenlerinin kirişin uzunluğu boyunca eğilmesi ve kiriş yarısının, kiriş direklerinin kaynakları tamamlanmadan önce 180° döndürülmesi ile elde edilir.



Şekil 11. Estetik petek kirişler ve konik çatı kiriş elemanları [9]

Petek kirişler, genellikle estetik açıdan hoş yapısal elemanlar olarak değerlendirilir ve kirişlerin görünür olduğu yapılarda mimari avantaj sağlar. Petek kirişler estetik açıdan da mimari projelere değer katar. Açıkta kalan kirişler, şık ve zarif bir görünüm sağlar, bu da yapıların hem fonksiyonel hem de görsel açıdan etkileyici olmasına katkıda bulunur. Bu duruma örnek olarak Şekil 12’de Hollanda’da her 10 yılda bir düzenlenen uluslararası bir sergi ve bahçe festivali olan Amsterdam Floriade’nin giriş kapıları gösterilmektedir.



Şekil 12. Amsterdam Floriade'nin giriş kapıları [16].

3. Sonuç

Petek kirişler, 20. yüzyılın ikinci yarısından bu yana mimari tasarımda önemli bir yapı elemanı olmuştur ve 21. yüzyılda da bu rolünü sürdürmesi beklenmektedir. Hafiflik, yüksek dayanım, maliyet etkinliği ve kullanım esnekliği gibi özellikleri, mühendisler ve mimarlar için önemli üstünlükler sunar. Literatürdeki bulgular petek kirişlerin hem mühendislik hem de mimarlık açısından çok yönlü üstünlüklerinin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle de modern yapı tasarımında kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir. Petek kirişlerin uzun açıklıkların ekonomik şekilde geçilmesine, servis tesisatlarıyla uyum sağlamasına, titreşim direnci kazandırmasına ve mimari estetik sunmasına olanak verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda, geleceğin yapılarında sağlam, esnek ve ekonomik çözümler arayan tasarımcılar için petek kirişler, vazgeçilmez bir yapı elemanı olmaya devam edecektir.

Kaynaklar

- [1] Erdal, F., Taş, S., Tunca, O., & Çarbaş, S. (2016). Effect of Random Number Sequences On The Optimum Design of Castellated Beams With Improved Harmony Search Method. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*, 8(3), 39.
- [2] Mezher, N. A., Noori, A. R., & Ertürkmen, D. (2023). Influence of the Web Opening Shapes on the Bending and Free Vibration Responses of Castellated Steel Beams. *International Journal of Engineering Technologies*, 8(2), 83–100.
- [3] Yustisia, V. W., Suswanto, B., Irawan, D., & Iranata, D. (2020). The Structural Behavior Of Castellated Beam With Shape Variation Using Finite Element Methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 930. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/930/1/012051>
- [4] Ertürkmen, D., & Noori, A. R. (2023a). Farklı Geometrik Boşluklu Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Serbest Titreşim Analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13, 1019–1032. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1262258>
- [5] Ertürkmen, D., & Noori, A. R. (2023b). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Eğri Eksenli Petek Kirişlerin Eğilme Analizi. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 38(1), 73–83.
- [6] Darwin, D., & Lucas, W. K. (1990). LRFD for Steel and Composite Beams with Web Openings. *Journal of Structural Engineering*, 116(6), 1579–1593. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:6\(1579\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:6(1579))
- [7] Srimani, S. S. L., & Das, P. K. (1978). Finite Element Analysis Of Castellated Beams. *Computers & Structures*, 9(2), 169–174. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90135-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90135-9)
- [8] Knowles, P. (1977). *Design of structural steelwork*. Surrey University Press.
- [9] Fares, S. S., Eng, P., Coulson, J., & Dinchart, D. W. (2016). *Castellated and Cellular Beam Design 31 Steel Design Guide*.
- [10] Estrada, H., Jimenez, J. J., & Aguiniga, F. (2006). Cost Analysis in the Design of Open-Web Castellated Beams. *Building Integration Solutions*, 1–10. [https://doi.org/10.1061/40798\(190\)53](https://doi.org/10.1061/40798(190)53)
- [11] Churches, C. H., Troup, E. W. J., & Angeloff, C. (2003). *8 Steel Design Guide Steel-Framed Open-Deck Parking Structures*.
- [12] S, A., & A, C. (2018). *ACB® and Angelina® beams - A new generation of castellated beams*. https://constructalia.arcelormittal.com/files/5_4_1_Beams%20with%20large%20web%20openings--3ff8cc6da29648acc-48b7c44d0cfd07f.pdf

- [13] *Saint Anne's Square Car Park*. (2012). Web Page. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saint_Anne%27s_Square_Car_Park,_Belfast,_April_2012_\(02\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Saint_Anne%27s_Square_Car_Park,_Belfast,_April_2012_(02).JPG)
- [14] Silva, J. A. da, Dalcantal, P. R., & Mesquita, L. M. R. de. (2019, July 15). Numerical Analysis of Cellular Steel Beams Failure Modes in Fire Conditions. *5º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano Sobre Segurança Contra Incêndio*.
- [15] Murray, T. M., Allen, D. E., Ungar, E. E., & Davis, D. B. (2016). *Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity Second Edition*. https://pardis-clm.ir/wp-content/uploads/2022/05/AISC_Design_Guide_11_Vibrations_of_Steel_Framed_Structural_Systems.pdf
- [16] *Entrance gates of the Amsterdam Floriade*. (1981). Web Page. <https://www.grunbauer.nl/eng/projecten02.htm>

Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Doğal ve Yapay Hafif Agregalar

Ahmet Özcan¹

Mehmet Burhan Karakoç²

Özet

Yapı alanında en çok kullanılan iki malzemeden bir olan beton üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu ana bileşenler çimento, agrega ve sudur. Yapının ölü yükünü azaltma, dolayısıyla taşıyıcı elemanların boyutlarının küçülmesi ve yapı maliyetini azaltma gibi avantajları sebebiyle hafif betona olan ilgi artmaktadır. Hafif beton üretiminde katkı kullanımı (köpükleştirici ajan, Al tozu ve Zn tozu vb.) veya hafif agrega kullanımı tercih edilmektedir. Hafif agregalar doğal ve yapay hafif agrega olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pomza, perlit, diatomit, skorya, volkanik tüf gibi agregalar hafif betonlarda ince ve/veya iri agrega olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş polistiren taneleri, kauçuk atıkları gibi endüstriyel atıklar veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kil gibi malzemeler çeşitli işlemlere tabi tutularak agrega formu kazandırılıp hafif betonlarda yapay hafif agrega olarak kullanılabilir. En yaygın olarak kullanılanlardan biri olan ve ticari ürün olarak dünyanın birçok bölgesinde temini mümkün olan genleştirilmiş kil agregası da bir yapay hafif agregadır. Yenilikçi yöntemlerden biri olan ve şu an bilim insanlarının da ilgisini çeken geopolimer hafif agregalar, endüstriyel atıkların çeşitli alkali çözeltilerle birlikte karıştırılıp elde edilen hamura agrega formunun kazandırılması ile üretilmektedir. Üretilen bu yapay hafif agregalar soğuk bağlama, sinterleme veya otoklav kür uygulamalarına tabi tutularak sertleştirilmektedir. Sinterleme işleminde agregalar daha düşük yoğunlukta üretilse de, sinterleme için gerekli olan enerji maliyeti dikkate alındığında bu yöntem diğer yöntemlere göre ekonomik açıdan dezavantajlıdır. Genel olarak doğal veya yapay hafif agrega kullanılarak üretilen hafif betonların düşük birim hacim ağırlık, yüksek ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahip olması sebebiyle yapılarda kullanımı cazip hale gelmektedir.

- 1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, 43100, Türkiye, ahmet.ozcan1@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6451-9413
- 2 Prof. Dr., İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, 44280, Türkiye, mehmet.karakoc@inonu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-6954-0051

1. Giriş

Beton, çimento, ince agrega ve iri agregadan oluşan bir yapı malzemesidir. Betonun bileşenleri arasında iri agrega, betona daha fazla hacimsel stabilite ve dayanıklılık kazandırır. Çimentodan daha ucuzdur ve bu nedenle betonda ekonomi sağlanmasına doğrudan yardımcı olur. Bu nedenle mümkün olduğunca fazla iyi agrega kullanılmalıdır. İyi bir agrega hem taze hem de sertleşmiş betonda istenen özellikleri sağlamalıdır [1]. Yüksek binaların, büyük ölçekli beton yapıların ve uzun açıklıklı beton yapıların hızla gelişmesiyle birlikte, daha iyi sağlam performans için artırılmış mukavemet, tokluk ve hafif beton gerekli hale gelmiştir. Bu nedenle inşaatla doğal volkanik malzemelerin (pomza ve kül gibi) kullanımı artmaktadır. Yapı malzemesi olarak kullanımları inşaat maliyetlerini düşürmeye yardımcı olabilir. Betonda hafif agreganın modern kullanımı, çeşitli yapı elemanlarının ağırlığını hafifleterek temellere iletilen yükü azaltmaya yardımcı olur. Hafif betondaki boşluk ve gözeneklerin varlığı iyi termal ve akustik yalıtım özellikleri ve yangına dayanıklılık sağlar. Bu nedenle, normal dayanımlı betona kıyasla hafif yapısal beton, daha iyi mukavemet-ağırlık oranı, daha güçlü çekme gerilme kapasitesi, daha düşük termal genleşme katsayısı ve ısı-ses yalıtımı gibi gelişmiş özelliklere sahiptir [2-4].

Yapı malzemelerinin yaygın kullanımı sonucunda kaynakların tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Avrupa Birliği'nde binalar, çıkarılan tüm malzemelerin yüzde 50'sini, sera gazı emisyonlarının yüzde 35'ini ve atık akışlarının yüzde 32'sini oluşturmaktadır. Binaların gelecekte daha fazla enerji tüketmesini beklemekle birlikte Uluslararası Enerji Ajansı, enerji tüketiminin 2050 yılına kadar iki katına çıkacağını öngörmektedir. İnşaatla kullanılan birincil malzeme olan betonun kentleşmeye olan talebin artması ile birlikte üretimi de artmıştır. Her yıl, beton üretimi için agrega çıkarılmaktadır. Bu yenilenemeyen doğal kaynaklar tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır [5].

Küresel yapı pazarındaki yıllık agrega ihtiyacı 2020 yılında 55 milyar tona ulaşmıştır. Tüketim oranları aynı kalırsa, bu miktar önümüzdeki on yılda iki katına çıkacaktır. Bu durum, yakın gelecekte yapı inşaatları için kaçınılmaz bir sorun olacak doğal agrega kıtlığına yol açmaktadır. Agregası, büyük ölçekli beton inşaatının arka planında acil bir sorun olmuştur. Düşük karbon ayak izine sahip yapı malzemelerinin tercih edilmesi, sürdürülebilir inşaat uygulamaları açısından en etkili stratejilerden biridir. Uygun malzeme seçimi sayesinde CO₂ salınımlarında yaklaşık %30 oranında azalma sağlanabilmektedir. Bu nedenle, doğal agregalara çevresel açıdan uygun alternatiflerin araştırılması ve değerlendirilmesi günümüzde acil bir gereklilik haline gelmiştir [6-7].

Agregalar, özellikle beton üretimi başta olmak üzere inşaat sektöründe en yaygın kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Betona yönelik sürekli artan talep, beton hacminin yaklaşık %60-70'ini oluşturan agregalara da olan talebi artırmaktadır [8]. Agregalar, inşaat alanında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Ayrıca, agrega beton üretiminde kullanılması gereken malzemelerden biridir. Kullanılan agregaların çoğu doğal kaynaklardan elde edilir. Beton endüstrisi, büyük miktarda doğal kaynak kullandığı için küresel çevre sorunlarını etkilemektedir. Yapay hafif agrega gibi hafif malzemelerin geliştirilmesi, doğal kaynak kullanımının azaltılmasına yardımcı olacaktır. İnşaat alanında, betonda kullanılan hafif agrega, oldukça çevre dostu bir malzeme türüdür. Hafif agrega, geleneksel agregadan önemli ölçüde farklıdır. Bu farklılıklar, tasarımcılara ağırlık azaltımı, geçirgenliğin azalması ve daha uzun kullanım ömrü gibi çeşitli avantajlar da sağlar [9].

Hafif agregalar genellikle silisli çakıl veya kil, pomza taşı veya volkanik küllerden üretilir. Sıradan agregalar, doğal olarak aşınan çakılların parçalanıp istenen boyuta elenmesiyle elde edilir. Doğal agregaların kullanımı, bu malzemelerin bu genişleyen altyapıda tam olarak kullanılması nedeniyle ciddi bir sorun haline gelmiştir. Doğal agrega ile hafif agrega karşılaştırıldığında, hafif agreganın yoğunluğu daha azdır. Hafif agreganın daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle daha fazla yalıtım sağlar ve hafif beton üretiminde kullanılabilir. Hafif agrega ayrıca taş ocağı atıkları, palmiye kabuğu, kağıt tortusu, pet şişeler, kanalizasyon tortusu, çelik çürüğü, taban külü ve uçucu kül gibi endüstriyel kaynaklar kullanılarak da oluşturulabilir [10].

Hafif agregalar, yaygın inşaat agregalarına kıyasla daha düşük yoğunluğa sahiptir. 2000 kg/m³'ün altında yoğunluğa sahip hafif agregalar, özellikle betonun ağırlığını azaltmak, dayanıklılığını artırmak ve termal ve akustik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Şimdiye kadar, hafif beton üretiminde birçok farklı hafif malzeme başarıyla kullanılmıştır. Bunlar arasında pomza, çürük veya diatomit gibi doğal malzemeler, genleşme için ısı işlemi gerektiren genleştirilmiş perlit, vermikülit, genleştirilmiş şist ve arduvaz veya şişirilmiş kil gibi doğal malzemelere dayalı yapay agregalar ve genleştirilmiş yüksek fırın çürüğü, sinterlenmiş uçucu kül veya sinterlenmiş arduvaz gibi endüstriyel yan ürünler yer almaktadır. Ancak, bu malzemelerin mekanik mukavemeti ve yoğunluğu türlere, kaynaklara ve üretim yöntemlerine göre değişir. Hafif agreganın işlevsel özellikleri kabuk kalınlığına, gözenek hacmine, gözenek dağılımlarına, boyutuna ve şekline bağlıdır. Agregalar şekilleri yuvarlak, kübik, köşeli veya düzensiz olabilir. İnce gözeneklerden ve açıkta iri gözenekli düzensiz yüzeylere kadar farklı dokulara sahip olabilir. Agregalar yüzey dokusu ve şekli, beton karışımının işlenebilirliğini, su ve çimento gereksinimlerini önemli ölçüde etkileyebilir [11].

2. Doğal Hafif Agregalar

Hafif beton üretiminde kullanılan doğal hafif agregalar pomza, skorya gibi volkanik kökenli malzemeler veya diatomit gibi fosil esaslı malzemelerdir. Bu doğal hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Doğal hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri

Hafif agrega	Ertiv kurusu yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ağırlık	24 saatlik su emme (%)	Kaynak
Pomza	790	1.26-1.51	18.1-28.8	[12-13]
Skorya	850	1.15-1.71	11.9-35.6	[12, 14-15]
Diatomit	420-600	1.85-2.45	61.0-112.0	[16-17]

2.1. Pomza

Orijinal pomza adı Latince pumex (köpük) kelimesinden gelmektedir. Pomza, riyolitik magmanın ani soğuması ve basıncın hızla düşmesi sonucu oluşan, yüksek oranda gözenekli yapıya sahip, hafif ve süngerimsi görümlü doğal bir volkanik cam türüdür. Gözenekliliği %80’in üzerinde olup, oldukça düşük yoğunluk ve geniş bir iç yüzey alanı sağlamaktadır. Pomzanın rengi sıklıkla gri veya beyazdır veya beyazdan altına, kahverengiden siyaha kadar değişir. Kimyasal olarak, amorf SiO₂ (≥%55), Al₂O₃ (en fazla %22) ve alkali oksitler açısından zengindir ve bu da onu puzolanik reaksiyonlar için uygun hale getirir. Pomza, düşük yoğunluk, iyi ısı yalıtımı, iyi yangın direnci ve yanmazlık, kabul edilebilir basınç dayanımı, makul elastikiyet ve düşük geçirgenliğe sahip gözenekli yapı gibi onu hafif agregası olarak nitelendiren birçok potansiyel özelliğe sahiptir [18-19].

Abbu ve diğ. [20] betona hem ince agregası hem de iri agregası yerine %20, 40, 60, 80 ve 100 oranlarında pomza ikame etmişlerdir. İnce agregası yerine pomza ikame edilen serilerde yoğunluklar 2 t/m³’ün üzerinde iken, iri agregası yerine %60 ve üzerinde pomza ikame edilen serilerde yoğunluklar 2 t/m³’ün altına inmiştir. Pomza ikamesi ile birlikte numunelerin basınç dayanımlarında %40’a kadar azalma meydana gelmiştir. Suseno ve diğ. [12] pomzayı iri agregası olarak kullanmışlar ve hafif beton üretmişlerdir. Üretilen bu betonların basınç dayanımları 18 ile 30 MPa arasında, yoğunlukları ise 1705 ile 1725 kg/m³ arasındadır. Shafiq ve diğ. [13] pomza agregası kullanarak ürettikleri hafif betonun birim hacim ağırlığının 1674 kg/m³, basınç dayanımının ise 10.5 MPa olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Skorya

Patlayıcı volkanik patlamaların bir ürünü olan skorya, dünyada yüzyıllardır yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar, beton üretiminde yapı malzemesi olarak skorya kullanımını incelemiştir. İri agrega olarak kullanılan skoryanın yeterli dayanıma sahip olması sayesinde, yapılardaki ölü yükü azaltma avantajı sağlayan hafif beton üretiminde oldukça faydalı olduğu belirlenmiştir [21]. Skorya hem teknik hem de çevresel avantajlar sunmaktadır. Birçok bölgede yerel olarak bol miktarda bulunan hafif, gözenekli bir volkanik malzeme olan skorya Şekil 1'de gösterilmiştir. Betonda kullanımı durumunda, mukavemetten ödün vermeden genel yapısal ölü yükü azaltabilir ve yalıtım özellikleri daha iyi olduğu için termal performansa katkıda bulunur. Bu özellikler, skoryaları hafif ve sürdürülebilir beton uygulamaları için ideal bir aday haline getirir [22].



Şekil 1. Skorya

Wan ve diğ. [14] iri agrega olarak %25, 50, 75 ve 100 oranlarında skorya içeren hafif beton üretmişlerdir. Karışımlarda skorya miktarı arttıkça numunelerin basınç dayanımları azalmıştır. Rajaonarison ve diğ. [23] iri agrega olarak skorya kullanarak ürettikleri hafif beton serilerinin yoğunluklarının 1200 ile 1730 kg/m³ arasında olduğunu belirtmişlerdir. Bu betonların termal iletkenlik değerleri ise 0.206 ile 0.402 W/(m.K) arasındadır. Hossain [15] iri agrega olarak skorya kullandığı iki farklı dozajda hafif beton üretmiştir. Bu betonların basınç dayanımı 25 ve 28 MPa, yoğunlukları ise 1845 ve 1875 kg/m³tür.

2.3. Diatomit

Diatomlar tek hücreli alglerden oluşmaktadır. Yeryüzünde en yaygın bulunan bitki gruplarından da biridir. Morfolojik açıdan birbirinden farklı yirmi beş binden fazla diatom türü mevcuttur. Diatomlar öldüğünde, minik kabukları batmakta ve yüzyıllar boyunca kalın tabakalar oluşturmaktadır.

Nihayetinde bu tortular fosilleşir ve diatomlu toprak olarak adlandırılan yumuşak, tebeşirli bir kayaya sıkışır. Hücresel yapısı ve yüksek gözenekliliği sayesinde hafif ve ısı iletkenliği düşüktür. Ancak reaktivitesi düşüktür ve yumuşak bir malzemedir [16]. Diatomit, birçok ülkede yaygın olarak mevcut olup, geniş rezervlere sahiptir ve %90'ın üzerinde konsantrasyonlara sahip yüksek düzeyde doğal amorf silika içerir [24].

Posi ve diğ. [17] diatomit agregası kullanarak hafif beton üretmişlerdir. Üretilen hafif betonların basınç dayanımları 6.4 ile 11.9 MPa, birim hacim ağırlıkları 1170 ile 1300 kg/m³ ve termal iletkenlik değerleri ise 0.166 ile 0.192 W/(m.K) arasındadır.

3. Yapay Hafif Agregalar

Beton, küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %10'una neden olmakta ve bu çevresel yük, agregata temini ile taşımacılık süreçleri sonucunda daha da artmaktadır. Doğal agregaların giderek azalması, inşaat sektöründe önemli ve acil bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çok boyutlu çevresel problemin çözümü, sürdürülebilir yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, atık malzemelerin agregata ikamesi olarak geri dönüştürülmesi hem uygulanabilir hem de çevresel açıdan umut verici bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel olarak yüksek kaliteli magmatik veya metamorfik kayalardan elde edilen granit ve bazalt, üstün fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Özellikle bazalt, yüksek basınç dayanımı, uzun ömürlü yapısı ve kimyasal ile atmosferik etkilere karşı yüksek direnci sayesinde beton agregası olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Çok sayıda araştırma çalışması, agregata yerine atık malzemelerin kullanılmasının mümkün olup olmadığını araştırmış ve ayrıca birçok ülke geri dönüştürülmüş agregata kullanma yolculuğuna çıkmıştır [25].

Atık ürünlerin yeniden kullanımı, 21. yüzyılın temel sorunu haline gelmiştir. Atık kontrolü için en yeni sistemlerin geliştirilmesi, modern çağın en önemli araştırma alanlarından biridir. Bunun nedeni, gelişmekte olan insanlar tarafından yeterince kullanılan sıradan kaynakların tükenmesini önlemek için malzemelerin değiştirilmesi gerekliliğidir. Deprem gibi doğal afetlerin dünyanın dört bir yanındaki etkileri nedeniyle, yapının öz ağırlığını azalttığı için günümüzde hafif yapı tasarımına olan ihtiyaç artmaktadır. Hafif beton ayrıca inşaatın toplam maliyetini de düşürür [10].

Yapay agregata, doğal kaynak açlığını ve tahribatını hafifletmek için uygulanabilir bir yol olarak ortaya çıkmıştır. Sürdürülebilirlik kavramından ilham alan çeşitli katı atıkların yapay agregalara dönüştürülmesi teşvik edilmiştir. Hafif agregata, düşük yoğunluk, ısı yalıtımı ve maliyetler nedeniyle

agrega ailesinin önemli bir üyesidir. Hafif agrega miktarları, dünyadaki agregalara oranlara çok daha azdır. Bu arada, işletme ve taşıma süreci olumsuz yönde enerji tüketimi ve çevre kirliliği yaratır. Bu nedenle, doğada hazır bulunan hafif agrega yerine daha yeşil üretim yöntemleri keşfedilmektedir. Geri dönüştürülmüş katı atık alanında, iyi niteliklere sahip inşaat atıkları kaba agregalara dönüştürülmekte ve atık toz veya kül de yapay agregalar için bir seçenek olmaktadır. Bu toz veya kül atıkları hafif agrega üretiminde hammadde olarak kullanılabilir. Bu durum, bol miktarda işlenmemiş ince atık sorununa çözüm getirebilir. Sonuç olarak, sırasıyla yeniden kullanım, soğuk bağlama ve sinterleme yoluyla bir dizi geri dönüşüm ve yapay hazırlama yöntemi ortaya çıkmıştır [6].

Hammaddelerin karıştırılması, peletleme ve sertleştirme olmak üzere yapay agrega üretimi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, istenilen kıvam elde edilene kadar bileşenler peletleme diskinde karıştırılır. İnce parçacıkların agrega tanelerine dönüşmesiyle peletleme süreci başlar. Bazı araştırmalar bağlayıcı olarak metakaolin ve bentonit gibi puzolanik malzemeleri kullanmıştır. Alkali aktivatörler de geopolimer agrega üretmek için bağlayıcı olarak kullanılabilir. Disk açısı, diskin dönüş hızı ve nem içeriğine bağlı olarak, istenilen boyutlarda üretilen agrega taneleri diskten toplanır. Toplanan taze haldeki agrega taneleri sertleşmek ve dayanım kazanmak için sinterleme, soğuk bağlama veya otoklavlama işlemlerine tabi tutulur. Düşük enerji tüketimi ve betona uygulandığında iyi basınç dayanımı sağlaması nedeniyle soğuk bağlama yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton karışımlarında kullanılan yapay hafif agrega inşaat sektörüne fayda sağlayabilir [9].

Sinterleme, yapay agrega üretmek için yüksek enerji tüketen bir işlemdir. Peletleme diskinde toplanan agregalar 24 saat kurutulduktan (oda sıcaklığında veya 105 °C etüvde) sonra yaklaşık 1200 °C sıcaklıkta sinterlenir. Sinterleme işlemi yüksek enerji tüketimi gerektirir ve bu da çevre sorunlarına yol açacak çok sayıda kirletici üretir [9].

Soğuk bağlama, ince parçacıkları basınçlı veya basınçsız aglomerasyon yoluyla daha büyük parçacıklara dönüştürme işlemidir. Soğuk bağlamada çimento veya alkali çözelti bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Peletleme işleminden sonra toplanan agregalar 24 saat oda sıcaklığında kurutulur. Agregalar daha sonra test gününe kadar kapalı torbalarda muhafaza edilir. Soğuk bağlama işlemi düşük enerji tüketimi sebebiyle ekonomik ve çevreseldir. Atık su arıtma çamuru, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve uçucu kül, soğuk bağlamalı hafif agrega üretiminde kullanılan yaygın malzemelerdir [9].

Otoklavlama, aglomerasyon aşamasında kireç veya alçıtaşı gibi kimyasalların eklenmesini içeren bir işlemdir. Otoklavlama için peletler, mukavemet kazanmak için otoklavlanmış basınç ve sıcaklık yardımıyla sertleştirilir [9]. Yapay hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Yapay hafif agregalardan bazılarının fiziksel özellikleri

Hafif agregası	Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ağırlık	24 saatlik su emme (%)	Kaynak
Genleştirilmiş perlit	80	0.36	71.0-136.0	[26]
Genleştirilmiş kil agregası	450-1070	-	12.3-24.5	[27-29]
Sinterlenmiş uçucu kül agregası	1420	1.41-1.53	15.0-18.1	[30-32]
Atık lastik parçacıkları	510	1.1	1.5	[33]
Hafif geopolimer agregası	1100	-	4.7	[34]

3.1. Genleştirilmiş Perlit

Perlit, doğal olarak oluşan silisli volkanik bir kaya olup 1800’lü yıllardan bu yana inşaat, bahçecilik ve endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Kimyasal olarak inert ve hafif yapısı sayesinde filtreleme, yalıtım, drenaj ve zemin iyileştirme gibi çok çeşitli uygulamalara sahiptir. 700-1200 °C’de ısıtılarak oluşturulan genleştirilmiş perlit, hacmini 15-20 kat artırarak düşük yoğunluklu, ısı ve ses yalıtımı yüksek, yanmaz bir yapı malzemesine dönüşür. Bu genleştirilmiş form, çimento esaslı kompozitlerde agregası ya da dolgu malzemesi olarak kullanılarak birim hacim ağırlığını düşürür ve malzemenin yalıtım özelliklerini artırır. Ancak hücresel yapısından dolayı mekanik dayanımı bir miktar azaltabilir. Perlit üretiminin büyük kısmı Türkiye, Yunanistan, ABD, Japonya, Macaristan ve İtalya tarafından gerçekleştirilmektedir [35-37]. Şekil 2’de genleştirilmiş perlit agregası tanecikleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Genleştirilmiş perlit

Whwah ve diğ. [26] ince agrega olarak genleştirilmiş perlit kullanılan farklı karışım içeriklerine sahip hafif betonlar üretmişlerdir. Bu hafif betonların basınç dayanımları 7 ile 40 MPa arasındadır. 1450 kg/m^3 'e kadar düşen yoğunluğa sahip olan bu serilerin termal iletkenlikleri 0.43 ile 1.14 W/(m.K) arasındadır. Ibrahim ve diğ. [38] beton karışımlarına ince agrega yerine %10, 15 ve 20 oranlarında genleştirilmiş perlit ikame ederek mineral katkılı beton üretmişlerdir. Numunelerin birim hacim ağırlığı 1729 ile 2008 kg/m^3 , basınç dayanımı 24 ile 42 MPa, termal iletkenlik değerleri ise 0.392 ile 0.577 W/(m.K) arasındadır.

3.2. Genleştirilmiş Kil Agregası

Genleştirilmiş kil agregası, dünya genelinde yirmiden fazla ülkede farklı ticari isimler altında üretilmektedir. Üretim yöntemleri ülkeler arasında büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Örneğin; İngiltere, İran, Portekiz, Finlandiya, Almanya, İtalya, Danimarka ve İsviçre'de bu malzeme "LECA" adıyla; İsveç, Çin, Polonya ve Rusya'da "Keramzit" olarak; İspanya'da "Liapour" ve Güney Afrika'da ise "Argex" ticari ismiyle pazarlanmaktadır. Genleştirilmiş kil agregası, kireç içeriği çok düşük özel plastik killerden üretilir. Üretim sürecinde kil, öncelikle kurutulur, ardından 1100-1300 °C'ye kadar döner fırınlarda yakılır. Isıtma sırasında peletlerin içine gaz salınır ve soğutma sırasında bu hava pelet içerisinde hapsolür, organik bileşikler ise yanarak peletlerin genişlemesine (veya şişmesine) neden olur ve gözenekli, hafif ve yüksek ezilme direncine sahip seramik peletler üretilir (Şekil 3). Genleştirilmiş kil agregası peletleri hacimce 5-6 kata kadar genişleyebilir. Genleştirilmiş kil agregası, fırının dairesel hareketi nedeniyle neredeyse yuvarlak bir şekle sahiptir. Genleştirilmiş kil agregası parçacıklarının içinde, çoğunlukla birbirine bağlı olan farklı boyutlarda delikler bulunur. Sinterleme sürecinde sıcaklığın yükseltilmesi, toplam gözenekliliğin artmasına ve birbirine bağlı sürekli gözeneklerin oluşmasına neden olabilir [39].



Şekil 3. Genleştirilmiş kil agregası

Bogas ve diğ. [27] genleştirilmiş kil agregası kullanarak yoğunluğu 1797 kg/m^3 ve basınç dayanımı 39.8 MPa olan kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmişlerdir. Sivaskumar ve Kameshwari [28] beton karışımlarında farklı oranlarda kullandıkları genleştirilmiş kil agregası ile betonların ağırlığını yaklaşık %15 oranında azaltırken, basınç dayanımlarında ise %45'e varan dayanım düşüşleri olduğunu belirtmişlerdir. Rumsys ve diğ. [29] kum yerine farklı oranlarda genleştirilmiş kil agregası kullanarak basınç dayanımı 43.8 ile 109.4 MPa arasında, yoğunluğu ise 1588 ile 2302 kg/m^3 arasında değişen betonlar üretmişlerdir.

3.3. Genleştirilmiş Polistiren Taneleri

Son yıllarda, inşaat sektöründe genleştirilmiş polistiren uygulamalarına olan ilgi hızla artmaktadır. Genleştirilmiş polistiren, hafif ancak sert bir köpük yapısı, iyi ısı yalıtımı ve yüksek darbe dayanımı sayesinde çeşitli uygulamalarda kullanılan köklü bir yalıtım malzemesidir. Bunun yanı sıra, düşük ağırlıkta yüksek yük taşıma kapasitesi, mutlak su ve buhar bariyeri, kontrollü ortamlar için hava geçirmezlik, uzun ömür, düşük bakım, hızlı ve ekonomik yapı özelliklerine sahiptir. Genleştirilmiş polistirendeki köpük, yaklaşık %98 hava içeren küçük küresel şekilli parçacıklardan oluşan hafif bir hücresel plastiktir. Kapalı hücre yapısı sayesinde mükemmel yalıtım ve darbe emici özelliklere sahiptir [40]. Genleştirilmiş polistiren taneli beton ile ilgili çalışmayı ilk olarak Cook [41] yapmıştır [42].

Cui ve diğ. [43] genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak 793 kg/m^3 yoğunluğa sahip ve basınç dayanımını 2.86 MPa olan hafif beton üretmişlerdir. Xu ve diğ. [44] kum yerine hacimce %40 oranında genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak ürettikleri hafif betonların yoğunluklarının 1200 ile 1530 kg/m^3 arasında olduğunu bildirmişlerdir. Bu numunelerin termal iletkenlikleri 0.40 ile 0.48 W/(m.K) arasındadır. Jian [45] yaptığı çalışmada genleştirilmiş polistiren taneleri kullanarak ürettiği hafif betonun basınç

dayanımının yaklaşık 5.3 MPa, eğilme dayanımının ise 2.05 MPa olduğunu bildirmiştir.

3.4. Sinterlenmiş Uçucu Kül Agregası

Onlarca yıldır, çeşitli kaynaklardan üretilen uçucu külün kullanımı insan medeniyeti için büyük bir zorluk olmuştur. Sinterlenmiş uçucu kül agregası olarak bilinen uçucu külden üretilen agregalar, doğal agregaların kıtlığı, uçucu kül bertarafı için yeterli alanın bulunmaması ve doğal kaynakların korunması gibi sorunları çözenin bir yoludur. Fabrika yapımı sinterlenmiş uçucu kül agregası, hafif uygulaması ve uçucu külü tüketerek ve iri doğal agrega kıtlığını azaltarak yeşil inşaat malzemesi geliştirmeye katkısı nedeniyle birçok ülkede oldukça popülerdir [46].

Kumar ve diğ. [30] 28.64 ile 54.45 MPa arasında basınç dayanımına sahip sinterlenmiş uçucu kül agregası içeren mineral katkılı kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üretmişlerdir. Rawat ve Pasla [31] sinterlenmiş uçucu kül agregası kullanarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı hafif geopolimer beton üretmişlerdir. Ürettikleri betonlar 1800 kg/m^3 'ün altında yoğunluğa, 17 MPa'nın üstünde basınç dayanımına sahiptir. Dhemla ve diğ. [32] sinterlenmiş uçucu kül agregalı betonların basınç dayanımlarının 25 ile 45 MPa arasında olduğunu, birim hacim ağırlıklarının ise 2 t/m^3 'ün altında olduğunu bildirmişlerdir.

3.5. Atık Lastik Parçacıkları

2023 yılında Dünya çapında yıllık lastik üretimi yaklaşık 1.4 milyar lastiktir ve bu her yıl tahmini 17 milyon ton kullanılmış lastiğe karşılık gelmektedir. En çok atık lastiği üretenler Çin, Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Hindistan'dır. Her yıl küresel olarak tahmini 1 milyar lastik hizmet ömrünü tüketmekte ve bu miktarın 2030 yılına kadar 1.2 milyara ulaşması öngörülmüyor. Ancak bu hizmet ömrünü tamamlayan lastiklerin yarısından fazlası işlenmeden dünyanın dört bir yanındaki çöplüklere atılmakta veya stok alanlarında depolanmaktadır. Çöp ve depolama alanlarının dolması ve diğer çevresel sorunlar nedeniyle, atık lastik kauçuğunun çöpe atılması ve stoklanması her zaman en iyi seçenek değildir [47]. Bu atık lastikler Şekil 4'teki gibi çeşitli tane boyutlarında parçalanarak betonda agrega olarak kullanımı mümkün olup, bu atıkların geri dönüşümlerine katkıda bulunulabilir.



Şekil 4. Atık lastik parçacıkları

İslam ve diğ. [33] iri agrega olarak iki farklı boyut aralıklarında lastik parçacıkları kullanarak hafif beton üretmişlerdir. Bu betonların basınç dayanımları 6 ile 7MPa, yoğunlukları 1584 ile 1674 kg/m³, termal iletkenlik değerleri ise 0.49 ve 0.61 W/(m.K) arasındadır. Kantasiri ve diğ. [48] farklı miktarlarda atık lastik kırıntıları kullanarak ürettikleri hafif betonun birim hacim ağırlığını 1500 kg/m³'e kadar düşürebildiklerini bildirmişlerdir. Bu serinin basınç dayanımı ise 7.5 MPa'dır.

3.6. Hafif Geopolimer Agrega

İnşaat atıklarının yeniden değerlendirilmesinde kullanılan stratejilerden biri, cüruf (öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu) ve alkali (sodyum veya potasyum esaslı) bir çözeltinin birleştirilmesiyle üretilen hafif geopolimer agrega kullanımını içerir. Yeni agrega kaynaklarına olan ihtiyacın artması, hafif geopolimer agrega üretiminin artmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, son araştırmalar, özellikle betonda geleneksel iri agregaların kısmi bir ikamesi olma potansiyeli olmak üzere, hafif geopolimer agreganın geri dönüşümü ve yeniden kullanımı konusunda ümit verici sonuçlar bildirmiştir. DeneySEL araştırmalar, hafif geopolimer agreganın, elde edilen betonun mekanik performansından ödün vermeden %20'ye kadar ikame seviyelerinde etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [25]. Şekil 5'te hafif geopolimer agrega taneleri gösterilmektedir.



Şekil 5. Hafif geopolimer agregası

Tawfik ve diğ. [49] yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve perlit toz karışımına alkali çözelti ilave ederek hafif geopolimer agregası üretmişlerdir. Bu hafif geopolimer agregaları kullanılarak hafif beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numunenin birim hacim ağırlığı 1.87 t/m^3 ve basınç dayanımı 20.2 MPa 'dır. Razak ve diğ. [34] hafif geopolimer agregası içeren hafif beton üretmişlerdir. Bu betonun basınç dayanımı 41.89 MPa , yoğunluğu ise 1760.1 kg/m^3 'tür.

4. Sonuç

Hafif beton üretiminde pomza, skorya, perlit, vermikülit gibi doğal hafif agregalar ve atık malzemelerin geri dönüşümlerinin sağlanmasını amaçlayan lastik atıkları, hafif geopolimer agregası, sinterlenmiş uçucu kül agregası gibi yapay hafif agregalar kullanılmaktadır. Hafif agregaların düşük yoğunlukları ve düşük dayanımları sebebiyle hafif betonların basınç dayanımları normal ağırlıklı betonların basınç dayanımlarına göre daha düşük olmaktadır. Hafif agregalar betonun birim hacim ağırlığını azaltarak yapıdaki betondan kaynaklanan ölü yük miktarını azaltmaktadır. Bununla birlikte taşıyıcı elemanların boyutlarının azalması ve deprem esnasında yapıya etki eden deprem kuvvetini azaltmak gibi avantajlar sunmaktadır. Hafif betonların normal ağırlıklı betonlara göre daha düşük termal iletkenlik katsayılarına sahip olması sebebiyle yapıya ilave bir ısı yalıtımı katkısı sağlanmaktadır. Genel olarak 1800 kg/m^3 birim hacim ağırlığındaki hafif betonların basınç dayanımları normal ağırlıklı betonların basınç dayanımlarına yakinken, birim hacim ağırlığında 1000 kg/m^3 'ün altına düşüldüğünde hafif betonların basınç dayanımları 10 MPa 'ı geçememektedir. Bu birim hacim ağırlığındaki hafif betonların basınç dayanımlarının artırılması ve taşıyıcı hafif beton sınıfına girebilmesi için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Özellikle yapay hafif agregası üretiminde agreganın basınç dayanımının çeşitli katkı veya kür işlemleri ile artırılması amaçlanırken, agregası tane yoğunluğu da azaltılmaya çalışılmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Karthika, R. B., Vidyapriya, V., Sri, K. V. N., Beaula, K. M. G., Harini, R., & Sriram, M. (2021). Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 43(2), 1606-1613. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
- [2] Alshannag, M. J., Charif, A., Alqarni, A. S., & S. Nasser, (2022). Flexural performance and ductility of RC beams made using natural LWA. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00942. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00942>
- [3] Mohammed, W. J., Tariq, N., & Hussein, Z. M. (2023). Mechanical properties of sustainable fiber-reinforced lightweight aggregate concrete. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 27(06), 811-822. <https://doi.org/10.31272/jcasd.27.6.11>
- [4] Zhou, J., Dong, Y., Qiu, T., Lv, J., Guo, P., & Liu, X. (2025). The microstructure and modification of the interfacial transition zone in lightweight aggregate concrete: A review. *Buildings*, 15(15), 2784. <https://doi.org/10.3390/buildings15152784>
- [5] Alqahtani, F. K., Sherif, M. A., & Ghanem, A. M. (2023). Green lightweight concrete utilizing sustainable processed recycled plastic aggregates: Technical, economic and environmental assessment. *Construction and Building Materials*, 393, 132027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132027>
- [6] Shang, X., Chang, J., Yang, J., Ke, X., & Duan, Z. (2022). Life cycle sustainable assessment of natural vs artificial lightweight aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133064>
- [7] Gravina, R. J., Xie, T., Bennett, B., & Visintin, P. (2021). HDPE and PET as aggregate replacement in concrete: Life-cycle assessment, material development and a case study. *Journal of Building Engineering*, 44, 103329. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103329>
- [8] Hao, D. L. C., Razak, R. A., Kheimi, M., Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., Nergis, D. D. B., Fansuri, H., Ediaty, R., Mohamed, R., & Abdullah, A. (2022). Artificial lightweight aggregates made from pozzolanic material: A review on the method, physical and mechanical properties, thermal and microstructure. *Materials*, 15(11), 3929. <https://doi.org/10.3390/ma15113929>
- [9] Hao, D. L. C., Razak, R. A., Yahya, Z., Abdullah, M. M. A. B., & Abdullah, A. (2024). Properties of artificial lightweight aggregates from various pozzolan materials – A review. *Archives of Metallurgy and Materials*, 69(4), 1407-1412. <https://doi.org/10.24425/amm.2024.151407>

- [10] Vali, K. S., & Bala M. S. (2017). Overview of artificial lightweight aggregates-A review. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8(6), 360-369.
- [11] Fořt, J., Afolayan, A., Medveď, I., Scheinherrová, L., & Černý, R. (2024). A review of the role of lightweight aggregates in the development of mechanical strength of concrete. *Journal of Building Engineering*, 89, 109312. <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2024.109312>
- [12] Suseno, H., Wijaya, M. N., & Firdausy, A. I. (2021). Correlation between destructive and non-destructive characteristics of pumice and scoria lightweight concretes. *Engineering Journal*, 25(8), 114-126. <https://doi.org/10.4186/cj.2021.25.8.113>
- [13] Shafiq, M. S., Khan, F. A., Badrashi, Y. I., Khan, F. A., Fahim, M., Abbas, A., & Adil, W. (2021). Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete with pumice aggregate. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(2), 30-38. <https://doi.org/10.12913/22998624/135198>
- [14] Wan, D. S. L. Y., Aslani, F., & G. Ma, (2018). Lightweight self-compacting concrete incorporating perlite, scoria, and polystyrene aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018178. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002350](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002350)
- [15] Hossain, K. M. A. (2004). Properties of volcanic scoria based lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 56(2), 111-120. <https://doi.org/10.1680/macrc.2004.56.2.111>
- [16] Posi, P., Lertnimoolchai, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Pressed lightweight concrete containing calcined diatomite aggregate. *Construction and Building Materials*, 47, 896-901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.094>
- [17] Posi, P., Lertnimoolcha, S., Sata, V., Phoo-ngernkham, T., & Chindaprasirt, P. (2014). Investigation of properties of lightweight concrete with calcined diatomite aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1429-1435. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0637-5>
- [18] Rashad, A. M. (2019). A short manual on natural pumice as a lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 25, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.jobc.2019.100802>
- [19] Moolchandani, K. (2025). Advancements in pumice-based concrete: A comprehensive review. *Next Materials*, 8, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100646>
- [20] Abbu, M., Al-Attar, A. A., Alrahman, S. A., & Al-Gburi, M. (2023). The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32, 20220249. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0249>

- [21] Warati, G. K., Darwish, M. M., Feyessa, F. F., & Ghebrab, T. (2019). Suitability of scoria as fine aggregate and its effect on the properties of concrete. *Sustainability*, 11(17), 4647. <https://doi.org/10.3390/su11174647>
- [22] Shitu, A., & Shitu, E. (2025). Volcanic scoria as a sustainable alternative to sand in structural lightweight concrete. *Scientific Reports*, 15, 34431. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17494-0>
- [23] Rajaonarison, E. F., Gacoin, A., Randrianja, R., Ranaivoniarivo, V. G., & Razafindrabe, B. H. N. (2017). Effect of scoria on various specific aspects of lightweight concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11, 541-555. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0204-9>
- [24] Jian, H., Zhu, E., Cai, W., Bai, Z., Yao, T., & Li, J. (2025). Effects of diatomite on fracture and damping behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 483, 141767. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141767>
- [25] Kumar, T. U., & Kumar, M. V. (2025). Influence of geopolymer aggregate on the durability, mechanical characteristics and chemical properties of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10, 148. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00654-0>
- [26] Whwah, M. S., Al-Hussainy, H. A., Dulaimi, A., Bernardo, L. F. A., & Ribeiro, T. P. (2025). Investigation of the effects of water-to-cement ratios on concrete with varying fine expanded perlite aggregate content. *Journal of Composites Science*, 9, 390. <https://doi.org/10.3390/jcs9080390>
- [27] Bogas, J. A., Gomes, A., & Pereira, M. F. C. (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 1013-1022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.111>
- [28] Sivakumar, S., & Kameshwari, B. (2015). Influence of fly ash, bottom ash, and light expanded clay aggregate on concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 849274. <https://dx.doi.org/10.1155/2015/849274>
- [29] Rumsys, D., Spudulis, E., Bacinskas, D., & Kaklauskas, G. (2018). Compressive strength and durability properties of structural lightweight concrete with fine expanded glass and/or clay aggregates. *Materials*, 11(12), 2434. <https://doi.org/10.3390/ma11122434>
- [30] Kumar, P., Pasla, D., & Thiagarajan, J. S. (2025). Synergetic effect of coarse sintered fly ash aggregates and supplementary cementitious materials in self-compacting concrete: From durability and corrosion perspective. *Journal of Building Engineering*, 108, 112969. <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112969>
- [31] Rawat, R., & Pasla, D. (2024). Evaluating the corrosion resistance and LCA of lightweight geopolymer concrete integrating sintered fly ash ag-

- gregate as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 449, 138370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138370>
- [32] Dhemla, P., Somani, P., Satankar, R. K., & Swami, B. L. (2023). Mechanical and microstructure properties of plain and blended cement structural lightweight aggregate concrete using sintered fly ash aggregates. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1149, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1149/1/012008>
- [33] Islam, M. M. U., Li, J., Roychand, R., & Saberian, M. (2023). Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles. *Construction and Building Materials*, 408, 133658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133658>
- [34] Razak, R. A., Bakri, A. M. M. A., Kamarudin, H., Ismail, K. N., Hardjito, D., & Zarina, Y. (2018). Performances of artificial lightweight geopolymer aggregate (ALGA) in OPC concrete. *Key Engineering Materials*, 673, 29-35. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.673.29>
- [35] Rashad, A. M. (2016). A synopsis about perlite as building material - A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 121, 338-353. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.001>
- [36] Maxim, L. D., Niebo, R., & McConnell, E. E. (2014). Perlite toxicology and epidemiology - a review. *Inhalation Toxicology*, 26(5), 259-270. <https://doi.org/10.3109/08958378.2014.881940>
- [37] Mercan, E., & Yilmazer, S. (2022). Study of physical and mechanical properties of aerogel-modified expanded perlite aggregate and clay (AEP/C) board. *Construction and Building Materials*, 361, 129602. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129602>
- [38] Ibrahim, M., Ahmad, A., Barry, M. S., Alhems, L. M., & Suhoothi, A. C. M. (2020). Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 50. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00425-w>
- [39] Rashad, A. M. (2018). Lightweight expanded clay aggregate as a building material – An overview. *Construction and Building Materials*, 170, 757-775. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>
- [40] Sulong, N. H. R., Mustapa, S. A. S., & Rashid, M. K. A. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(2), 47529. <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- [41] Cook, D.J. (1972). *Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete*. School of Civil Engineering, University of New South Wales.
- [42] Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environ-

- mental aspects. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>
- [43] Cui, C., Huang, Q., Li, D., Quan, C., & Li, H. (2016). Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 377-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.159>
- [44] Xu, Y., Jiang, L., Liu, J., Zhang, Y., Xu, J., & He, G. (2016). Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. *Journal of Thermal Science and Technology*, 11(2), JTST0023. <https://doi.org/10.1299/jtst.2016jtst0023>
- [45] Jian, C. (2014). The influence of redispersible powder on mechanical properties of eps light-aggregate concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 651-653, 173-176. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.173>
- [46] Patra, R. K. & Mukharjee, B. B. (2025). Factorial experimental design for developing sustainable concrete incorporating metakaolin and sintered fly ash aggregates. *Asian Journal of Civil Engineering*, 26, 4859-4873. <https://doi.org/10.1007/s42107-025-01461-1>
- [47] Helmy, S. H., Tahwia, A. M., Mahdy, M. G., Elrahman, M. A., Abed, M. A., & Youssf, O. (2023). The use of recycled tire rubber, crushed glass, and crushed clay brick in lightweight concrete production: A review. *Sustainability*, 15(13), 10060. <https://doi.org/10.3390/su151310060>
- [48] Kantasiri, T., Kasemsiri, P., Pongsa, U., Posi, P., & Chindaprasirt, P. (2024). Optimization of concrete containing waste crumb rubber mix design for thermal insulating applications using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 434, 136636. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136636>
- [49] Tawfik, T. A., Kamal, A. H., & Faried, A. S. (2024). Assessment of the properties of concrete containing artificial green geopolymer aggregates by cold bonding pelletization process. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 27329-27344. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32987-7>

Yapı Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi: Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Yapılar Eksenli Bir Değerlendirme¹

Semih Konceli²

Gökhan Güçlü³

Uğur Kafkas⁴

Özet

Bu kitap bölümünde, modern inşaat sektöründe “hafif çelik” veya “ince cidarlı çelik” olarak da bilinen soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemleri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Çalışma, bu yenilikçi yapı türünü; ahşap, yığma, betonarme, prefabrik ve yapı çeliği gibi geleneksel ve modern yapı sistemleriyle karşılaştırmalı olarak ele almaktadır. Her bir yapı sisteminin malzeme özellikleri, taşıyıcı sistem davranışları, sismik performansları, yapım hızı, maliyet verimliliği ve çevresel etkileri gibi temel kriterler üzerinden avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde analiz edilmektedir. Bölüm, özellikle soğukta şekil verilmiş çelik sistemlere odaklanarak bu sistemlerin 20. yüzyıl başlarına dayanan tarihsel gelişimi ve üretiminde kullanılan rulo form (roll-form) teknolojisi hakkında bilgi sunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan C, U, Z ve sigma enkesit geometrileri ve bu profillerin tasarımında esas alınan TBDY 2018, AISI S100-16 ve Eurocode 3 gibi ulusal ve uluslararası yönetmelikler ele alınmaktadır. Sistemin, betonarme yapılara

- 1 Bu kitap bölümü, Semih Konceli tarafından Dr. Öğr. Üyesi Gökhan Güçlü danışmanlığında ve Doç. Dr. Uğur Kafkas eş danışmanlığında hazırlanan “Eğilme Etkisindeki Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Kirişlerin Optimizasyonu” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.
- 2 Yüksek İnşaat Mühendisi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, semihkonceli@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-7627-0770
- 3 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, gokhan.guclu@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-2931-9501
- 4 Doç. Dr., Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, 43100, Kütahya/Türkiye, ugur.kafkas@dpu.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-1730-7810

kıyasla daha düşük kütleli olmasının sismik talebi azaltması gibi üstünlükleri vurgulanmaktadır. Bununla birlikte, ısı köprülerini önlemek için ek yalıtım gerekliliği, korozyona karşı periyodik bakım ihtiyacı ve geleneksel çelik profillerde gözlemlenmeyen çarpılmalı burkulma gibi karmaşık analizler gerektiren narinlik sorunları, sistemin objektif bir bakış açısıyla ele alınan başlıca dezavantajlarından. Ayrıca, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası bölgede acil barınma ihtiyacının karşılanmasındaki rolü gibi pratik kullanım alanlarına dikkat çekilmektedir. Yapısal bütünlüğü, dayanımı ve montaj kolaylığını doğrudan etkileyen vida, perçin ve kaynak gibi birleşim elemanlarının tasarım esaslarına da değinilmektedir. Sonuç olarak bu çalışma, farklı yapı sistemlerine dair kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve mühendisler, mimarlar ve araştırmacılar için proje gereksinimlerine uygun sistemin seçimi konusunda yardımcı olmayı amaçlamaktadır.

1. Giriş

Soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemleri, ince enkesitli galvanizli çelik profillerin kullanılmasıyla oluşturulan ve genellikle prefabrik modüler tasarım ilkelerini temel alan yenilikçi bir yapı türüdür. Soğukta şekil verilmiş çelik, “hafif çelik” ve “ince cidarlı çelik” isimleriyle de anılmaktadır. Bu sistemler, dayanıklılık, hafiflik ve montaj kolaylığı gibi özellikleri nedeniyle çeşitli inşaat projelerinde tercih edilmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, yapı iskeletini oluşturan kolon, kiriş, duvar, makas ve çatı elemanlarından meydana gelir. Çelik profiller hafif olmalarına karşın yüksek mukavemet sağlarlar. Bu sistemde kullanılan çelik profiller, galvaniz kaplama sayesinde korozyona karşı dayanıklılık kazanır. Dünya genelinde, deprem dayanımı, kurulum hızı ve çevre dostu olması gibi avantajları nedeniyle soğukta şekil verilmiş çelik sistemler hızla yaygınlaşmaktadır [1].

Soğukta şekil verilmiş çelik yapı malzemesinin yanı sıra, proje koşulları, malzeme seçimi ile coğrafi ve ekonomik etkenler de göz önünde bulundurulduğunda; ahşap, yığma, betonarme, prefabrik ve çelik gibi çeşitli yapı malzemeleri de sıklıkla tercih edilir [2]. Her yapı türünün kendine özgü üretim süreçleri ve yapısal özellikleri bulunduğu için, tasarım aşamasında yapı malzemesi seçimi, uygun analiz yönteminin belirlenmesi açısından büyük önem taşır.

2. Yapı Malzemelerine Göre Yapı Sistemleri

2.1. Ahşap Yapı Sistemleri

Ahşap yapı sistemleri, genellikle yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ahşap malzemeler kullanılarak inşa edilmektedir. Hafif ve çevre dostu bir yapı malzemesi olan ahşap, özellikle geleneksel mimaride önemli bir yere

sahiptir. Ancak, yangın ve biyolojik zararlılara karşı duyarlı olması, bu sistemlerin modern uygulamalarda sınırlı kalmasına neden olmaktadır [3].

Ahşap binaların tasarımı “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018” (TBDY 2018) [4] 12. Bölümündeki özel kurallara ek olarak, Ocak 2025’te yürürlüğe giren “Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, 2024” [5] esasları çerçevesinde gerçekleştirilmektedir.

Ahşap malzemesi, depreme karşı yüksek dayanıma sahip bir yapı elemanıdır. Olumsuz hava koşulları ve kimyasal faktörler gibi çeşitli dış etkilere maruz kalması durumunda dahi mukavemetinin yavaş azalması, onu yapı elemanı olarak tercih edilir kılmaktadır. Ayrıca, ahşabın sertliği, nem oranı, özgül ağırlığı ve ısı iletkenliği gibi fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

2. Dünya savaşı sırasında, her türlü iklim koşuluna ve rutubete dayanıklı yapay reçine tutkalının bulunması ve ahşap yapılarda birleşim elemanı olarak kullanılması inşaat teknolojisi açısından reform olarak kabul edilmiş ve ahşabı diğer yapı malzemeleri ile yarışır hale getirmiştir. Günümüz koşullarında statik, dinamik ve mukavemet hesaplarının ihtiyaç duyacağı her türlü enkesit ve uzunlukta ahşap yapı elemanlarının üretilmesini ve projelendirilmesini mümkün kılmıştır [3].

Ahşap yapıların dayanıklılığı, kullanılan ahşap türü ve uygulanan koruma teknikleriyle yakından ilişkilidir. Modern teknolojilerle üretilen lamine ahşap elemanları (tutkal veya reçine ile birbirine yapıştırılan odun liflerinden oluşan yapı bileşenleri) geleneksel ahşaba kıyasla daha yüksek mukavemet ve daha uzun ömür sunar [6].

Ahşap, doğal bir malzeme olduğu için çevreye olumsuz etkileri minimum düzeydedir. Bu durum, çevre dostu yapı tasarımına yönelik artan talep doğrultusunda ahşap yapıların önemini artırmaktadır. Ayrıca, hafifliği nedeniyle taşıma ve montaj kolaylığı sağlar [7].

Ahşap yapı sistemleri, düşük karbonsalınımı ve estetik tasarım avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak, modern yapı projelerinde yaygınlaşması için yangın koruma yönetmeliklerinin geliştirilmesi ve malzeme dayanıklılığına yönelik yatırımlar gerekmektedir [6].

Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında, ahşap malzemenin kendine özgü üstünlükleri ve zayıf yönleri mevcuttur. Avantajları [3]:

- Yeterli mukavemete sahip olmakla birlikte oldukça hafif bir malzemedir. Malzemenin hafifliğinin bir sonucu olarak ahşap binaların sabit yükü azalmakta, temel ve diğer taşıyıcı elemanların boyutları küçülmektedir.

- Hafif olması nedeniyle nakliyesi ucuz, montaj makineleri gereksinimi az, montajı kolay, çabuk ve ekonomiktir.
- Birleşimi kolay bir malzeme olan ahşap yapı elemanları, birbirlerine geçmeli bağlanabilir, yapıştırılabilir ve çivi, bulon, vida, kama veya metal lama yardımıyla birleştirilebilir.
- Birleşim elemanları kolay sökülebilir olduğundan yapının demontajı yapıp, farklı binaların yapımında tekrar kullanılabilir.
- Isı yalıtımı yönünden iyi bir malzemedir.
- Kimyasal etkilere ve asitlere karşı dayanıklıdır.
- İşçiliği kolaydır ve şantiye ortamında dahi istenilen şekil verilebilir.
- Kurutulmuş ahşap iyi bir elektrik yalıtkanlığına sahiptir.
- Doğadan kolay bir şekilde elde edilebilir ve sıcak bir malzeme olması sebebiyle mimarlar tarafından tercih edilir.

Dezavantajları [3, 8]:

- Suya ve neme karşı dayanıksızdır. Korunmadığı zaman bünyesine kolayca su emer, emdikçe şişer, kuruduktan sonra büzülür ve çatlak oluşmasına sebebiyet verir. Bu nedenle yapılarda kurutulmuş ahşap kullanılmasına dikkat edilmelidir.
- Yapısı homojen değildir; ortotrop bir malzemedir. Her nokta ve doğrultudaki malzeme özellikleri aynı değildir. Lifli yapısı nedeniyle lif doğrultusunda basınç ve çekme dayanımı yüksek, liflere dik doğrultularda ise daha düşüktür. Analizlerde buna dikkat edilmelidir. Bu nedenle, analizi homojen ve izotrop malzemelere göre daha karmaşıktır.
- Lifli yapısı nedeniyle çatlaklar, budaklar enkesitin her yerine aynı şekilde dağılmamıştır.
- Ahşap kurtları, böcekler, mantarlar ve bakteriler ahşabın bozulmasına ve çürümesine neden olabilirler. Bundan dolayı koruma yöntemleri uygulanmalıdır.
- Yangın dayanımının yüksek olmasına karşı kolay tutuşan bir malzemedir.

2.2. Yığma Yapı Sistemleri

Yığma yapılar, genellikle taş, tuğla ve kerpiç gibi malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşur. Taşıyıcı duvarlara dayalı olan bu sistemler, köy ve küçük yerleşim alanlarında yaygındır.

Doğal taş veya pişmiş toprağın (tuğla), bir bağlayıcı harçla birlikte kullanılması ile elde edilen kagir malzemenin birim hacim ağırlığı yaklaşık olarak $\rho = 2.1 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ arasında değişmektedir. Taşıma gücü ayrıca, yapımında gösterilen özene ve yapım tekniğine bağlıdır. Kagirin taşıma gücü yapım tekniğine bağlı olduğu kadar, yapıldıktan sonra, sertleşme sürecindeki çevre koşullarına da bağlıdır. Kagir malzemede, basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı oldukça düşüktür [9].

Bu yapı sistemleri, genellikle düşük teknoloji bir inşaat süreci gerektirir. Ancak, bu durum yapısal güvenlik ve uzun ömür açısından önemli sınırlamalar getirebilir. Örneğin, yığma yapılarda yatay yükler altında oluşan çatlamlar, duvar taşıyıcılığını azaltabilir ve yapının çökmesine neden olabilir [10].

Yığma yapı sistemlerinin sürdürülebilirliği, yerel kaynak kullanımına dayanır. Ancak, bu sistemlerin modern inşaat projelerinde yer bulabilmesi için deprem dayanıklılığı ve enerji verimliliği açısından iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu yapı sınıfının avantajları arasında [10]:

- Yerel ve kolay erişilebilir malzemeler kullanılarak inşa edildiği için genellikle ekonomik olma,
- Geleneksel yöntemlerle inşa edildiklerinden, özel ekipman veya yüksek mühendislik bilgi birikimi gerektirmeme,
- Kerpiç veya tuğla gibi malzemelerin doğal yalıtım özellikleri, enerji tasarrufu sağlama ve yapıların iç mekan konforunu artırma,
- Geleneksel mimariye uygunluk sağladığı için kırsal ve tarihi alanlarda estetik bir görünüm sunma,
- Doğal malzemelerle inşa edilmesi, çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir bir yapı seçeneği sunma,

özellikleri yer almaktadır. Dezavantajları ise [11, 12]:

- Taşıyıcı duvar sistemine dayalı olması, yığma yapıları sismik yükler altında güvensiz hale getirir.
- Taşıyıcı sistemin sınırlamaları nedeniyle çok katlı yapılara uygun değildir.

- Çatlama ve yapısal hasar riski, rüzgar veya deprem gibi yatay yüklere karşı dayanıklılığını azaltır.
- Zamanla çevresel koşullardan etkilenecek düzenli bakım ve onarım ihtiyacı doğurur.
- Güncel yönetmeliklere tam uyum sağlamadığı için modern projelerde sınırlı uygulama alanı bulur.

2.3. Betonarme Yapı Sistemleri

Betonarme yapı sistemleri, çelik donatılar ve betonun birlikte kullanıldığı, modern inşaat sektöründeki en yaygın yapı türüdür. Bu sistemler, malzemelerin birbirini tamamlayan özellikleri sayesinde basınç ve çekme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım sağlar. Doğru tasarım ve detaylandırma ile betonarme yapılar, deprem dayanıklılığı açısından güvenilir ve dayanıklı bir çözüm sunmaktadır [13].

Betonarme sistemler, malzeme dayanıklılığı ve ekonomik uygulanabilirliği ile dikkat çeker. Ancak, bu sistemlerin geri dönüşüm eksiklikleri, çevresel etkilerinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Buna rağmen, betonarme yapılar, özellikle büyük ölçekli projelerde yaygın olarak tercih edilmektedir [14].

Betonarme bir sistemin dayanıklılığı, kullanılan çelik donatıların dayanımı ve betonun basınç mukavemeti ile doğrudan ilişkilidir.

Betonarme yapı sistemleri, geniş açıklıkların geçilmesine olanak tanıyan güçlü bir yapı iskeleti sunar. Bu, köprüler, barajlar ve yüksek katlı binalar gibi büyük mühendislik projelerinde bu sistemlerin kullanılmasını sağlar. Betonarme yapıların tasarımı, uluslararası standartlara uygun olarak gerçekleştirildiğinde, yapıların güvenilirliği ve dayanıklılığı önemli ölçüde artmaktadır [14].

Betonarme yapı sistemlerinin tasarımı ve uygulaması, uluslararası birçok yönetmelikle düzenlenmiştir. Türkiye’de, “TS 500 - Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, 2000” [15] ve TBDY 2018 gibi yönetmelikler, betonarme yapıların deprem dayanıklılığı ve güvenliğini sağlamak için rehberlik eder. Uluslararası düzeyde ise “Eurocode 2: Design of concrete structures” (EC 2) [16] ve “ACI 318-25: Building code for structural concrete-Code requirements and commentary” [17] gibi yönetmelikler, betonarme yapıların tasarımı ve hesaplamalarında kullanılmaktadır. Bu yönetmelikler, betonun mukavemeti, çelik donatı yerleşimi, dayanıklılık ve deprem yüklerine dayanım gibi kritik parametrelerin hesaplanmasını ve uygulanmasını detaylı şekilde düzenler.

Betonarme yapıların geniş kullanım alanları ve sunduğu avantajlar kadar, belirli sınırlamaları ve dezavantajları da bulunmaktadır.

Avantajları [18]:

- Yüksek Mukavemet: Betonarme yapılar hem basınç hem de çekme kuvvetlerine dayanıklı olduğu için geniş bir uygulama alanına sahiptir.
- Deprem Dayanıklılığı: Doğru tasarım ve uygulama ile betonarme yapılar, deprem yüklerine karşı yüksek dayanıklılık gösterir.
- Uzun Ömür: Betonun kimyasal ve fiziksel dayanıklılığı, yapıların uzun yıllar hizmet verebilmesini sağlar.
- Çok Yönlü Kullanım: Köprülerden barajlara, yüksek katlı binalardan altyapı projelerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.
- Yerel Malzeme Kullanımı: Agregası ve çimento gibi malzemelerin kolayca temin edilebilmesi, projelerin maliyetlerini düşürür.
- Yangına Dayanım: Betonarme yapılar, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğu için yangın güvenliği açısından avantajlıdır.

Dezavantajları [19]:

- Betonarme yapılar, soğukta şekil verilmiş çelik veya ahşap gibi alternatiflere göre daha ağırdır ve temele büyük yükler bindirir.
- Çimento üretimindeki yüksek karbon salınımı, betonarme yapıların çevresel etkilerini artırır.
- Betonun çatlama veya karbonatlaşma gibi sorunları, zamanla ciddi bakım ihtiyaçları doğurur.
- Döküm ve kür süreçleri, projelerin tamamlanmasını geciktirebilir.
- Betonarme yapılar, tasarım ve uygulama aşamalarında esnekliği sınırlı olan sistemlerdir.
- Betonarme malzemelerin yeniden kullanımı, diğer yapı sistemlerine kıyasla daha zordur.

2.4. Prefabrik Yapı Sistemleri

Prefabrik yapı sistemleri, fabrikada üretilen beton elemanların şantiye alanında birleştirilmesiyle oluşur. Bu sistemler, hızlı montaj süreçleri ve çevre dostu olması nedeniyle özellikle ticari yapılarda tercih edilmektedir. Ancak, prefabrik sistemlerin nakliye ve montaj sırasında hassasiyet gerektirmesi, bu yapı türünün maliyetlerini artırabilir.

Prefabrik yapıların en büyük avantajlarından biri, yüksek üretim kalitesine olanak tanınmasıdır. Fabrika ortamında üretilen elemanlar, uygunluk ve kalite kontrol açısından avantajlı hale gelir. Bu durum, yapıların dayanıklılığını ve kullanım süresini artırır [20].

Bu sistemler, hızlı üretim süreçleriyle zamandan tasarruf sağlar. Örneğin, bir prefabrik kolonun montaj süresi sahada sadece birkaç saat içinde tamamlanabilir. Bu süreç, geleneksel betonarme kolonların döküm ve kür süresine göre çok daha kısadır [21].

Prefabrik yapıların estetik avantajları, mimari çeşitlilik açısından büyük bir değer taşır. Ancak, bu sistemlerin yaygınlaşması için taşıma maliyetlerinin düşürülmesi ve montaj süreçlerinin daha da optimize edilmesi gerekmektedir [20].

Prefabrik yapı sistemleri, belirli yönetmeliklere tabi tutulur. Türkiye’de, “TS EN 13369: Öndökümlü beton mamuller - Genel kurallar” [22] ve TBDY 2018 bu sistemlerin tasarım ve uygulama süreçlerini düzenler. Ayrıca uluslararası alanda EC 2 gibi yönetmelikler, prefabrik beton elemanlarının güvenli ve dayanıklı tasarımını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu yönetmelikler, özellikle prefabrik elemanların yük taşıma kapasitesi, montaj hassasiyeti ve deprem güvenliği gibi kritik konulara odaklanır.

Prefabrik yapı sistemleri, yönetmeliklere uygun şekilde üretildiğinde yüksek dayanıklılık ve güvenlik sunmaktadır. Bununla birlikte, bu sistemlerin de diğer yapı sistemlerinde olduğu gibi bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Avantajları [23]:

- Fabrikada üretilen elemanlar, yönetmeliklere uygunluk açısından yüksek kalite sağlar.
- Şantiyede kısa sürede monte edilebilmesi, projelerin tamamlanma süresini kısaltır.
- Üretim süreçlerinde malzeme israfının az olması ve geri dönüşüm olanağı, çevresel etkileri minimize eder.
- Prefabrik elemanların farklı geometrilerde üretilmesi, mimari projelerde esneklik sunar.
- Doğru tasarım ve üretimle uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren yapılar elde edilir.
- Elemanların modüler olarak üretilmesi, farklı projelerde kolayca kullanılabilirlik sağlar.

Dezavantajları [24]:

- Fabrikada üretim ve nakliye maliyetleri, geleneksel sistemlere göre daha yüksektir.
- Büyük prefabrik elemanların taşınması sırasında hasar riski yüksektir.
- Birleştirme süreçlerinde uzman ekipler ve doğru ekipman gereklidir.
- Prefabrik elemanlar, projeye özel üretildiklerinden ilerideki değişikliklere uyum sağlamada sınırlı esnekliğe sahiptir.
- Olumsuz hava koşulları, montaj süreçlerini geciktirebilir.
- Kaldırma ve montaj için özel vinç ve ekipman gerekliliği ek maliyet oluşturur.
- Fabrikada üretim için çok büyük hacim gerekliliği ve fabrika kurulum maliyetlerinin yüksekliği ek maliyet oluşturur.

2.5. Yapı Çeliği Yapı Sistemleri

Yapı çeliği sistemleri, çeliğin üstün mekanik özellikleri ve çok yönlülüğü nedeniyle tercih edilmektedir. Bu sistemler, genellikle sanayi tesisleri, köprüler ve gökdelenler gibi büyük yapılarda kullanılmaktadır. Hafif çeliğe göre daha ağır ve maliyetli olmasına rağmen, özellikle uzun açıklıkların geçildiği projelerde yapı çeliği önem arz etmektedir.

Çelik yapıların yüksek dayanıklılığı özellikle sismik bölgelerde önemli bir avantaj sağlar. Çeliğin süneklik kapasitesi, depremler sırasında yapının enerji sönümleme yeteneğini artırır [25, 26].

Bu sistemler, modüler tasarım avantajıyla geniş bir uygulama alanı sunar. Çelik elemanların fabrikada üretilip sahada monte edilmesi, inşaat süreçlerini hızlandırır ve hata oranını düşürür. Ayrıca, geri dönüştürülebilir olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sağlar.

Yapı çeliği sistemleri, dayanıklılık ve esneklik gerektiren projelerde vazgeçilmezdir. Ancak, bu sistemlerin maliyetleri, soğukta şekil verilmiş çelik gibi alternatiflerle karşılaştırıldığında daha yüksektir. Bununla birlikte, uzun ömürlü olması ve projenin kısa sürede tamamlanıp kullanılabilir duruma gelmesi, yapı çeliğini cazip bir seçenek haline getirmektedir [27].

Yapı çeliğinde en sık kullanılan yönetmelikler arasında, Türkiye’de “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar” (ÇYTHYE 2018) [28] ile TBDY 2018 yer alır. ÇYTHYE 2018, çelik yapıların tasarım, imalat ve uygulama süreçlerine ilişkin genel ilke ve kuralları sunarken; TBDY 2018, deprem etkileri altında çelik taşıyıcı sistemlerin performans esaslarını ve sismik

tasarım kriterlerini düzenler. Türkiye’de, deprem olasılığı olan bölgelerde inşa edilen çelik yapılarda bu iki yönetmeliğin kullanılması mecburidir. Uluslararası alanda ise Amerikan yönetmelikleri olan “ANSI/AISC 360-22: Specification for structural steel buildings” [29] ile “ANSI/AISC 341-22: Seismic provisions for structural steel buildings” [30] öne çıkar. Bu yönetmelikler; çeliğin mekanik özelliklerinden başlayarak birleşim detayları, kaynaklı ve bulonlu bağlantı koşulları, burkulma ve stabilite hesapları gibi konularda kapsamlı ilkeler ortaya koyar. Böylece farklı coğrafyalarda ve farklı yük koşulları altında yapı çeliğinin güvenli, ekonomik ve dayanıklı tasarımı sağlanır [26, 31].

Bu yönetmelikler, çelik yapıların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamada büyük önem taşır. Ancak proje sahipleri ve mühendisler açısından, çelik yapıların avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurmak, tasarım ve uygulama aşamasında daha bilinçli kararlar alınmasını kolaylaştırır.

Avantajları [32]:

- Çelik homojen ve izotrop bir malzemedir. Üretiminin denetim altında yapılması sayesinde çeliğin bu özellikleri korunabilmektedir.
- Yüksek elastisite modülü büyük avantaj sağlar. Ayrıca yüksek mukavemetli oluşu, daha az malzeme kullanımıyla daha hafif ve ekonomik yapılar inşa etmeye imkan tanır.
- Çeliğin çekme ve basınç dayanımlarının aynı seviyelerde olması, çekme dayanımı düşük diğer yapı malzemeleriyle oluşturulması zor olan sistemlerin çelik ile kolayca tasarlanıp uygulanabilmesini sağlar.
- Çelik, yüksek sünekliğe sahiptir. Bu özelliği, özellikle deprem gibi dinamik yüklere karşı yapının enerji yutma kapasitesini artırır ve sismik tasarımlarda büyük avantaj sağlar.
- Çelik yapılar, gerektiğinde sökülüp başka bir yerde yeniden kullanılabilir. Ayrıca mevcut taşıyıcı elemanlarda değişiklik veya takviye yapmak oldukça kolaydır.
- Çelik malzeme genellikle fabrikada (veya atölyede) ön imalatı tamamlanmış olarak şantiyeye getirilir. Böylece hem eleman kalitesi kontrolü daha yüksek düzeyde yapılır hem de sahadaki kurulum süresi kısılır.
- Çelik elemanlarda, kaynak veya bağlantı hataları görsel veya tahribatsız muayene yöntemleriyle nispeten kolay tespit edilebilir. Betonarme gibi malzemelerdeki kusur tespiti ise genellikle daha zahmetli ve pahalıdır.

- Uygun bir planlamayla, çelik yapı kurulumu sırasında çoğu zaman geleneksel ahşap veya çelik iskelelere duyulan ihtiyaç azalır. Bu da işçilik ve zamandan tasarruf sağlar.
- Periyodik olarak korozyona karşı koruyucu boya ve gerekli diğer önlemler alındığı takdirde, çelik yapıların kullanım ömrü neredeyse sınırsızdır.

Dezavantajları [33, 34]:

- Sıcaklık artışı çeliğin akma ve çekme dayanımını kısa sürede azaltabilir. Bu nedenle yangına dayanıklı kaplama, spreyl izolasyon veya özel boya gibi ek koruma yöntemleri uygulanmalıdır.
- Su veya kimyasal maddelerle temas halinde çelikte korozyon oluşur. Bunu önlemek için, elemanların düzenli olarak boyanması veya galvanizlenmesi gerekir.
- Korozyon ve yangın koruması gibi ek önlemler, kullanım süresi boyunca çelik yapıların bakım maliyetlerini artırır.
- Çeliğin yüksek ısı ve ses iletkenliği, özellikle konut veya ofis gibi sessiz ve konforlu ortamların istendiği binalarda ek yalıtım önlemleri gerektirir.
- Aynı iletkenlik sebebiyle, kış ve yaz koşullarında uygun bir ısı yalıtımı sağlanmadığında enerji kayıpları artar, bu da ek proje ve uygulama maliyetine neden olur.
- Çelik, ilk yatırım aşamasında betonarme gibi bazı alternatiflere göre pahalı bir malzeme olabilir. Ancak uzun vadede, hızlı inşaat ve kullanım ömrü avantajlarıyla bu dengelenebilir.
- Çelik yapılarda kaynak, bulon bağlantıları ve montaj işlemleri titizlik gerektirir; nitelikli işçilik bulunmaması durumunda hatalı imalat riski artar.
- Yüksek mukavemetinden dolayı çelik elemanlar daha küçük enkesitlerde üretilebilir. Ancak bu narin enkesitlerde burkulma ve stabilite problemlerini önlemek için tasarımda ek önlemler alınmalıdır.
- Tekrarlı yükler altında (örneğin rüzgar veya çevrimsel trafik yükleri) çelik elemanlarda zamanla yorulma çatlakları oluşabilir. Bu durumun önüne geçmek için uygun tasarım kuralları ve periyodik muayene gereklidir.

2.6. Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Yapı Sistemleri

Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin tarihçesi, 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Endüstriyel devrim sonrası geliştirilen soğuk şekillendirme teknikleri, soğukta şekil verilmiş çelik malzemelerin üretiminde çığır açmıştır. İlk olarak sanayi devrimi sonrası yaygınlaşan çelik üretimi, soğukta şekil verilmiş çelik yapıların modern inşaat sektöründe yer edinmesini sağlamıştır [35].

ABD ve Kanada gibi ülkelerde ilk uygulamaları görülen soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, 1930'lu yıllardan itibaren prefabrik yapılarda yaygınlaşmaya başlamış, II. Dünya Savaşı sonrası ise ekonomik inşaat çözümleri olarak kabul edilmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik malzeme üretimindeki teknolojik gelişmeler, bu yapı sisteminin daha geniş kullanım alanına sahip olmasına yol açmıştır.

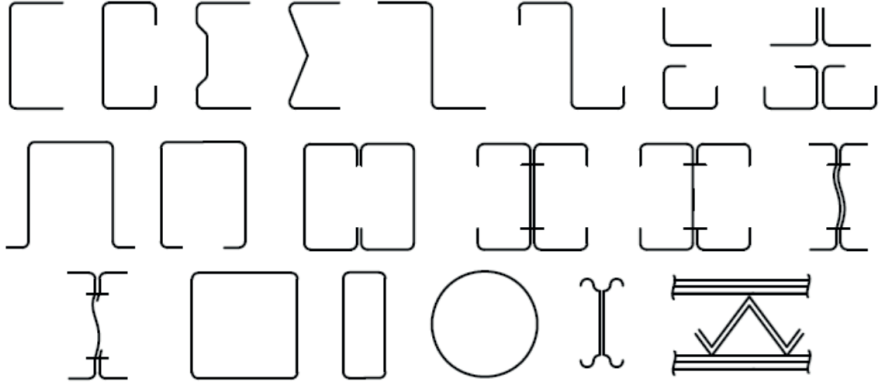
II. Dünya Savaşı sonrası ABD'de prefabrik soğukta şekil verilmiş çelik konutların inşası, maliyetlerin düşürülmesi ve hızlı bir şekilde konut ihtiyacını karşılaması açısından büyük önem arz etmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin montaj kolaylığı, bu tür projelerde büyük avantaj sağlamıştır.

Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin tarih boyunca gelişimi, yalnızca mühendislik hesapları ile değil, aynı zamanda malzeme biliminin ilerlemesiyle de doğrudan ilişkilidir [36].

Türkiye'de soğukta şekil verilmiş çelik yapılara yönelik yönetmelik olmamakla birlikte TBDY 2018, Bölüm 10 soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin sismik performansı ve tasarım ilkelerini genel çelik kuralları içinde ele alır. Avrupa'da "EN 1993: Eurocode 3: Design of steel structures" [37] ve Amerika'da "AISI S100-16: North American specification for the design of cold-formed steel structural members" (AISI S100-16) [38] yönetmelikleri de soğukta şekil verilmiş çelik elemanların stabilite, birleşim ve tasarım esaslarını kapsamaktadır [39-41].

Şekil 1'de gösterilen enkesitler, ülkemizde ve dünya genelinde soğukta şekil verilmiş çelik çerçevesli yapıların inşasında yaygın olarak kullanılan profillerdir. Bu enkesitlerden en yaygın olarak tercih edilen enkesitler ise; C, U, Z ve sigma enkesitlerdir. Soğukta şekil verilmiş çelik profil kalınlıkları genellikle 0.8mm ile 2mm arasındadır, boyları ise istenilen değerde çekilebilmektedir. C ve U profiller, duvar ve döşeme kirişleri ile kolon elemanlarında sıklıkla kullanılırken, Z profiller özellikle çatı makaslarında veya eğimli kiriş sistemlerinde kullanılır. Sigma enkesitli profiller hem taşıyıcı sistemlerde hem de ikincil elemanlarda rijitliği artırmak için tercih edilir. Bu profillerin seçiminde, enkesit geometrisi kadar galvaniz kalınlığı ve

çeliğin akma dayanımı gibi parametreler de önem taşır. Çelik sacların soğuk şekillendirme sırasında maruz kaldığı işlemler, enkesit rijitliğini ve burkulma dayanımını artırarak soğukta şekil verilmiş çelik yapıların güvenilirliğini pekiştirir [42, 43].



Şekil 1: Soğukta şekil verilmiş çelik enkesitleri [35]

Soğukta şekil verilmiş çelik profillerin üretim sürecinde, genellikle rulo halindeki galvanizli çelik saclar Şekil 2’de gösterildiği gibi rulo form makinelerine beslenerek sırasıyla şekillendirilir. Rulo form (roll-form) teknolojisi, sac malzemenin ardışık kalıplar arasında soğuk şekillendirilmesiyle istenen enkesit geometrisinin elde edilmesini mümkün kılar. Üretim aşamasında çeliğin mekanik özellikleri, kalınlık toleransları ve galvaniz kaplamanın bütünlüğü kontrol altında tutulur. Bu süreç, enkesitlerin stabilitesini ve taşıma kapasitesini artırmak amacıyla kıvrım, katlama ve bükme gibi işlemleri de içerir. Rulo form yöntemi, yüksek üretim hızına erişilebilmesi ve standart enkesitlerde seri üretim gerçekleştirilebilmesi bakımından endüstriyel ölçekte yaygın biçimde uygulanır [44].



Şekil 2: Rulo form yöntemi ile soğuk şekil verme işlemi

Soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemler belirli avantaj ve dezavantajlar içermektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemleri, sahip olduğu birçok teknik ve dayanıklılık avantajı sayesinde modern inşaat projelerinde giderek tercih edilmektedir. Fabrikada ön üretimin yapılması, şantiye alanında hızlı ve pratik bir montaj süreci sunar. Ayrıca geri dönüştürülebilir çelik malzeme kullanımı, çevre dostu ve sürdürülebilir projeler için büyük bir avantaj sağlar. Soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemlerinin, diğer yapı sistemleri karşılaştırıldığında ortaya çıkan avantajları [45-47]:

- Ahşap yapı elemanlarının doğal kusurları (budak vb.) ve malzeme çeşitliliği sebebiyle taşıma kapasitesi değişkenlik gösterebilir. Soğukta şekil verilmiş çelik profiller ise homojen ve denetimli üretim sayesinde daha istikrarlı ve yüksek dayanım sağlar.
- Ahşap, yüksek sıcaklıklara karşı daha duyarlı olduğu için yangın riskine karşı soğukta şekil verilmiş çelik sistemler ek koruyucu malzeme ve detaylarla daha güvenli bir çözüm oluşturabilir.
- Ahşap malzeme nem, rutubet, böceklenme gibi etkenlere karşı sürekli koruma ister. Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, uygun koruma ve kaplama yöntemleri uygulandığında daha uzun ömürlü ve bakımı daha kolay bir yapı elde edilmesini sağlar.

- Yiğma yapıların inşasında kullanılan taş ile tuğla ve gaz beton gibi malzemelerin ağır olması, nakliye süreçlerini hem maliyet hem de zaman açısından olumsuz etkileyebilir. Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, hafifliği sayesinde nakliyyede kolaylık ve montajda hız sağlar.
- Yiğma yapıların duvar kalınlıkları ve taşıyıcı sistemleri tasarımı sınırlandırılabilir. Hafif çeliğin farklı profillerle kombinasyonu, mimari açıdan daha esnek ve istenen enkesitlerde hızlı çözümler sunar.
- Yiğma inşaatta malzeme taşıma, duvar örme, sıva gibi süreçler zaman alır. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, prefabrik veya yarı-prefabrik yöntemlerle saha montajında ciddi oranda zaman tasarrufu sağlar.
- Soğukta şekil verilmiş çelik yapı elemanları, betonun kalıp, demir ve döküm süreçlerindeki yoğun iş gücünü ortadan kaldırarak şantiye organizasyonunu kolaylaştırır. Bu durum vinç kapasitesi gibi ağır ekipman gereksinimlerini de düşürür.
- Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin kütesinin düşük olması, deprem tasarımında sismik talebi azaltır ve yapının yatay kuvvetler altındaki davranışını iyileştirir.
- Soğukta şekil verilmiş çelik yapılar, betonarmeye göre çok daha düşük yapı ağırlıklarına sahiptir. Bu durum temel tasarımında ve taşıyıcı sistem boyutlarında (örneğin kolon, kiriş enkesitleri) tasarruf sağlar ve maliyetleri düşürür.
- Prefabrik beton panellerin taşınması, vinç ve ağır yük kaldırma donanımı gerektirir. Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, parça boyutları ve ağırlığı açısından daha küçük ekipmanlarla taşınabilir ve kurulabilir.
- Prefabrik paneller fabrika üretimi sonrasında sahada vinçle yerine konur, sonrasında ek bağlantılar, derz dolguları ve düzenlemeler gerekir. Soğukta şekil verilmiş çelik yapı elemanları ise sahada daha hızlı monte edilip esnek değişikliklere imkan tanır.
- Prefabrik elemanlarda hasar oluşması veya değişiklik gerekmesi durumunda, beton panellerin sökülüp yeniden takılması karmaşıktır. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, bağlantı detayları bakımından sökme-takma ve revizyon işlemlerini daha pratik hale getirir.
- Yapı çeliği sistemlerinde kullanılan H veya I profiller daha kalın ve ağır enkesitler içerir. Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, duvar ve çatı sistemlerinde daha ince enkesitlerle benzer taşıma kapasitesini karşılayarak toplam yapı ağırlığını azaltır.

- Yapı çeliği ile yapılan yapıların montajında yüksek kapasiteli vinçler, nitelikli kaynakçılar ve geniş şantiye alanları gerekebilir. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar ise genellikle bulonlu/vidalı sistemlerle basit ekipman ve iş gücüyle kolayca monte edilebilir.

Dezavantajları [46-49]:

- Ahşap bazı bölgelerde daha kolay temin edilebildiğinden, hafif çeliğin ham madde ve işçilik maliyeti yerel koşullara bağlı olarak daha yüksek olur.
- Ahşap, doğal bir yalıtkan özelliğe sahipken metal profiller ısıyı daha hızlı iletir. Bu nedenle soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerde ısı köprülerini engellemek için ek yalıtım detaylarına ihtiyaç duyulur.
- Ahşap konstrüksiyon, hafif çeliğe göre sesi ve titreşimi bir nebze daha iyi sönümler. Soğukta şekil verilmiş çelik yapılarda ise titreşim ve sesin diğer odalara veya katlara aktarımı daha yüksek olur.
- Yığma sistemlerde paslanma riski doğal olarak söz konusu olmazken, soğukta şekil verilmiş çelik profillerin korozyona karşı koruyucu kaplama veya galvanizleme gibi ek işlemlere ihtiyacı vardır.
- Yığma yapı ustalığı yaygın ve nispeten basit olmasına karşın, soğukta şekil verilmiş çelik yapı montajında bağlantı detayları, profil kesimleri ve ankrajların doğru uygulanması için uzman iş gücü ve ekipman gerekir.
- Yığma duvarların sahip olduğu yüksek termal kütle, iç ortamdaki sıcaklık değişimlerini yavaşlatarak ısıl kararlılığı artırır. Soğukta şekil verilmiş çelik ise düşük termal kütle nedeniyle ısı değişimlerine daha hızlı tepki verir, bu da iklimlendirme masraflarını artırabilir.
- Betonarme sistemlerde donatı betona gömülü olduğu için dış etkilere nispeten daha korunaklıdır. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler ise açıkta çalışan metal profillerle inşa edildiğinden, korozyona karşı düzenli bakım ve koruyucu uygulamalar gerektirir.
- Betonarme yapılar, döküm sırasında sahada bazı hatalar olsa bile sonradan bütüncül bir eleman oluştururlar. Daha yekparedir ve hiperstatiklik derecesi daha fazladır. Soğukta şekil verilmiş çelik yapılarda ise her bir profil ve bağlantı noktasının montaj kalitesi sonuç üzerinde doğrudan etkilidir, bu da kontrol ve takip gerektirir.
- Prefabrik beton paneller büyük parça halinde (duvar, döşeme vb.) üretilirken, soğukta şekil verilmiş çelik profiller birçok küçük

elemanın sahada birleştirilmesini gerektirir. Bu da bağlantı sayısını ve montaj detaylarını artırabilir.

- Prefabrik beton, doğal olarak daha iyi bir yangın dayanımı sunar. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerde, yangının çelik iskelete hızlı etki etmesini önlemek için ilave yangın koruyucu kaplamalar veya detaylar gerekir.
- Özellikle dış cephe uygulamalarında, beton paneller darbe ve aşınmaya karşı daha yüksek dayanım gösterir. Soğukta şekil verilmiş çelik kaplamalarında ise kaplamanın türüne göre hasar riski artabilir.
- Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, çok geniş açıklıklar veya ağır endüstriyel yükler için yeterli rijitlik ve taşıma kapasitesine her zaman uygun olmayabilir. Geleneksel çelik profillerle daha büyük açıklıklar geçilebilir. Fakat yapı çeliği ile birlikte kullanılabildiği durumlarda bu dezavantaj azaltılmış olur.
- Soğukta şekil verilmiş çelik profiller, incelikten dolayı diğer yapı malzemelerinde gözlemlenmeyen dayanım sorunlarına neden olabilmekte bu nedenle analizleri daha karmaşıktır (mesela, çarpılmalı burkulma). Yapı çeliği elemanlar, malzeme kalınlığı ve profili nedeniyle stabilize açısından avantajlı olabilir.
- Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, ince profiller ve yüksek hassasiyetli bağlantılarla çalıştığı için tolerans hatalarına daha az izin verir. Yapı çeliği yapılarda ise malzemenin kalınlığı ve enkesit özellikleri nedeniyle tolerans aralıkları biraz daha geniş olabilir.

Soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemlerinin avantaj ve dezavantajları, proje gereksinimlerine göre değişiklik gösterebilir. Ancak, doğru mühendislik yaklaşımları ve uygun malzeme seçimleriyle bu sistemlerin performansı artırılabilir. Örneğin, ses ve ısı yalıtımı sorunları modern izolasyon teknikleriyle giderilebilirken, başlangıç maliyetleri uzun vadede enerji tasarrufuyla dengelenebilir. Bu nedenle, soğukta şekil verilmiş çelik yapı sistemleri, dikkatli bir tasarım süreciyle optimize edilerek yenilikçi çözümler sunabilir.

3. Soğukta Şekil Verilmiş Çeliğin Kullanım Alanları

Soğukta şekil verilmiş çelik sistemler, konutlar, endüstriyel tesisler, ticari yapılar ve kamu binaları gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu sistemler, özellikle deprem bölgelerinde ve hızlı yapı ihtiyacının olduğu yerlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik malzemelerin sunduğu esneklik, çeşitli kullanım alanlarında uygulanabilirlik sağlamaktadır.

Örneğin, prefabrik soğukta şekil verilmiş çelik yapıların kullanımı, afet sonrası hızlı bir şekilde yerleşim alanlarının kurulmasında önemli bir rol oynar. 1999 Gölcük Depremi sonrası Türkiye’de soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin yaygınlaşmasının ardındaki temel nedenlerden biri, bu sistemlerin hızlı bir şekilde üretilebilmesi ve monte edilebilmesidir. Ayrıca, soğukta şekil verilmiş çelik sistemler düşük maliyetle geçici ve kalıcı çözümler sunar. 23 Ekim 2011 Van Depremi sonrasında soğukta şekil verilmiş çelikten geçici barınma yerleri hızlı bir şekilde yapılmıştır. Ayrıca 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrası da aynı nedenlerden bölgede çok sayıda soğukta şekil verilmiş yapı yapılması planlanmış ve devlet tarafından ihaleler yapılmıştır. Günümüzde bu yapıların montajı tamamlanmıştır.

Kentsel dönüşüm projelerinde de soğukta şekil verilmiş çelik sistemler önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle, enerji verimliliği yüksek ve sürdürülebilir yapıların oluşturulmasında soğukta şekil verilmiş çelik sistemler ideal bir seçenektir. Modern izolasyon malzemeleri ile desteklenen soğukta şekil verilmiş çelik yapılar hem ekonomik hem de çevresel açıdan avantaj sağlar.

Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin performansını ve teknolojik gelişimini belirleyen en önemli faktörlerden biri, birleşim elemanlarının tasarımı ve sahadaki uygulama kalitesidir. Taşıyıcı elemanlar bir arada tutan bu birleşimler, yapı dayanımını, yapı ömrünü ve montaj kolaylığını doğrudan etkiler [45, 50].

4. Soğukta Şekil Verilmiş Çelikte Birleşim Elemanları

Soğukta şekil verilmiş çelik yapılarda birleşim elemanları, yapısal bütünlüğü sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu birleşimler genellikle vidalar, perçinler, kaynak bağlantıları ve özel bağlantı levhaları kullanılarak gerçekleştirilir. Doğru birleşim elemanlarının seçimi, yapının dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü için önemlidir.

Vidalar, soğukta şekil verilmiş çelik yapılarda en yaygın kullanılan birleşim elemanlarından biridir. Bu elemanlar, yüksek mukavemet ve kolay montaj avantajı sunar. Örneğin, 10 mm çapında bir vida, yaklaşık 50 - 60 kN çekme kuvvetine dayanabilir. Perçinler ise daha kalıcı ve rijit bağlantılar oluşturmak için tercih edilir. Özellikle titreşimli ortamlarda perçinli bağlantılar, vidalı sistemlere kıyasla daha dayanıklıdır.

Kaynaklı bağlantılar, özellikle yüksek yük taşıma kapasitesine ihtiyaç duyulan birleşimlerde kullanılır. Kaynak, çelik elemanların birleştirilmesinde süreklilik sağlayarak yapısal bütünlüğü artırır. Ancak, kaynak işlemi için uzmanlık ve yüksek kaliteli ekipman gereklidir.

Birleşim elemanlarının tasarımında AISI S100-16 gibi yönetmeliklerin uygulanması büyük önem taşır. Bu yönetmelikler, birleşim elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin hesaplanması ve güvenlik katsayılarının belirlenmesi için rehberlik eder. Örneğin, bir çelik kolon ile kirişin birleşiminde kullanılan bağlantı levhası hem eğilme momentlerini hem de kesme kuvvetlerini taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır.

Soğukta şekil verilmiş çelik yapılarda doğru birleşim elemanlarının kullanımı, yapının dayanıklılığını artırırken, montaj sırasında ortaya çıkabilecek ilave işçilikleri minimize eder. Birleşim elemanlarının galvanizleme veya epoksi kaplama gibi koruma yöntemleriyle paslanmaya karşı dayanıklı hale getirilmesi, yapının uzun ömürlülüğünü sağlar. Bu nedenle, birleşim elemanları tasarımında hem mühendislik prensiplerine hem de çevresel koşullara uygun çözümler geliştirilmelidir [1, 45, 51].

Kaynaklar

- [1] İrbán, M. Y., & Fenkli, M. (2022). Çelik prefabrik yapılarda sürdürülebilirlik. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 26-31.
- [2] Işık, M. (2008). *Çok katlı betonarme yapılarda taşıyıcı sistem etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [3] Çalışkan, Ö., Meriç, E., & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109-118. <https://doi.org/10.35193/bscufbd.531012>
- [4] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>
- [5] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2024). *Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/03/20240324-1-1.pdf>
- [6] Kayakıran, S., & Kışhalı, E. (2019). Düünden bugüne tutkallı tabakallı ahşap yapı elemanların incelenmesi ve yapılarda taşıyıcı olarak kullanılması üzerine öneriler. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi (MBUD)*, 4(0), 34-50. <https://doi.org/10.30785/mbud.450537>
- [7] Yüksek, D., & Çamlıbel, O. (2025). Endüstriyel ahşap malzemelerin iç mekan kullanımı üzerine bir araştırma. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 34(1), 764-780. <https://doi.org/10.35379/cusosbil.1522486>
- [8] Kantay, R. (1993). *Kereste kurutma ve buharlama* (Cilt 6). Ormancılık Eğitim Ve Kültür Vakfı.
- [9] Kuran, F., Mısıır, İ. S., Aldemir, Ö., Tuna, E., & Fırat, S. (2020). 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliği yığma yapılar bölümü üzerine bir değerlendirme ve donatısız yığma bina örnekleri için karşılaştırmalı analiz. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 2(1), 47-60. <https://doi.org/10.46464/tdad.726301>
- [10] Oğurlu, İ. (2024). Doğal-ekolojik üç yapı malzemesi taş kerpiç ve ahşabın sürdürülebilirlik analizi. *European Journal of Science and Technology*, 53, 150-167. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10646951>
- [11] Özbay, A. E. Ö., & Karapınar, I. S. (2021). Tarihi bölgelerdeki yığma yapıların deprem güvenliği ön değerlendirmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11(1), 1-11. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.888714>
- [12] Korkmaz, K. A., Çarhoğlu, A. I., Orhon, A. V., & Nuhoglu, A. (2014). Farklı yapısal malzeme özelliklerinin yığma yapı davranışına etkisi. *Ner-*

- şehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1), 69-78. <https://doi.org/10.17100/nevbittek.210913>
- [13] Fintel, M., & Ghosh, S. K. (1991). Explicit inelastic dynamic design procedure for earthquake resistant structures. *Special Publication-127: Earthquake-Resistant Concrete Structures-Inelastic Response and Design*, 503-538. <https://doi.org/10.14359/3028>
- [14] Winkler, A., & Müeller, H. A. (1998). Recycling of fine processed building rubble materials. *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee*, 157-168. <https://doi.org/10.1680/scuorca.27268.0013>
- [15] Türk Standardları Enstitüsü. (2000). *TS 500: Betonarme yapının tasarım ve yapım kuralları*. <https://www.rcsmigazete.gov.tr/eskiler/2000/07/20000712M1-23.pdf>
- [16] European Committee for Standardization. (2004). *EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures*. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>
- [17] American Concrete Institute. (2025). *ACI 318-25: Building code for structural concrete—Code requirements and commentary*. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U25&Language=English&Units=US_Units
- [18] Topçu, A. (2014). *Betonarmenin tarihçesi* [Ders Notu]. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, https://drive.google.com/file/d/1nmFhJqlibhSp3AU1V2Wu_x3rAj0ThFKc/view
- [19] Gün, B., & Anıktar, S. (2020). Çevre ve şehircilik uygulamalarında betonarme-ağaç yapı karşılaştırması. *İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(3), 19-25. <https://doi.org/10.47769/izufbed.801787>
- [20] Polat, G., & Damcı, A. (2007). Türk inşaat sektöründe prefabrik betonarme yapı elemanlarının kullanımını etkileyen faktörler. 4. *İnşaat Yönetimi Kongresi*, 149-158.
- [21] Amani, A., & Niyazi, A. Q. (2018). Türkiye’de prefabrik yapı sektörünün hızlı gelişimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(3), 487-494. <https://doi.org/10.21923/jesd.431612>
- [22] Türk Standardları Enstitüsü. (2024). *TS EN 13369: Öndökümlü beton marmuller - Genel kurallar*. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073081098086086054097112065113107113>
- [23] Baran, A. (2022). Prefabrik yapı sektörünün ülkemizdeki gelişimi. *TAS Journal*, 2(3), 1-5.

- [24] Toprak, Z. (2002). *Prefabrike sanayi yapılarının deprem etkisine göre değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [25] Kurtay, C., & Badem, M. (2004). Avrupa ülkeleri ve Türkiye'deki çelik yapı uygulama olanak ve kısıtlarının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(4), 351-363.
- [26] Yıldızhan Sağır, B., & Temel, B. (2022). Moment aktaran ve merkezi çaprazlı çok katlı çelik yapıların 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliğine göre analizi ve tasarımı (TBDY- 2018). *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1017-1030. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1230927>
- [27] Nuryadı, H., & Özşahin, B. (2023). Çelik ve karma taşıyıcı sistemli sanayi bina örneklerinin kaba yapım maliyetlerinin trakya bölgesi için karşılaştırılması. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 418-442. <https://doi.org/10.34186/klujes.1314113>
- [28] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/02/20180215M1-4-1.pdf>
- [29] American Institute of Steel Construction. (2022). *ANSI/AISC 360-22: Specification for structural steel buildings*. <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/publications/standards/a360-22w.pdf>
- [30] American Institute of Steel Construction. (2022). *ANSI/AISC 341-22: Seismic provisions for structural steel buildings*. <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a341-22w.pdf>
- [31] Ülker, M., & Savaş, S. (2018). AISC 360-10 ve türk deprem yönetmeliğine göre çelik yapıların tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 21-32.
- [32] Uysal, D. (2014). *Geçmişten günümüze çok katlı çelik yapı taşıyıcı sistemlerindeki gelişmelerin uygulama örnekleriyle analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.
- [33] Yağımlı, M., & Yazgan, M. T. (2020). Tüm binayı saran yangın sonucunda çelik yapıların dayanımlarının araştırılması. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(3), 1077-1098. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.714581>
- [34] Ünver, H. (2003). *Çelik yapı detaylarının taşıyıcı sistemler açısından irdelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [35] Yu, W. W., LaBoube, R. A., & Chen, H. (2020). *Cold-Formed Steel Design* (5. basım). Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=u7CuDwAAQBAJ>
- [36] Macdonald, M., Heiyanuduwa, M. A., & Rhodes, J. (2008). Recent developments in the design of cold-formed steel members and structures.

- Thin-Walled Structures*, 46(7-9), 1047-1053. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.01.039>
- [37] European Committee for Standardization. (2005). *EN 1993: Eurocode 3: Design of steel structures*. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.8.2005-1.pdf>
- [38] American Iron and Steel Institute. (2022). *AISI S100-16: North American specification for the design of cold-formed steel structural members*. <https://www.buildusingsteel.org/wp-content/uploads/2023/06/AISI-S100-16-2020-wS3-22.pdf>
- [39] Yu, W.-W., Wolford, D. S., & Johnson, A. L. (1996). Golden Anniversary of the AISI Specification. *CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971 - 2018)*. <https://scholars-mine.mst.edu/isccss/13iccfss/13iccfss-opening/2>
- [40] Ungermann, D., Lemański, T., & Brune, B. (2022). A New Eurocode-compliant design approach for cold-formed steel sections. *ce/papers*, 5(4), 125-134. <https://doi.org/10.1002/cepa.1737>
- [41] Güler, K., & Celep, Z. (2020). On the general requirements for design of earthquake resistant buildings in the Turkish Building Seismic code of 2018. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012015>
- [42] Liu, H., Chen, J., & Chan, T. (2024). Mechanical properties of corner material in cold-formed steel structure: From normal strength to high strength. *Structures*, 59, 105651. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105651>
- [43] Zeinoddini, V. M., & Schafer, B. W. (2012). Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*, 60, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.001>
- [44] Schafer, B. W. (2008). Review: The direct strength method of cold-formed steel member design. *Journal of Construction Steel Research*, 64(7-8), 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>
- [45] Ünal, A., & Fenkli, M. (2023). Hafif çelik yapı sistemleri. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 76-87.
- [46] Güneş, S. A., & Çeribaşı, S. (2018). Hafif çelik yapı tasarımında yaklaşımlar, mevcut kontrol şartları ve olası bir hafif çelik yapı yönetmeliğinde vurgulanması önerilen konular. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 362-375. <https://doi.org/10.5505/pajcs.2017.00821>
- [47] Eren, Ö., & Başarır, B. (2013). Çelik strüktürlerin yaşam döngüsü içinde sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi. *Engineering Scien-*

- ces, 8(2), 120-135. <https://doi.org/10.12739/NWSA.2013.8.2.1A0346>
- [48] Billah, M., Islam, M., & Bin Ali, R. (2019). Cold formed steel structure: An overview. *World Scientific News*, 118, 59-73.
- [49] Afshan, S., & Gardner, L. (2013). Experimental study of cold-formed ferritic stainless steel hollow sections. *Journal of Structural Engineering*, 139(5), 717-728. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000580)
- [50] Yılmaz, B., & Eren, Ö. (2022). Konut üretiminde tipleştirilmiş hafif çelik modül sistem ile tasarım olanaklarının değerlendirilmesi. *Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 7(2), 617-646. <https://doi.org/10.26835/my.1015124>
- [51] Kaya, M. T. (2019). *Hafif çelik yapıların bulon, vida ve perçinli birleşimlerinde farklı seviyelerdeki korozyonun etkileri* [Yüksek Lisans Tezi]. Konya Teknik Üniversitesi.

Akıllı Kentlerde Sürdürülebilir Hareketlilik: Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Rolü

Polat Yalınız¹

Özet

21. yüzyılda hızla artan kentleşme, ulaşım talebindeki yoğunlaşma ve çevresel baskılar, kent yönetimlerinde sürdürülebilirlik odaklı yeni çözümlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede ortaya çıkan akıllı kentler, bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) entegrasyonu yoluyla kentsel altyapıların daha etkin yönetilmesini, kaynakların verimli kullanılmasını ve yaşam kalitesinin yükseltilmesini hedefleyen bir dönüşüm modelini temsil etmektedir. Bu modelin en kritik bileşenlerinden biri olan akıllı ulaşım sistemleri (AUS), güvenli, verimli, çevre dostu ve kullanıcı odaklı ulaşım hizmetlerinin sağlanmasında stratejik bir rol üstlenmektedir. Bu kitap bölümünde, akıllı kentlerin kavramsal çerçevesi, temel bileşenleri ve gelişim dinamikleri ele alınmış; AUS'nin tanımı, işlevleri ve sürdürülebilir hareketlilik bağlamındaki katkıları detaylandırılmıştır. Dünya genelinden (Curitiba, Londra, Tokyo, Kopenhag) ve Türkiye'den (İstanbul, Ankara, İzmir, Eskişehir) başarılı uygulama örnekleri incelenerek, AUS'nin trafik yönetimine, yol güvenliğine, karbon emisyonlarının azaltılmasına ve toplu taşımayı cazip hale getirmesine yönelik etkileri tartışılmıştır. Ayrıca, yüksek yatırım maliyetleri, veri güvenliği ve mahremiyet sorunları, kurumsal koordinasyon eksiklikleri ve sosyal kabul edilebilirlik gibi karşılaşılan zorluklar analiz edilmiştir. Çalışmada, yapay zekâ, nesnelerin interneti, dijital ikiz uygulamaları ve otonom araçlar gibi yeni teknolojilerin AUS'nin gelişiminde yaratacağı fırsatlar da geleceğe yönelik perspektifler kapsamında ele alınmıştır. Bu bağlamda, akıllı kentlerde sürdürülebilir hareketliliğin sağlanmasında AUS'nin merkezi konumu vurgulanmış; Türkiye'nin bu potansiyeli etkin biçimde kullanabilmesi için politika, teknoloji ve toplumsal düzeyde stratejik öneriler sunulmuştur. Sonuç olarak, akıllı ulaşım sistemleri yalnızca teknik bir yenilik değil, aynı zamanda sürdürülebilir kentsel dönüşümün anahtarıdır. Türkiye'nin ulusal düzeyde AUS stratejisi geliştirmesi, toplu taşımaya öncelik vermesi, veri güvenliği ve kullanıcı odaklı mobilite hizmetlerini güçlendirmesi, küresel ölçekte rekabetçi ve sürdürülebilir bir ulaşım altyapısının inşasında kritik öneme sahiptir.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, polat.yaliniz@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0373-9727

1. Giriş

21. yüzyıl kentleri, hızla artan nüfus, yoğunlaşan ulaşım talebi ve çevresel baskılar nedeniyle önemli bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Birleşmiş Milletler verilerine göre dünya nüfusunun yaklaşık %55'i kentlerde yaşamaktadır ve bu oranın 2050 yılında %68'e ulaşacağı öngörülmektedir [1]. Bu hızlı kentleşme, enerji tüketiminin artması, hava kirliliği, trafik sıkışıklığı ve sürdürülebilirlik sorunlarını beraberinde getirmektedir.

Bu sorunlara çözüm arayışında “akıllı kent” kavramı ortaya çıkmıştır. Akıllı kentler, bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) kullanımı ile kentsel altyapıların daha verimli yönetilmesini, kaynakların etkin kullanılmasını ve kentlilerin yaşam kalitesinin artırılmasını amaçlayan yapılardır. Bu bağlamda, ulaşım sistemleri akıllı kentlerin en kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Çünkü ulaşım, yalnızca fiziksel erişimi sağlamaz; aynı zamanda ekonomik verimliliği, toplumsal etkileşimi ve çevresel sürdürülebilirliği doğrudan etkilemektedir [2, 3].

Akıllı ulaşım sistemleri (AUS), ulaşımın güvenli, verimli, çevre dostu ve kullanıcı odaklı bir biçimde işletilmesini sağlayan teknolojik çözümler bütünüdür. Trafik yoğunluğunu azaltmak, yol güvenliğini artırmak, karbon emisyonlarını düşürmek ve toplu taşımayı cazip hale getirmek amacıyla geliştirilmiş uygulamaları kapsamaktadır. Günümüzde AUS, sensör tabanlı trafik yönetimi, akıllı sinyalizasyon, GPS tabanlı filo yönetimi, otonom araçlar ve mobil uygulamalar aracılığıyla toplu taşımanın entegrasyonu gibi çok çeşitli alanlarda uygulanmaktadır.

Uluslararası literatürde akıllı kent kavramı, yalnızca teknolojik entegrasyonla değil, aynı zamanda yönetim, katılım ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla ele alınmaktadır [4, 5]. Bu bağlamda AUS'nin işlevi, kentsel hareketlilik politikalarını daha kapsayıcı hale getirmek ve çevresel etkileri azaltmaktır. Özellikle Avrupa Birliği tarafından finanse edilen “Smart Cities and Communities” projeleri, ulaşım sistemlerinin enerji verimliliği ve kullanıcı odaklı hizmetler ile dönüştürülmesine yönelik öncü uygulamalar sunmaktadır [6]. Türkiye’de ise AUS çalışmaları, özellikle büyükşehirlerde toplu taşımaya entegrasyon ve akıllı durak uygulamaları üzerinden gelişim göstermektedir. Bununla birlikte orta ve küçük ölçekli kentlerde henüz sistematik bir stratejinin olmaması, bu alanın araştırma ve uygulama açısından önemli bir boşluk barındırdığını göstermektedir.

Bununla birlikte, akıllı kent vizyonunun başarıya ulaşabilmesi yalnızca teknolojik altyapının gelişimine değil, aynı zamanda kurumsal koordinasyon, veri yönetimi ve toplumsal kabul düzeyine de bağlıdır. Özellikle gelişmekte

olan ülkelerde finansal kaynakların sınırlı olması, akıllı ulaşım yatırımlarının hayata geçirilmesini güçleştirmekte; bu durum kent yönetimlerinde önceliklendirme ve planlama sorunlarını gündeme getirmektedir. Bu bağlamda AUS, yalnızca teknik bir araç değil, aynı zamanda politika, ekonomi ve toplum boyutlarının kesişiminde stratejik bir dönüştürücü unsur olarak ele alınmalıdır.

Ayrıca, akıllı ulaşım sistemlerinin gelişimi, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Karbon emisyonlarının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının ulaşım altyapısına entegrasyonu ve toplu taşıma odaklı mobilite stratejilerinin benimsenmesi, yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmaz; aynı zamanda kentlerin sosyal kapsayıcılığını ve yaşam kalitesini artırır. Bu nedenle AUS, akıllı kentlerin temel yapı taşlarından biri olarak, geleceğin şehirlerini daha dirençli, erişilebilir ve sürdürülebilir hale getirme potansiyeline sahiptir.

Dolayısıyla bu bölümde, akıllı kentlerin temel bileşenleri ve gelişim dinamikleri açıklanacak; akıllı ulaşım sistemlerinin tanımı, işlevleri ve sürdürülebilir hareketlilik açısından rolü tartışılacaktır. Ayrıca dünya genelindeki başarılı uygulama örnekleri incelenerek, Türkiye için yol haritası niteliğinde değerlendirmeler sunulacaktır.

2. Akıllı Kentler ve Akıllı Ulaşım

Akıllı kentler, bilgi ve iletişim teknolojilerinin (BİT) kentsel altyapıya entegre edilmesiyle kaynakların daha verimli kullanıldığı, çevresel etkilerin azaltıldığı ve yaşam kalitesinin yükseldiği sürdürülebilir şehir modelleri olarak tanımlanmaktadır. Bu kapsamda, akıllı kentlerin en kritik bileşenlerinden biri olan akıllı ulaşım sistemleri (AUS), hızla artan kentleşmenin getirdiği trafik yoğunluğu, çevresel baskılar ve enerji verimliliği sorunlarına yenilikçi çözümler sunmaktadır. Akıllı ulaşım, gerçek zamanlı veri toplama ve analizine dayalı trafik yönetimi, toplu taşıma verimliliğinin artırılması, yol güvenliği uygulamaları ve karbon salınımının azaltılmasına yönelik sürdürülebilir hareketlilik stratejilerini içermektedir.

2.1. Akıllı Kentler

Kentler, yalnızca nüfusun yoğunlaştığı fiziksel mekânlar değil; aynı zamanda ekonomik, sosyal ve kültürel etkileşimin merkezleridir. Ancak hızla artan kentleşme, ulaşım, enerji, çevre ve yönetim alanlarında ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Bu noktada, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kentsel sistemlere entegre edilmesiyle “akıllı kent” kavramı ortaya çıkmıştır.

Akıllı kentler, veriye dayalı karar alma süreçleriyle kaynakları daha verimli kullanan, çevresel etkileri azaltan, kentlilerin yaşam kalitesini artıran ve sürdürülebilir kalkınmayı destekleyen yapılardır. Avrupa Komisyonu akıllı kenti, “bilgi teknolojilerinin kullanımıyla kentsel hizmetlerin daha verimli ve çevre dostu biçimde sunulduğu, vatandaşların katılımının güçlendirildiği şehir modeli” olarak tanımlamaktadır [7]. Bu tanım, akıllı kentlerin yalnızca teknolojik bir dönüşüm değil, aynı zamanda toplumsal katılım ve yönetim anlayışında da köklü bir değişim içerdiğini göstermektedir.

Literatürde farklı sınıflandırmalar olmakla birlikte, akıllı kentler genellikle altı temel bileşen üzerinden ele alınmaktadır [8]:

1. **Akıllı Ulaşım (Smart Mobility):** Ulaşım altyapısının verimliliğini artırarak trafik sıkışıklığını azaltmayı, toplu taşıma hizmetlerini güçlendirmeyi ve sürdürülebilir hareketliliği teşvik etmeyi amaçlar. Akıllı ulaşım sistemleri, gerçek zamanlı trafik verilerinin analizi, otonom araç teknolojileri ve paylaşımlı mobilité çözümleriyle desteklenmektedir.
2. **Akıllı Çevre (Smart Environment):** Enerji verimliliği, atık yönetimi, karbon salınımının azaltılması ve çevresel sürdürülebilirlik uygulamalarını içerir. Yenilenebilir enerji sistemleri, akıllı şebekeler (smart grids) ve çevre sensörleri bu bileşenin temel unsurlarıdır.
3. **Akıllı İnsan (Smart People):** Eğitim, dijital beceriler, yenilikçilik kapasitesi ve toplumsal katılımın güçlendirilmesine odaklanır. Akıllı insan boyutu, bireylerin bilgiye erişim imkânlarının artması ve kent yönetimine aktif katılımlarını teşvik etmesi açısından kritik öneme sahiptir.
4. **Akıllı Ekonomi (Smart Economy):** Yenilikçi iş modelleri, girişimcilik ekosistemlerinin geliştirilmesi, dijital ticaretin yaygınlaştırılması ve küresel ölçekte rekabet gücünün artırılması hedeflenir. Bu bağlamda, dijital dönüşüm süreçleri ve endüstri 4.0 uygulamaları ön plana çıkmaktadır.
5. **Akıllı Yönetişim (Smart Governance):** Katılımcı yönetim, şeffaflık, hesap verebilirlik ve veriye dayalı karar mekanizmalarının güçlendirilmesini ifade eder. Açık veri portalları, e-belediye hizmetleri ve dijital katılım araçları bu bileşenin uygulama alanlarını oluşturmaktadır.
6. **Akıllı Yaşam (Smart Living):** Yaşam kalitesinin yükseltilmesi, kültür-sanat etkinliklerine erişimin kolaylaştırılması, sağlık ve eğitim hizmetlerinin dijitalleşmesi gibi unsurları kapsamaktadır. Bu boyut,

bireylerin sosyal yaşamda daha aktif ve kapsayıcı bir biçimde yer almasını desteklemektedir.

Akıllı kent kavramı yalnızca teknolojik altyapıların geliştirilmesiyle sınırlı olmayıp, sürdürülebilirlik, katılımcı yönetim ve yaşam kalitesini artırmaya yönelik bütüncül bir yaklaşımı temsil etmektedir.

2.2. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS)

Akıllı kentlerin en kritik bileşenlerinden biri **akıllı ulaşım sistemleri (AUS)**'dir. Kentleşmenin hızla artmasıyla birlikte ortaya çıkan trafik yoğunluğu, çevresel sorunlar, enerji tüketimi ve zaman kaybı gibi problemler, geleneksel ulaşım çözümlerini yetersiz hale getirmiştir. Bu noktada, bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaştırma altyapısına entegrasyonu ile akıllı ulaşım kavramı gelişmiştir.

Akıllı ulaşım, gerçek zamanlı veri toplama, analiz etme ve karar destek mekanizmaları sayesinde ulaşımın daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir olmasını hedefler. Avrupa Komisyonu, AUS'yi "yol kullanıcılarının, araçların ve altyapının birbirine bağlı olduğu; bilgi ve iletişim teknolojileri ile desteklenen bütünleşmiş bir ulaşım sistemi" olarak tanımlamaktadır [9].

AUS'nin temel işlevleri şunlardır:

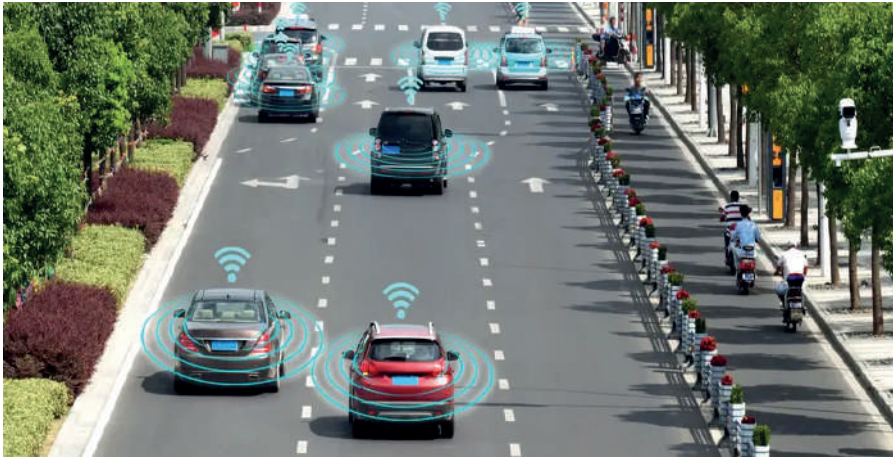
- **Trafik Yönetimi:** Trafik akışını izleme, trafik ışıklarını senkronize etme ve tıkanıklıkları önleyici stratejiler geliştirme.
- **Toplu Taşıma Verimliliği:** GPS tabanlı otobüs takip sistemleri, mobil bilgilendirme uygulamaları ve elektronik biletleme çözümleri.
- **Yol Güvenliği:** Kaza tespit sistemleri, akıllı kameralar, sürücü destek sistemleri ve acil durum müdahale mekanizmaları.
- **Çevresel Sürdürülebilirlik:** Karbon emisyonlarının azaltılması, elektrikli ve paylaşımlı araçların teşvik edilmesi, bisiklet ve yaya odaklı altyapıların geliştirilmesi.
- **Kullanıcı Odaklı Hizmetler:** Mobil uygulamalar üzerinden anlık yol durumu bilgisi, park yeri yönlendirmeleri ve kişiselleştirilmiş güzergâh önerileri.

Dünya genelinde **Tokyo, Londra, Kopenhag ve Curitiba** gibi kentler, akıllı ulaşım uygulamalarıyla öne çıkmaktadır. Türkiye'de ise **İstanbul, Ankara, Konya ve Eskişehir** gibi şehirlerde akıllı ulaşım sistemleri farklı boyutlarda uygulanmaktadır. İstanbul'da akıllı trafik yönetim merkezi ve İstanbul kart entegrasyonu, Ankara'da "EGO Cepte" uygulaması, Konya'da

akıllı otopark sistemleri ve Eskişehir’de tramvay yeşil hat uygulamaları öne çıkan örneklerdir.

Akıllı ulaşım, sadece teknolojik altyapının geliştirilmesiyle sınırlı olmayıp, toplumsal yaşam kalitesini artıran, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ve ekonomik verimliliği güçlendiren bir dönüşüm sürecini ifade etmektedir. Akıllı kent vizyonunun başarısı, büyük ölçüde akıllı ulaşım sistemlerinin etkinliğiyle doğrudan ilişkilidir.

Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), ulaşım ağlarının güvenlik ve etkinliğini artırmak amacıyla iletişim, algılama, hesaplama ve kontrol teknolojilerini bir araya getiren yenilikçi çözümler bütünüdür. Bu sistemler, trafik kazalarının azaltılmasına, seyahat güzergâhlarının daha verimli biçimde planlanmasına ve mevcut ulaşım altyapısının performansının sürekli izlenmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, araçlar arası iletişim güvenliği artırırken; akıllı trafik yönetim sistemleri yoğunluğu azaltarak yolculuk sürelerini kısaltabilmektedir. Ayrıca, otonom araç teknolojileri kent içi hareketliliği destekleyen önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Şekil 1.de AUS nin ulaşım ağlarının güvenliğine verdiği katkı ile ilgili bir örnek görsel verilmiştir. Şekil 1.de görüldü gibi AUS, tüm yol kullanıcıları için daha güvenli, hızlı ve sürdürülebilir bir ulaşım ortamı sunmayı hedeflemektedir [10].



Şekil 1. AUS nin ulaşım ağlarının güvenliğine verdiği katkı örneği [10]

AUS bileşenlerinden akıllı durak ve yolcu bilgilendirme sistemleri ise toplu taşıma araçlarının duraklara tahmini varış sürelerini dijital ekranlar aracılığıyla yolculara sunarak önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Bu sayede vatandaşlar, binecekleri aracı daha bilinçli şekilde seçebilmekte veya güzergâh

üzerinde geçen alternatif toplu taşıma seçeneklerini değerlendirebilmektedir. Araç içlerinde yer alan bilgilendirme panelleri ve sesli anons sistemleri ise yolculara seyahat süresince yönlendirme ve bilgilendirme sağlayarak konforu ve kullanıcı deneyimini artırmaktadır. Ayrıca bu tür uygulamalar, toplu taşımanın cazibesini artırarak özel araç kullanımını azaltmakta ve böylece sürdürülebilir ulaşım hedeflerine katkı sağlamaktadır [11]. Şekil 2. de akıllı durak sistemlerine ait bir görsel yer verilmiştir.



Şekil 2. Akıllı durak sistemlerine ait örnek [11].

2.3. Akıllı Kentler ve Akıllı Ulaşım Sistemlerinin Toplumsal ve İşlevsel Boyutu

Akıllı kentler, bilgi ve iletişim teknolojilerinin kentsel altyapılara entegrasyonu ile kaynak kullanımını optimize eden, çevresel etkileri azaltan ve kentlilerin yaşam kalitesini artıran sürdürülebilir şehir modelleri olarak öne çıkmaktadır. Bu bütünsel yaklaşım içinde akıllı ulaşım sistemleri (AUS), akıllı kentlerin en kritik ve tamamlayıcı unsurlarından biri konumundadır. Çünkü kentlerde artan nüfus ve motorlu taşıt yoğunluğu, trafik sıkışıklığı, enerji tüketimi ve çevresel baskılar, akıllı kentlerin hedeflediği sürdürülebilirlik vizyonunun doğrudan karşı karşıya olduğu sorunlardır.

AUS, akıllı kentlerin genel işleyişine katkı sağlayarak verimlilik, güvenlik ve sürdürülebilirlik boyutlarını desteklemektedir. Gerçek zamanlı trafik yönetimi, toplu taşıma entegrasyonu, akıllı park sistemleri, çevresel izleme sensörleri ve kullanıcı odaklı mobil uygulamalar, kentlerde yaşam

kalitesini artıran uygulamalar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojilerin etkinliği yalnızca teknik altyapıya değil, aynı zamanda kullanıcıların sisteme duyduğu güvene ve erişim kolaylığına da bağlıdır. Toplumsal kabul, yeni ulaşım teknolojilerinin yaygınlaşmasında kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Özellikle yaşlı bireyler ve dijital okuryazarlığı sınırlı kullanıcılar için akıllı duraklar, mobil biletleme uygulamaları ve akıllı kart sistemleri kimi zaman erişim engeli oluşturabilmektedir. Bu nedenle AUS'nin kapsayıcı bir anlayışla tasarlanması, kullanıcı dostu arayüzlerin geliştirilmesi ve tüm kesimlerin sürece dâhil edilmesi önemlidir. Toplumsal farkındalık kampanyaları, eğitim programları ve katılımcı geri bildirim mekanizmaları aracılığıyla vatandaşların sürece aktif katılımı sağlanabilir. Böylelikle hem teknolojinin benimsenmesi kolaylaşacak hem de sürdürülebilir ulaşım politikalarının toplumsal tabanda güçlü bir destek bulması mümkün olacaktır.

Sonuç olarak, akıllı kentler ile akıllı ulaşım sistemleri arasındaki ilişki, yalnızca teknik bir bağımlılıkla sınırlı olmayıp, toplumsal boyutları da kapsayan bütüncül bir süreçtir. Akıllı kentler, ulaşım sistemlerinin dijitalleşmesiyle sürdürülebilirliğini güçlendirirken; akıllı ulaşım sistemleri de toplumsal kabul ve kullanıcı deneyimi üzerinden akıllı kent vizyonunun etkin işleyişini sağlamaktadır. Bu nedenle AUS, çağdaş kentleşme anlayışında hem stratejik hem de toplumsal bir bileşen olarak değerlendirilmelidir.

3. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

Akıllı kentlerin temel vizyonu, teknolojik yeniliklerle birlikte sürdürülebilirlik hedeflerini kentsel yaşamın merkezine yerleştirmektir. Bu bağlamda **akıllı ulaşım sistemleri (AUS)**, yalnızca trafik verimliliğini artırmakla kalmamakta; aynı zamanda karbon emisyonlarını azaltma, enerji verimliliğini yükseltme ve çevresel etkileri en aza indirme işlevi görmektedir. IoT ve akıllı ulaşım teknolojilerinin entegre edildiği trafik yönetim modellerinin, araç hareketliliğini optimize ederek yakıt tüketimini azalttığı ve sera gazı emisyonlarında kayda değer düşüş sağladığı ortaya konmuştur [12].

Benzer şekilde, Finlandiya'daki akıllı ulaşım projelerini inceleyen bir çalışma, bu projelerin çevresel sürdürülebilirliği yalnızca karbon emisyonu azaltımıyla değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve iklim dostu inovasyonlarla ele aldığını belirtmektedir [13]. Öte yandan, İskandinav'daki orta ölçekli kentlerde uygulanan akıllı ulaşım stratejilerinin incelendiği bir araştırma, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin stratejik planlarda öncelikli konumda

yer aldığı, ancak sosyal kapsayıcılık ve yaşam kalitesi boyutlarının görece geri planda kaldığını vurgulamaktadır [14].

Uygulamalı örnekler de bu bulguları destekler niteliktedir. İspanya'nın Sevilla kentinde yer alan Cartuja Teknoloji Parkı'nda akıllı ulaşım ve iklim entegrasyonuna odaklanan bir çalışma, veri temelli kontrol stratejilerinin enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azalttığını göstermektedir [15]. Bu örnek, akıllı ulaşım uygulamalarının yalnızca kent içi hareketliliği düzenlemekle kalmayıp, aynı zamanda küresel iklim hedeflerine katkı sağlayabileceğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, akıllı kentler ve akıllı ulaşım sistemleri arasındaki etkileşim, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada stratejik bir köprü işlevi görmektedir. AUS'nin çevresel etkileri azaltmadaki başarısı, kentlerin daha yaşanabilir, güvenli ve iklim dostu bir geleceğe yönelmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

4. Zorluklar ve Gelecek Perspektifi

Akıllı kentler ve akıllı ulaşım sistemleri (AUS), sürdürülebilirlik, verimlilik ve yaşam kalitesini artırma hedefleriyle şehirlerin dönüşümünde kritik rol oynamaktadır. Bununla birlikte, bu dönüşüm sürecinin önünde çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Öncelikle, akıllı ulaşım teknolojilerinin uygulanması yüksek maliyetler ve kapsamlı altyapı yatırımları gerektirmektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde finansal kaynakların yetersizliği, bu sistemlerin yaygınlaşmasının önünde önemli bir engel oluşturmaktadır [12].

AUS uygulamalarının hayata geçirilmesi yüksek yatırım maliyetlerini gerektirse de uzun vadede ekonomik faydaları oldukça belirgindir. Trafik sıkışıklığının azalmasıyla iş gücü kaybı ve yakıt tüketiminde tasarruf sağlanmakta, kazaların önlenmesiyle sağlık harcamaları düşmektedir. Ayrıca, akıllı ulaşım altyapısı; elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması, yeni mobilite girişimlerinin (paylaşımlı araçlar, e-skuter sistemleri vb.) desteklenmesi ve akıllı lojistik çözümlerinin geliştirilmesi gibi alanlarda yerel ekonomiye dinamizm kazandırmaktadır. Bu bağlamda kamu-özel sektör iş birliği modelleri, finansal sürdürülebilirliği güçlendirmek için etkili bir yol olarak değerlendirilebilir. Uluslararası deneyimler, Avrupa ve Asya kentlerinde AUS projelerinin büyük oranda kamu desteği ile başlatıldığını, ancak özel sektör inovasyonlarının sürece değer kattığını göstermektedir.

Bir diğer zorluk, veri yönetimi ve güvenliği konusudur. Akıllı ulaşım sistemleri büyük ölçüde gerçek zamanlı veri toplama ve işleme kapasitesine dayanmakta; bu durum kişisel verilerin korunması, siber güvenlik tehditleri ve etik sorunları beraberinde getirmektedir [14]. Ayrıca, farklı

ulaşım modlarının entegrasyonu ve standartların eksikliği, özellikle büyük metropollerde koordinasyon zorluklarına neden olmaktadır.

Toplumsal kabul de sürecin en kritik boyutlarından biridir. Yeni teknolojilere karşı kullanıcıların güven duymaması, alışkanlıklarını değiştirmekte isteksiz olmaları ve dijital okuryazarlık düzeylerindeki farklılıklar, AUS'nin etkinliğini sınırlandırabilmektedir [13]. Buna ek olarak, akıllı kent vizyonunun çevresel faydaları ön plana çıkmakla birlikte, sosyal kapsayıcılık ve yaşam kalitesine yönelik boyutların yeterince dikkate alınmaması gelecekteki uygulamalar açısından eleştirilen bir husustur.

Geleceğe yönelik perspektifte, akıllı ulaşım sistemlerinin yapay zekâ, büyük veri analitiği ve 5G tabanlı iletişim ağları ile daha da gelişmesi beklenmektedir. Elektrikli ve otonom araçların kent ulaşımına entegrasyonu, karbon emisyonlarını azaltmada kritik bir rol üstlenecektir [15]. Ayrıca, döngüsel ekonomi ve yeşil altyapı yaklaşımlarının ulaşım politikaları ile bütünleşmesi, kentlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, akıllı kentler ve akıllı ulaşımın geleceği, teknolojik ilerlemeler kadar politik irade, finansal sürdürülebilirlik, toplumsal katılım ve veri güvenliği gibi çok boyutlu faktörlere bağlıdır. Bu bağlamda, gelecek perspektifinde akıllı ulaşım sistemlerinin yalnızca teknolojik bir inovasyon değil, aynı zamanda ekonomik, sosyal ve çevresel bir dönüşüm aracı olarak kurgulanması gerekmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Akıllı kentler, hızla artan kentleşme, çevresel baskılar ve ulaşım talebindeki yoğunlaşma karşısında sürdürülebilir çözümler üretme zorunluluğu doğuran yeni bir yönetim paradigmasını temsil etmektedir. Bu bağlamda akıllı ulaşım sistemleri (AUS), yalnızca teknolojik bir yenilik değil, aynı zamanda güvenli, verimli ve çevre dostu bir kentsel hareketliliğin anahtarıdır. Çalışmada incelenen uluslararası ve ulusal örnekler, AUS'nin trafik yönetiminde etkinliği artırdığı, toplu taşımayı cazip hale getirdiği, karbon emisyonlarını azalttığı ve kullanıcı deneyimini güçlendirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek yatırım maliyetleri, veri güvenliği sorunları, kurumsal koordinasyon eksiklikleri ve toplumsal kabul gibi engellerin, sistemlerin yaygınlaşması önünde önemli bir sınır oluşturduğu da ortaya çıkmaktadır.

Bu değerlendirmeler ışığında, akademik ve uygulamalı düzeyde aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

1. **Ulusal Strateji ve Politikalar:** Türkiye'nin, kentler arası bütünleşik bir AUS vizyonu geliştirmesi, uzun vadeli hedefleri belirleyen ulusal bir strateji ortaya koyması ve yerel yönetimler için standartlar oluşturması kritik öneme sahiptir.
2. **Toplu Taşıma Önceliği:** Özel araç bağımlılığını azaltmak amacıyla toplu taşıma altyapısının güçlendirilmesi, akıllı durak ve yolcu bilgilendirme sistemlerinin yaygınlaştırılması ve multimodal entegrasyonun sağlanması gerekmektedir.
3. **Veri Güvenliği ve Etik:** Gerçek zamanlı veriye dayalı AUS uygulamalarında, siber güvenlik ve kişisel verilerin korunması temel öncelik olarak ele alınmalı; şeffaf ve güvenilir veri yönetimi mekanizmaları geliştirilmelidir.
4. **Teknoloji ve Yenilikçilik:** Yapay zekâ, nesnelerin interneti, büyük veri ve dijital ikiz uygulamaları gibi gelişen teknolojilerin AUS'ye entegrasyonu, sistemlerin esnekliğini ve etkinliğini artıracaktır. Ayrıca, elektrikli ve otonom araçların kent içi ulaşımına entegrasyonu karbon salınımlarını düşürmede kritik rol oynayacaktır.
5. **Toplumsal Katılım ve Eğitim:** Kullanıcıların yeni teknolojilere adaptasyonunu sağlamak için farkındalık kampanyaları düzenlenmeli, dijital okuryazarlık artırılmalı ve toplu taşımayı teşvik eden sosyal programlar uygulanmalıdır.
6. **Yerel Çözümler ve Pilot Projeler:** Büyük kentlerin yanı sıra orta ve küçük ölçekli şehirlerde de yerel ihtiyaçlara uygun pilot projeler geliştirilerek, farklı kentsel bağlamlarda uygulanabilirlik test edilmelidir.
7. **Yerel Yönetimler İçin Stratejik Yol Haritası:** Türkiye'de akıllı kent vizyonunun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için yerel yönetimlerin stratejik planlama kapasitesini güçlendirmesi gerekmektedir. Öncelikli olarak, kent bazlı ulaşım ana planlarına AUS entegrasyonu sağlanmalı; veri paylaşımı ve açık veri platformları ile şeffaf ve iş birliğine dayalı bir yönetim anlayışı benimsenmelidir. Ayrıca, orta ve küçük ölçekli kentlerde pilot projeler hayata geçirilerek farklı ölçeklerdeki uygulamaların etkinliği ölçülmelidir. Bu süreçte üniversiteler, araştırma merkezleri ve teknoloji firmalarıyla iş birlikleri kurularak bilimsel bilgi üretimi ile pratik uygulamalar arasında köprü oluşturulmalıdır. Yerel yönetimlerin katılımcı planlama mekanizmalarını kullanması hem toplumsal kabulü artıracak hem de AUS uygulamalarının uzun vadeli sürdürülebilirliğini güvence altına alacaktır.

Sonuç olarak, akıllı ulaşım sistemleri yalnızca teknik bir araç değil; aynı zamanda sürdürülebilir, kapsayıcı ve rekabetçi kentleşmenin geleceğini şekillendirecek stratejik bir unsurdur. Türkiye'nin bu dönüşüm sürecinde, politika, teknoloji ve toplum boyutlarında bütüncül bir yaklaşımı benimsemesi, küresel ölçekte rekabet gücünü artıracak ve kentlerde yaşam kalitesini yükseltecektir.

Kaynaklar

- [1] United Nations (UN). (2019). World urbanization prospects: The 2018 revision. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs.
- [2] Cervero, R. (1998). The transit metropolis: A global inquiry. Washington, DC: Island Press.
- [3] Pucher, J., & Buehler, R. (2008). Making cycling irresistible: Lessons from the Netherlands, Denmark and Germany. *Transport Reviews*, 28(4), 495–528. <https://doi.org/10.1080/01441640701806612>
- [4] Komninos, N. (2015). The age of intelligent cities: Smart environments and innovation-for-all strategies. New York: Routledge.
- [5] Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. *Journal of Urban Technology*, 22(1), 3–21. <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.942092>
- [6] European Commission. (n.d.). Smart Cities and Communities projects. Retrieved from <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu>
- [7] European Commission. (2017). Smart cities and communities: European innovation partnership. Brussels: European Commission.
- [8] Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanović, N., & Meijers, E. (2007). Smart cities: Ranking of European medium-sized cities. Vienna: Centre of Regional Science (SRF), Vienna University of Technology.
- [9] European Commission. (2011). White paper on transport: Roadmap to a single European transport area. Brussels: European Commission.
- [10] Otopratik. (t.y.). Akıllı ulaşım sistemleri nedir. <https://www.otopratik.com.tr/faydali-bilgiler/arac-bakimi/akilli-ulasim-sistemleri-nedir> adresinden erişildi.
- [11] Maf Bilişim. (t.y.). Akıllı durak ve yolcu bilgilendirme. <https://www.maf-bilisim.com.tr/services/akilli-durak-ve-yolcu-bilgilendirme> adresinden erişildi.
- [12] Musa, A. A., Chukwu, C. U., Oyedele, L. O., Akanbi, L. A., & Akinade, O. O. (2023). Sustainable traffic management for smart cities using IoT and ITS applications. *Sustainability*, 15(13), 9859. <https://doi.org/10.3390/su15139859>
- [13] Ahonen, V., Hussain, S., Merisalo, V., Pekkala, V., & Leviäkangas, P. (2024). Addressing sustainability in mobility: A study on Finnish smart mobility innovation projects. *European Transport Research Review*, 16, 7. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00630-0>
- [14] Müller-Eic, D., Bjørgen, A., & Stokke, K. B. (2023). Sustainable mobility in smart cities: A review of smart mobility strategies and measures in

Nordic mid-sized cities. *European Transport Research Review*, 15, 36. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00609-x>

- [15] López-Pérez, M. E., Bárcena, J. F., López-Aguilar, D., & Muñoz, J. (2023). Smart mobility and smart climate: An illustrative case in PCT Cartuja. *Energies*, 16(14), 5392. <https://doi.org/10.3390/en16145392>

Ulaştırma Altyapısında Menfezlerin Yapısı ve Uygulamaları

Polat Yalınız¹

Özet

Ulaştırma sistemlerinin güvenilirliği ve sürekliliği, yalnızca yol üstyapısının kalitesine değil, aynı zamanda altyapıyı destekleyen hidrolik yapıların etkinliğine bağlıdır. Karayolu ve demiryolu sistemleri, yalnızca fiziksel bağlantıyı sağlamakla kalmayıp, ticaretin, ulaşım güvenliğinin ve yaşam kalitesinin sürdürülebilirliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu altyapının uzun ömürlü ve güvenli olabilmesi için drenaj sistemlerinin işlevselliği büyük önem taşır. Bu noktada menfezler, ulaşım mühendisliği açısından vazgeçilmez yapılar olarak öne çıkmaktadır. Menfezler; yüzeysel ve yeraltı sularının yol gövdesine zarar vermeden uzaklaştırılmasını, taşkın risklerinin azaltılmasını ve altyapının sürekliliğini sağlamaktadır. Yetersiz veya yanlış tasarlanmış menfezler, yol kaplamasında bozulmalara, göçmelere, erozyona ve ciddi güvenlik risklerine yol açabilmektedir. Menfezler; boru menfez, kutu menfez ve kemer menfez gibi farklı tiplerde, beton, çelik, taş veya tuğla malzemelerle inşa edilebilmektedir. Tasarım sürecinde yalnızca hidrolik kapasiteler değil, aynı zamanda geoteknik koşullar, iklimsel veriler, bakım kolaylığı, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler de dikkate alınmalıdır. Son yıllarda iklim değişikliğinin yol açtığı ani yağışlar ve artan taşkın riski, menfezlerin daha dayanıklı ve esnek tasarım yaklaşımlarıyla ele alınmasını zorunlu kılmıştır. Bu kapsamda ileri hidrolik modelleme yöntemleri, yenilikçi yapı malzemeleri ve ekolojik odaklı mühendislik çözümleri önem kazanmaktadır. Bu kitap bölümünde, menfezlerin yapısal özellikleri, işlevleri, tasarım kriterleri, uygulama alanları ve çağdaş mühendislik yaklaşımları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Türkiye ve dünya örnekleri üzerinden yapılan değerlendirmeler, menfezlerin yalnızca altyapı güvenliği için değil, aynı zamanda sürdürülebilir ulaşım sistemleri ve çevresel uyum açısından da kritik önemde olduğunu ortaya koymaktadır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, polat.yaliniz@dpu.edu.tr, ORCID No: 0000-0003-0373-9727

1. Giriş

Ulaştırma altyapısı, modern toplumların ekonomik, sosyal ve kültürel gelişiminin temel taşlarından biridir. Karayolu, demiryolu ve diğer ulaşım sistemleri; şehirler arası bağlantıyı güçlendirirken, aynı zamanda ticaretin ve toplumsal etkileşimin sürdürülebilirliğini sağlar. Bu altyapıların güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü olabilmesi ise yalnızca yol yüzeylerinin kalitesiyle değil, aynı zamanda drenaj ve hidrolik yapıların doğru planlanması ve uygulanmasıyla mümkündür. Bu bağlamda menfezler, ulaşım mühendisliğinde çoğunlukla göz ardı edilen ancak altyapının bütünlüğünü korumada kritik rol oynayan yapı elemanlarıdır.

Menfezler, karayolları ve demiryolları gibi ulaşım koridorlarının üzerinden geçtiği dere, su akışı veya drenaj hattı gibi doğal ya da yapay su yollarını kesintisiz bir şekilde geçişe imkân tanımak amacıyla inşa edilen hidrolik yapılardır. Görevi itibarıyla hem yol platformunun korunmasına hem de yüzeyel ve yeraltı sularının düzenli şekilde taşınmasına katkıda bulunur. Yanlış tasarlanmış ya da yetersiz kapasiteye sahip menfezler; yol gövdesinde oturma, erozyon, taşkın ve yapısal hasar gibi ciddi mühendislik problemlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle menfezlerin tasarımında, yalnızca hidrolik koşullar değil, aynı zamanda geoteknik, malzeme bilimi ve çevresel faktörler de dikkate alınmalıdır.

Ulaştırma altyapısında kullanılan menfezler; beton, taş, tuğla veya çelik gibi farklı malzemelerden imal edilebilir ve boru menfez, kutu menfez, kemer menfez gibi çeşitli tiplerde tasarlanabilir. Menfez seçimi yapılırken; drenaj kapasitesi, maliyet, bakım kolaylığı, çevresel etkiler ve yapının bulunduğu bölgenin iklim koşulları gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, sürdürülebilir ulaşım anlayışı kapsamında menfezlerin yalnızca hidrolik işlevleri değil, aynı zamanda ekosistemler üzerindeki etkileri de önem taşımaktadır. Özellikle kırsal ve doğal alanlarda yapılan menfez uygulamalarında, balık geçişlerine ve doğal yaşamın sürekliliğine olanak tanıyacak ekolojik tasarımlara yönelim artmaktadır.

Son yıllarda iklim değişikliği ile birlikte artan ani yağışlar ve taşkın riskleri, menfez tasarımlarında güvenlik katsayılarının yükseltilmesini ve daha dayanıklı çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle mühendisler; hidrolik modelleme tekniklerini, yapay zekâ destekli tasarım yöntemlerini ve yenilikçi inşaat malzemelerini kullanarak menfezlerin performansını artırmaya yönelik çalışmalar yürütmektedir.

Bu bölümde, ulaşım altyapısında menfezlerin yapısal özellikleri, farklı uygulama alanları, tasarım kriterleri ve güncel mühendislik yaklaşımları

ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Ayrıca Türkiye’de ve dünyada uygulanan menfez projelerinden örnekler verilerek, bu yapıların ulaştırma altyapısındaki stratejik önemi ortaya konulacaktır.

2. Menfezlerin Genel Tanımı ve Sınıflandırılması

Menfezler, ulaştırma altyapısında yol gövdesinin sürekliliğini sağlamak ve doğal ya da yapay akış yollarını kesintisiz biçimde geçirmek amacıyla kullanılan küçük ölçekli hidrolik yapılardır. Bu yapılar, yüzeyel ve yeraltı sularının yol gövdesine zarar vermeden taşınmasını sağlayarak taşkın risklerini azaltmakta ve altyapının hizmet ömrünü uzatmaktadır [1, 2]. Yol altyapısının en kritik unsurlarından biri olan menfezler, boyut ve fonksiyon bakımından köprülerden daha küçük yapılar olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, hidrolik ve yapısal açıdan köprülerle benzer prensiplere sahiptirler.

Menfezler; yapısal biçim, malzeme türü, hidrolik kapasite ve kullanım amacı gibi ölçütlerle göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma hem mühendislik tasarımı hem de uygulama sürecinde doğru seçimlerin yapılması açısından önem taşımaktadır.

2.1. Yapısal Biçimlerine Göre Menfezler

Menfezleri yapısal biçimlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür.

- **Boru Menfezler:** Genellikle küçük debilerin taşınmasında tercih edilir. Beton, çelik veya polietilen gibi malzemelerden üretilebilir. Düşük maliyetli ve kolay imal edilebilir olmaları avantaj iken, büyük debilerde yetersiz kalmaları dezavantajdır [3].

- **Kutu Menfezler:** Dikdörtgen kesitli yapıları sayesinde yüksek debilerin taşınmasına imkân verir. Karayolu ve demiryolu projelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzun ömürlü ve dayanıklı olmaları önemli avantajlar sunarken, yüksek maliyet ve uzun imalat süresi dezavantajdır [2].

- **Kemer Menfezler:** Estetik ve dayanıklılık özellikleriyle öne çıkan bu menfezler, taş, beton veya tuğla malzemelerden inşa edilmektedir. Karmaşık imalat süreci ve yüksek maliyetleri nedeniyle daha sınırlı uygulama alanına sahiptir [1].

2.2. Malzeme Türlerine Göre Menfezler

Menfezler malzeme türlerine göre de sınıflandırılabilmektedir.

- **Betonarme Menfezler:** Yüksek taşıma kapasitesine sahip, uzun ömürlü yapılardır. Ancak imalat süresi görece uzun olup maliyetli olabilir [4].

- **Çelik Menfezler:** Hafiflikleri ve hızlı montaj avantajları ile öne çıkar. Fakat korozyon riski nedeniyle düzenli bakım gerektirir [1].

- **Taş/Tuğla Menfezler:** Estetik değer ve yerel malzeme kullanımı avantajıdır. Ancak dayanıklılık sınırlıdır ve genellikle kırsal bölgelerde tercih edilmektedir [3].

- **Kompozit Menfezler:** Polimer esaslı malzemelerden üretilir, korozyona dayanıklı ve hafiftir. Bununla birlikte yüksek maliyetleri ve sınırlı uygulama alanları dezavantaj oluşturmaktadır [4].

2.3. Kullanım Amacına Göre Menfezler

Menfezler, kullanım amaçlarına göre de sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, menfezlerin yalnızca hidrolik işlevleriyle değil, aynı zamanda sosyal, ekolojik ve tarımsal işlevleriyle de ulaştırma altyapısında kritik roller üstlendiğini ortaya koymaktadır.

- **Yaya Geçidi Menfezleri:** Özellikle kentsel alanlarda veya yoğun trafik bölgelerinde tercih edilmektedir. Çelik veya beton malzemelerden inşa edilen bu yapılar, güvenli yaya geçişini sağlamaları bakımından avantajlıdır. Ancak küçük kesitli olmaları, kapasite sınırlaması nedeniyle dezavantaj oluşturmaktadır [2].

- **Hayvan Geçidi Menfezleri:** Ekolojik sürdürülebilirliği desteklemek amacıyla tasarlanan bu yapılar, yaban hayatının korunmasına ve ekolojik koridorların sürekliliğine katkı sağlamaktadır. Betonarme veya çelik malzemelerle inşa edilmektedir. Doğal yaşamı desteklemeleri önemli bir avantaj iken, yüksek maliyetleri dezavantaj oluşturmaktadır [1].

- **Tarımsal Su Geçiş Menfezleri:** Tarım alanlarında sulama kanallarının yollarla kesiştiği noktalarda kullanılan yapılardır. Beton veya taş malzeme ile inşa edilen bu menfezler, su akışını kolaylaştırmaları bakımından avantajlıdır. Ancak mevsimsel sınırlılıklar nedeniyle sürekli etkin olmayabilirler [3].

Kullanım amaçlarına göre yapılan bu sınıflandırma, menfezlerin fonksiyonel çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı kaynaklarda **araç geçidi menfezleri** ve **demiryolu menfezleri** de ayrıca belirtilmekte, ancak bu türler genellikle yapısal biçim veya malzeme türüne göre sınıflandırmalarla birlikte değerlendirilmektedir [1, 2].

Ayrıca, menfezlerin sınıflandırılmasında dikkate alınması gereken bir diğer ölçüt, **konum ve fonksiyonel rol farklılıklarıdır**. Karayolu ve

demiryolu menfezleri; yük taşıma kapasiteleri, trafik güvenliği açısından sahip oldukları önem ve maruz kaldıkları hidrolik koşullar bakımından farklı tasarım gereksinimlerine sahiptir. Bunun yanı sıra, kırsal alanlarda kullanılan menfezler ile kentsel bölgelerde kullanılan menfezler arasında da belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Kırsal bölgelerde genellikle doğal drenajın sürekliliği hedeflenirken, kentsel bölgelerde yağmur suyu yönetimi, altyapı yoğunluğu ve ekolojik dengeyi gözetken çözümler ön plana çıkmaktadır [2].

Öte yandan, günümüzde **sürdürülebilirlik boyutu** giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Ekolojik geçişleri desteklemek üzere tasarlanan menfezler, yalnızca suyun taşınmasını değil, aynı zamanda yaban hayatının sürekliliğini de sağlamaktadır. Özellikle ekolojik koridorlarda, balık ve küçük memeli türlerinin geçişine imkân tanıyacak şekilde düzenlenen menfezler, altyapının çevreyle uyumunu artırmaktadır [1]. Bu nedenle modern mühendislik anlayışı, menfezleri yalnızca hidrolik yapılar olarak değil, aynı zamanda ekolojik sistemin ayrılmaz parçaları olarak da değerlendirmektedir. Şekil 1.'de menfez çeşitlerine ait örnekler gösterilmiştir.

Sonuç olarak, menfezlerin doğru sınıflandırılması ve uygun tipinin seçilmesi, ulaşım altyapısının güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış tip seçimi veya yetersiz kapasite hem ekonomik kayıplara hem de altyapı hasarlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle menfez tasarım ve uygulamalarında mühendislik kriterlerine dayalı kapsamlı bir değerlendirme süreci gerekmektedir.



Şekil 1. Menfez Çeşitleri [5].

Şekil 2.de ise taş duvar destekli kutu menfez örneğine yer verilmiştir.



Şekil 2. Taş duvar destekli kutu menfez örneği [6].

3. Menfezlerin Yapısal Özellikleri

Menfezlerin yapısal özellikleri, tasarım ve uygulama sürecinde güvenlik, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik açısından dikkate alınması gereken temel parametreleri kapsamaktadır. Bu özellikler aşağıda temel başlıklar altında açıklanmaktadır:

- **Geometrik Özellikler:** Menfezin kesit geometrisi (dairesel, eliptik, dikdörtgen veya kemerli) yük dağılımı ve hidrolik kapasite üzerinde doğrudan etkilidir. Örneğin boru menfezler küçük debiler için uygunken, kutu menfezler yüksek debilerin güvenli geçişini sağlar [3]. Ayrıca, dolgu yüksekliği, yol genişliği ve akış koşulları, geometrik tasarımın belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. Yanlış seçilen kesit geometrisi hem hidrolik kapasiteyi düşürmekte hem de taşıyıcı performansı zayıflatabilmektedir [1].

- **Malzeme Dayanımı ve Uzun Ömürlülük:** Betonarme menfezler uzun ömürlü ve yüksek dayanımlı iken, çelik menfezler hızlı montaj ve hafiflik avantajına sahiptir. Taş ve tuğla menfezler daha çok estetik ve kırsal kullanım için uygundur. Kompozit malzemeler ise korozyon direnci ve düşük bakım ihtiyacı ile öne çıkmaktadır [4]. Bununla birlikte, malzeme

seçiminde yalnızca mekanik dayanım değil, aynı zamanda iklim koşullarına uyum, yerel malzeme temini ve ekonomik sürdürülebilirlik de göz önünde bulundurulmalıdır.

- **Yük Aktarım Mekanizmaları:** Menfezler, trafik yüklerini ve dolgu ağırlığını temel zemine aktarır. Boru menfezlerde yük transferi çevre dolgular aracılığıyla gerçekleşirken, kutu menfezlerde duvar ve döşeme elemanları ana taşıyıcı rol üstlenir [2]. Temel zeminin taşıma gücü, oturma davranışları ve drenaj özellikleri, yük aktarımının güvenliği açısından belirleyici olmaktadır. Bu nedenle tasarım sürecinde geoteknik analizler ve zemin iyileştirme yöntemleri büyük önem taşımaktadır.

- **Dayanıklılık ve Bakım Gereksinimleri:** Betonarme yapılarda donatı korozyonu, çelik yapılarda ise yüzey paslanması kritik bakım sorunlarıdır. Uygun kaplama, drenaj sistemleri ve düzenli bakım, yapının ömrünü uzatır [1]. Ayrıca, menfezlerin periyodik denetimlerle kontrol edilmesi, tıkanıklıkların önlenmesi ve aşırı yüklenmelerin engellenmesi bakım yönetimi açısından zorunludur. Bakımın ihmal edilmesi, menfezin hidrolik ve yapısal kapasitesini kısa sürede düşürebilmektedir.

- **Sürdürülebilirlik Boyutu:** Günümüzde menfezlerin yapısal özellikleri yalnızca yük taşıma kapasitesi açısından değil, aynı zamanda çevresel uyum açısından da değerlendirilir. Ekolojik geçişleri destekleyen, uzun ömürlü ve düşük bakım gerektiren çözümler sürdürülebilir mühendislik için tercih edilmektedir [3]. Bununla birlikte, karbon ayak izini azaltan malzeme kullanımı, geri dönüştürülebilir bileşenlerin tercih edilmesi ve doğal yaşam koridorlarını destekleyen tasarımlar, modern menfez mühendisliğinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

4. Tasarım İlkeleri

Menfezlerin tasarım süreci, mühendislik güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel uyum ilkeleri çerçevesinde şekillenmektedir. Bu kapsamda dikkate alınması gereken temel ilkeler aşağıda verilmiştir:

- **Hidrolik Kapasite ve Taşkın Güvenliği:** Menfez tasarımında beklenen maksimum debi, taşkın periyotları ve iklim değişikliğine bağlı ani yağış riskleri dikkate alınmalıdır. Hidrolik hesaplar güvenlik katsayıları ile desteklenmeli, kapasite yetersizliği ihtimaline karşı ek drenaj çözümleri planlanmalıdır [1, 4].

- **Yük Taşıma ve Yapısal Güvenlik:** Menfezler hem trafik yüklerini hem de dolgu ağırlığını güvenli şekilde zemine aktarmalıdır. Bu nedenle yük

kombinasyonları ulusal ve uluslararası standartlara göre belirlenmeli, zemin-yapı etkileşimi göz ardı edilmemelidir [2, 3].

- **Geoteknik Koşulların Analizi:** Zemin taşıma gücü, oturma potansiyeli, erozyon riski ve drenaj özellikleri ayrıntılı olarak incelenmelidir. Gerekli hallerde zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmalı ve özellikle yüksek dolgu altında çalışan menfezlerde oturma kontrolü sağlanmalıdır [1].

- **Malzeme Seçimi ve Uzun Ömür:** Betonarme, çelik, taş/tuğla ve kompozit menfezlerin avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak, proje koşullarına en uygun malzeme seçilmelidir. Dayanıklılık, bakım ihtiyacı ve çevresel etkilere direnç, seçim kriterleri arasında öncelikli olmalıdır [4].

- **Bakım ve İşletme Kolaylığı:** Menfez tasarımında, yapının periyodik kontrol ve temizliğe elverişli olması gerekir. Tıkanıklıkları önleyecek detay çözümleri, erişim kolaylığı ve düşük bakım maliyeti, uzun vadeli performans için önemlidir [2].

- **Çevresel ve Ekolojik Uyum:** Modern mühendislik yaklaşımı, menfezleri yalnızca hidrolik elemanlar değil, aynı zamanda ekosistemin bir parçası olarak değerlendirmektedir. Bu nedenle balık geçidi açıklıkları, yaban hayatı koridorları ve ekolojik tasarımlar, menfez projelerinde öncelikli hale gelmektedir [3].

- **Sürdürülebilirlik ve İklim Adaptasyonu:** Günümüzde menfez tasarımlarında yalnızca mevcut koşullar değil, gelecekteki iklim değişiklikleri de dikkate alınmalıdır. Karbon ayak izini azaltan malzemeler, geri dönüştürülebilir çözümler ve dayanıklı altyapı yaklaşımları, sürdürülebilir tasarım ilkeleri kapsamında ele alınmalıdır [1].

4.1. İklim Değişikliğinin Menfez Tasarımına Etkileri

İklim değişikliğine bağlı olarak artan taşkın riski, kısa süreli fakat şiddetli yağışların artışı ve sıcaklık dalgalanmaları, menfez tasarımlarında yeni parametrelerin dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır. Geleneksel olarak geçmiş yağış ve debi verilerine dayalı hesap yöntemleri, gelecekteki iklim koşullarını yeterince temsil etmemektedir.

- **Hidrolik Kapasite:** Ani ve yüksek şiddetli yağışların artışı, menfezlerin mevcut kapasitelerinin yetersiz kalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle tasarımda daha yüksek güvenlik katsayıları ve iklim senaryolarına dayalı hidrolojik modelleme yöntemleri kullanılmalıdır [7, 4].

- **Malzeme Dayanıklılığı:** Donma-çözülme döngülerindeki artış, betonarme yapılarda çatlak oluşumunu ve donatı korozyonunu hızlandırırken, çelik menfezlerde korozyon riskini artırmaktadır [1].

- **Uyarlanabilir Tasarım:** Gelecekteki belirsizlikler nedeniyle, modüler ve kapasitesi artırılabilir menfez sistemleri tercih edilmelidir. Ayrıca doğal taşkın yatakları korunmalı ve ekolojik geçişlere imkân tanıyan geniş açıklıklı çözümler öncelikli hale getirilmelidir [3].

İklim değişikliği menfez tasarımlarını yalnızca hidrolik açıdan değil, aynı zamanda malzeme seçimi, bakım gereksinimleri ve sürdürülebilirlik boyutlarıyla da etkilemektedir. Bu nedenle modern menfez tasarımlarında iklim değişikliği parametreleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

5. İnşaat ve Uygulama Süreçleri

Menfezlerin inşaat süreci, tasarım aşamasında belirlenen kriterlerin sahada doğru uygulanması ile doğrudan ilişkilidir. Başarılı bir uygulama için hem yapısal güvenlik hem de hidrolik performans açısından disiplinler arası bir yaklaşım benimsenmelidir.

Öncelikle, **şantiye hazırlığı** kapsamında suyun geçici olarak yönlendirilmesi, trafik güvenliğinin sağlanması ve iş güvenliği önlemlerinin alınması gerekir. **Kazı çalışmaları** sırasında, zemin stabilitesinin korunması ve taban seviyesinin doğru kotta açılması önemlidir. **Temel hazırlığı**, menfezin uzun dönemli dayanıklılığını doğrudan etkiler; zayıf zeminlerde iyileştirme teknikleri (örneğin, taş kolon, zemin enjeksiyonu) uygulanabilir.

Kalıp yerleştirilmesi ve beton dökümü aşamalarında, betonun segregasyonunu önlemek için uygun yerleştirme yöntemleri kullanılmalı, kür süreci titizlikle yürütülmelidir. Betonarme menfezlerde, donatı yerleşiminin projedeki detaylara uygun olması, çatlak ve korozyon risklerini azaltır. **Çelik menfezlerde** ise, kaynak kalitesi, bağlantı elemanlarının mukavemeti ve korozyon koruması kritik öneme sahiptir. Bu tür yapılarda galvanizleme ve boyama gibi önlemler, uzun dönemli performans açısından zorunludur.

İnşaat sürecinde **çevresel faktörler** de dikkate alınmalıdır. Özellikle dere yataklarında yapılan uygulamalarda, doğal akış rejiminin korunması, sucul ekosistemlerin zarar görmemesi ve sediman taşınımının kontrolü önemlidir. Ayrıca, yerel iş gücünün kullanımı ve malzeme temininde sürdürülebilirlik kriterlerinin gözetilmesi, projelerin ekonomik ve çevresel faydasını artırmaktadır.

Son aşamada, menfezin hizmete alınmadan önce **yükleme testleri**, **hidrolik performans kontrolleri** ve **kalite denetimleri** yapılmalı; inşaat

süreci tüm yönleriyle kayıt altına alınmalıdır. Bu yaklaşım, yalnızca yapının güvenliğini garanti altına almakla kalmaz, aynı zamanda bakım ve onarım aşamalarında referans oluşturur [1, 2].

6. Performans, Bakım ve Onarım

Menfezlerin uzun dönemli performansı, yalnızca tasarım kalitesine değil, düzenli bakım ve periyodik kontrollerin yapılmasına da bağlıdır. Dayanıklı bir tasarım, yetersiz bakım koşullarında kısa sürede işlevini kaybedebilir. Bu nedenle bakım, menfezlerin hizmet ömrünü uzatan en önemli unsurlardan biridir.

Performansın izlenmesi, menfezlerin hidrolik ve yapısal kapasitesinin belirli periyotlarla değerlendirilmesini gerektirir. Özellikle yoğun yağış sonrası yapılan kontroller, tıkanıklıkların ve yapısal hasarların erken tespitinde kritik rol oynar. Betonarme yapılarda donatı korozyonu ve çatlak oluşumu, çelik menfezlerde ise korozyon, kesit kaybı ve deformasyon en sık karşılaşılan problemler arasındadır [1].

Bakım uygulamaları, menfezlerin açıklıklarının temizlenmesi, sediment ve bitki birikimlerinin uzaklaştırılması, giriş-çıkış bölgelerinin kontrolü ve yüzey kaplamalarının yenilenmesi gibi işlemleri kapsar. Ayrıca, menfez çevresindeki şev stabilitesi ve erozyon riski de düzenli olarak takip edilmelidir. Özellikle dere yataklarındaki menfezlerde, balık geçitlerinin ve ekolojik açıklıkların işlevselliği korunmalıdır.

Onarım teknikleri, menfezin hasar derecesine göre farklılık göstermektedir. Betonarme yapılarda enjeksiyon, çatlak onarımı, kaplama yenileme ve güçlendirme çözümleri uygulanabilirken; çelik yapılarda galvanizleme, yüzey kaplamalarının yenilenmesi ve eleman değişimi öne çıkmaktadır. Bazı durumlarda menfezin hizmet ömrünü uzatmak amacıyla güçlendirme projeleri yapılmakta, taşıyıcı kapasite artırılmaktadır [3].

Modern yaklaşımlar, ilk yatırım maliyetinden ziyade, bakım ve işletme giderleriyle birlikte menfezin toplam ömrü boyunca ekonomik verimliliğini dikkate alır [4].

Sonuç olarak, menfezlerin performansı yalnızca mühendislik güvenliği için değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik için de kritik öneme sahiptir. Düzenli bakım ve uygun onarım teknikleri, altyapı güvenliğini garanti altına alırken kamu kaynaklarının etkin kullanılmasına da katkı sağlamaktadır.

7. Sonuç ve Öneriler

Menfezler, ulaştırma altyapısının sürekliliğini ve güvenliğini sağlayan temel mühendislik yapılarıdır. Bu çalışmada menfezlerin yapısal özellikleri, tasarım ilkeleri, inşaat ve uygulama süreçleri ile performans, bakım ve onarım boyutları incelenmiştir. Elde edilen değerlendirmeler, menfezlerin yalnızca hidrolik birer çözüm değil, aynı zamanda çevresel, yapısal ve sürdürülebilirlik açısından da çok yönlü ele alınması gereken yapılar olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuçlar göstermektedir ki, menfez tasarım ve uygulamalarında en kritik unsurlar; doğru **hidrolik kapasite hesapları**, güvenilir **yapısal tasarım**, uygun **malzeme seçimi**, düzenli **bakım ve denetim süreçleri** ile **çevresel uyum** kriterleridir. Bu unsurların ihmal edilmesi, altyapı güvenliğini tehlikeye atmakta, ekonomik kayıplara ve çevresel zararlara yol açabilmektedir.

Bu bağlamda öne çıkan öneriler şunlardır:

- Menfez tasarımı, **iklim değişikliği** ve artan taşkın riskleri dikkate alınarak geleceğe dönük esnek çözümlerle yapılmalıdır.
- **Yaşam döngüsü maliyet analizi** benimsenmeli; sadece ilk yatırım değil, bakım ve işletme giderleri de karar süreçlerine dahil edilmelidir.
- Betonarme ve çelik menfezlerde **korozyon önleyici önlemler** standart hale getirilmeli; kompozit gibi alternatif malzemelerin kullanımı teşvik edilmelidir.
- Menfezlerin çevresel etkileri göz önünde bulundurulmalı; **ekolojik geçişleri destekleyen** tasarımlar yaygınlaştırılmalıdır.
- **Periyodik denetim ve bakım** mekanizmaları yasal çerçevede güçlendirilmeli ve bu süreçler düzenli raporlama ile şeffaf hale getirilmelidir.
- Üniversiteler, kamu kurumları ve özel sektör arasında **iş birliği** artırılarak menfez tasarımı ve uygulamalarında yenilikçi çözümler geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, menfezler yalnızca ulaştırma altyapısının bir unsuru değil, aynı zamanda mühendislik güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal refahın ayrılmaz bir parçasıdır. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalar, menfezlerin tasarım, inşaat ve bakım süreçlerini bütüncül bir perspektiften ele almalı; mühendislik çözümlerini çevresel ve sosyal boyutlarla entegre etmelidir.

Kaynaklar

- [1] Federal Highway Administration (FHWA). (2012). Culvert design manual. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
- [2] Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). (2013). Karayolu drenaj yapıları teknik şartnamesi. Ankara: KGM Yayınları.
- [3] Çetin, A., & Ekinci, C. (2019). Menfez yapılarının tasarım ve uygulama esasları. İnşaat Mühendisliği Dergisi, 31(2), 45–58.
- [4] Mays, L. W. (2010). Water resources engineering (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [5] İnşaat Hesabı. (t.y.). Menfez nedir? 15 Eylül 2025 tarihinde <https://insaat-hesabi.com/sozluk/kelime/menfez-nedir/> adresinden erişildi.
- [6] Volkan Atabey İnşaat. (t.y.). Menfez uygulamaları. 15 Eylül 2025 tarihinde <https://volkanatabey.com.tr/menfez-uygulamalari/> adresinden erişildi.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press.

Kent İçi Derin Kazılarda İksa Uygulamalarının Değerlendirilmesi: Bir Vaka Çalışması

Ersin Güler¹

Özet

Kentsel alanlarda artan yapılaşma ihtiyacı, özellikle yoğun nüfuslu şehir merkezlerinde derin kazıların güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Derin kazılar, sadece planlanan yapının güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevredeki mevcut yapıların ve altyapı elemanlarının stabilitesini de doğrudan etkiler. Bu bağlamda, iksa sistemleri, kazı sırasında oluşabilecek toprak deformasyonlarını kontrol etmek ve çevresel riskleri minimize etmek açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, İstanbul ilinde yer alan bir projede gerçekleştirilen iksa uygulaması detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan iksa sistemi, zemin özellikleri, kazı derinliği ve çevresel kısıtlamalar dikkate alınarak tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında sayısal analiz yöntemleri (Plaxis 2D) kullanılmıştır. Analizler, iksa sisteminin yatay deplasmanları, iç kuvvet dağılımları ve stabilite koşulları açısından güvenli ve yeterli olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, iksa tasarımının hem ekonomik hem de teknik açıdan uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, benzer zemin koşullarında uygulanacak derin kazılar için önemli bir referans teşkil etmekte olup, hem mühendislik uygulamalarına hem de saha-tasarım entegrasyonuna yönelik yol gösterici çıkarımlar sunmaktadır.

1. Giriş

Kentleşmenin hızla arttığı günümüzde, özellikle büyük şehirlerde yeni yapılaşmaların temel inşaatları sıklıkla derin kazılar gerektirmektedir. Derin kazılar, sadece planlanan yapının güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevredeki mevcut yapıların, altyapı elemanlarının ve zemin koşullarının da stabilitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle, kazı sırasında oluşabilecek toprak deformasyonları, yan duvar basınçları ve olası göçme

1 Dr.Öğr.Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, eguler@ogu.edu.tr, 0000-0002-5679-8838

riskleri gibi faktörlerin önceden öngörülmesi ve gerekli önlemlerin alınması hayati öneme sahiptir [1-3].

İksa sistemleri, derin kazılarda zemin stabilitesini sağlayan temel mühendislik uygulamalarından biridir. Kullanılan iksa tipleri, kazı derinliği, zemin özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yaygın olarak kullanılan sistemler arasında çelik kazıklar, ankrajlı veya ankrajsız perde duvarlar, çelik veya betonarme kombinasyonlar ve geçici destek elemanları yer almaktadır [4-5]. İksa sistemlerinin tasarımında, yatay ve düşey yüklerin dağılımı, zemin-iksas etkileşimi, kazı sırasında oluşabilecek deplasmanlar ve çevresel faktörler dikkate alınmaktadır. Bu nedenle, saha gözlemleri ve sayısal analizler, iksa sistemlerinin performansını anlamada kritik bir rol oynamaktadır [6-7].

Son yıllarda, geoteknik mühendisliğinde sayısal analiz yöntemlerinin kullanımı, iksa tasarımının doğruluğunu artırmak için önemli bir araç haline gelmiştir. Plaxis, FLAC ve benzeri sonlu eleman programları, zemin-iksas etkileşimini detaylı bir şekilde modelleyerek olası sorunları önceden öngörme imkânı sağlamaktadır [8]. Bununla birlikte, saha gözlemleri ve ölçümler, sayısal analizlerin doğruluğunu doğrulamak ve gerçek zemin davranışını değerlendirmek için vazgeçilmezdir. Zemin heterojenliği, su seviyesi değişimleri ve yapısal yüklerin dağılımı gibi faktörler, sadece saha deneyleri ve gözlemler ile değerlendirilebilir.

Bu çalışma, İstanbul ilinde gerçekleştirilen bir derin kazı ve iksa uygulamasını ele almaktadır. Çalışmanın temel amacı, iksa sisteminin performansını sayısal analizler ile değerlendirmek, elde edilen bulgular üzerinden tasarım parametrelerinin optimizasyonuna katkı sağlamaktır. Ayrıca, derin kazılarda güvenlik, ekonomik verimlilik ve çevresel etkiler açısından uygulanabilecek öneriler sunulması hedeflenmektedir [9].

2. İksa Sistemlerinin Tarihçesi

İksa sistemlerinin kullanımı, insanlık tarihinin yapı inşaatı ile ilgili erken dönemlerine kadar uzanmaktadır. İlk iksa uygulamaları, genellikle geçici destekler veya basit kazıklar şeklinde olup, zemin ve yapı güvenliğini sağlamak amacıyla taş ve ahşap malzemelerle gerçekleştirilmiştir. Antik Roma döneminde, su kanalları ve yer altı yapıları inşa edilirken kazı duvarlarının stabilitesini sağlamak için taş ve ahşap destekler yaygın olarak kullanılmıştır. Orta Çağ'da özellikle şehir merkezlerinde derin temel kazıları sırasında ahşap kazık ve basit çerçeve sistemler tercih edilmiştir. Sanayi Devrimi ile birlikte, çelik ve betonarme malzemelerin yaygınlaşması, iksa sistemlerinde modernleşme sürecini başlatmıştır. 19. yüzyılın sonları ve

20. yüzyılın başlarında, özellikle Avrupa ve Amerika'da yeraltı metro sistemleri, köprü temelleri ve derin kazılar için ankrajlı ve perde duvarlı iksa sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu dönemde yapılan çalışmalar, zemin basınçlarının analitik olarak hesaplanmasına ve iksa elemanlarının boyutlandırılmasına yönelik mühendislik ilkelerinin temelini oluşturmuştur [10-11].

Türkiye'de iksa uygulamaları özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren yaygınlaşmıştır. İstanbul, Ankara ve İzmir gibi büyük şehirlerde artan yapılaşma ve altyapı projeleri, derin kazıların güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini zorunlu kılmıştır. 1980'lerden sonra inşaat sektöründe ankrajlı perde duvarlar, çelik kazıklar ve geçici destek sistemleri modern mühendislik yaklaşımları ile uygulanmaya başlanmıştır. Özellikle İstanbul metrosu, köprü ayakları ve yoğun kentsel alanlardaki inşaat projeleri, Türkiye'de iksa sistemlerinin saha uygulamaları açısından önemli bir deneyim kaynağı oluşturmıştır [12].

Modern iksa uygulamaları, yalnızca kazı güvenliğini sağlamakla kalmaz; çevresel etkileri minimize eder, ekonomik verimliliği artırır ve sürdürülebilir mühendislik uygulamalarına katkıda bulunur. Son yıllarda Türkiye'de gerçekleştirilen birçok kentsel metro ve altyapı projesinde bu sayısal yöntemler ve modern iksa sistemleri başarıyla entegre edilmiştir [13]. İksa sistemlerinin hem malzeme hem de tasarım açısından geçirdiği evrimi ve günümüzdeki modern mühendislik yaklaşımlarını göstermektedir. Türkiye'deki uygulamalar, hem saha deneyimlerini hem de akademik araştırmaları birleştirerek gelecekteki projeler için önemli bir referans oluşturmaktadır.

3. Derin Kazılarda İksa Sistemleri

İstanbul, yoğun nüfusu, karmaşık ulaşım ağı ve tarihi dokusuyla Türkiye'de derin kazıların en sık gerçekleştirildiği kentlerin başında gelmektedir. Özellikle metro hatları, karayolu tünelleri, altyapı tesisleri ve yüksek yapı projeleri kapsamında yapılan kazılar, çevredeki mevcut yapıların ve tarihi eserlerin korunmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, İstanbul'da derin kazılar sırasında iksa sistemlerinin doğru seçimi ve güvenli tasarımı büyük önem taşımaktadır. Yeni yapılaşmalar sonucunda kot farkları nedeniyle derin kazılar meydana gelmekte (Şekil 1) veya iksa sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [14].



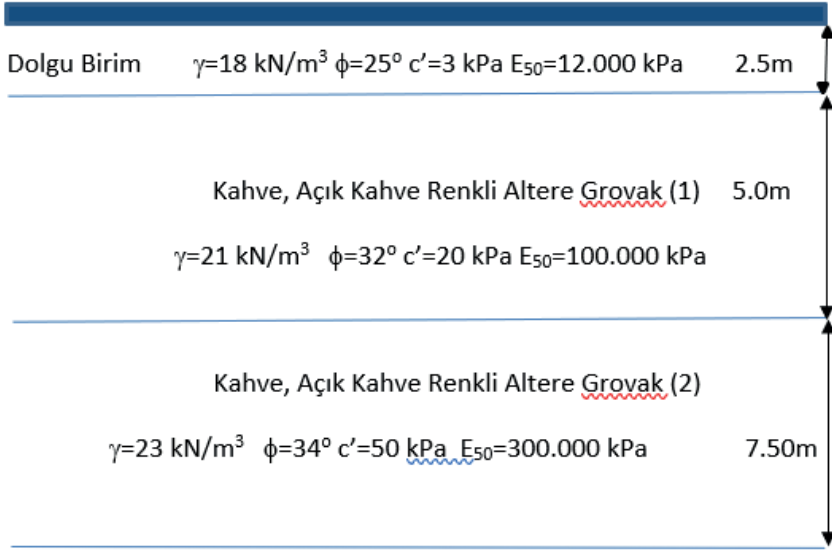
Şekil 1. Derin kazılar ve kot farkı

Şehrin jeolojik yapısı, farklı bölgelerde değişken zemin özellikleri göstermekte; bazı bölgelerde alüvyal zeminler, bazı bölgelerde ise sert kayalar bulunabilmektedir. Bu çeşitlilik, iksa sistemlerinin tasarımında farklı mühendislik çözümleri gerektirmektedir. Son yıllarda İstanbul'daki projelerde ankrajlı perde duvarlar, diyafram duvarlar, mini kazıklar ve çelik iksa sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, Plaxis gibi sayısal analiz yazılımları ile saha gözlemlerinin birlikte değerlendirilmesi, hem güvenliğin hem de ekonomik verimliliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda İstanbul, iksa sistemleri uygulamaları açısından Türkiye'de en fazla mühendislik deneyiminin biriktiği şehir olarak öne çıkmaktadır [15].

4. İksa Analizi ve Değerlendirmesi

İstanbul ili sınırları içerisinde yer alan bir projede saha analizi yapılmış ve iksa gereksinimi değerlendirilmiştir. Temel kazısı esnasında çevre yapıların ve yolun etki durumu incelendiğinde stabilitenin sağlanması amacıyla iksa sistemlerinin yapılması gerekmektedir. Yapılacak olan kazı sonucunda H:12.00m seviyelerine ulaşmaktadır. Bölgenin iadelize edilmiş zemin profil bilgileri Şekil 2'de gösterilmiştir.

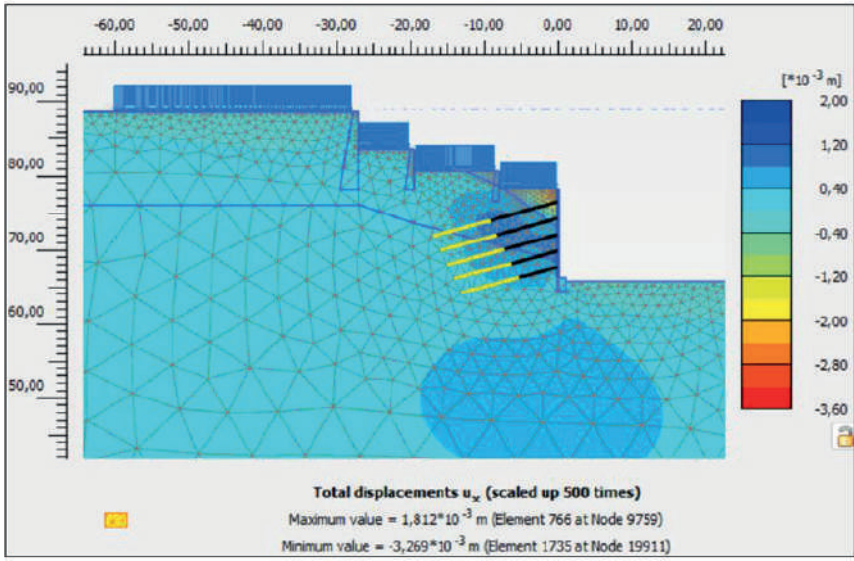
Yapılan analizlere göre kritik kesit belirlenmiştir. Bu kesit üzerinde gerekli sayısal analizler yapılarak iksa sisteminin stabilitesi kontrol edilmiş ve elemanlar boyutlandırılarak gerekli betonarme hesapları yapılmıştır.



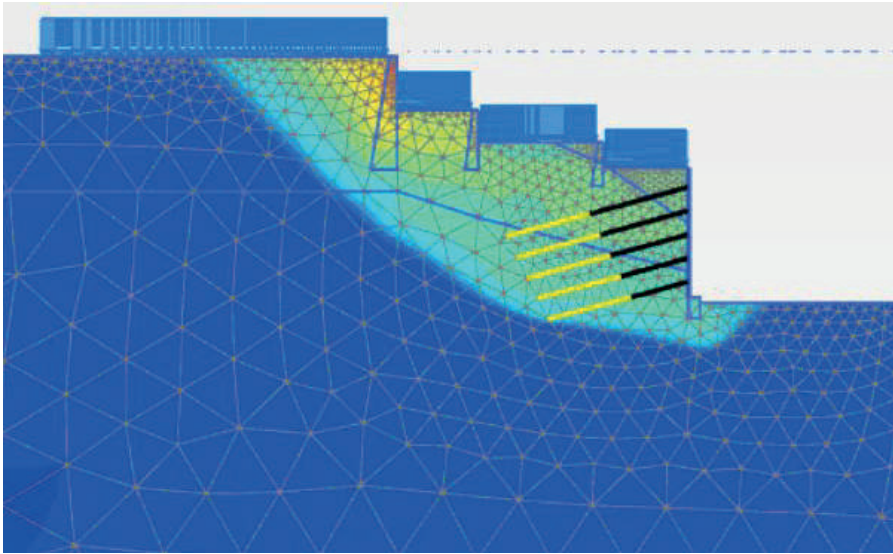
Şekil 2. Bölgenin idealize edilen zemin profili

Çalışmada Plaxis 2D programı kullanılmıştır. Bölgenin kritik kesiti programa tanıtılmış ardından da zemin profil bilgileri tanıtılmıştır. Öngermeli ankraj destekli betonarme kuyu perde uygulaması yapılmış ve yol yükü 15 kPa ve park yükü olarak 15 kPa olarak alınmıştır. Öngermeli ankraj destekli betonarme kuyu perde tasarımı yapılmıştır.

Kritik kesit üzerinde nihai kazı için beklenen yanal deplasmanlar elde edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Özellikle iksa bölgesindeki deplasman değerleri incelendiğinde gerekli güvenli bölgede kaldığı görülmektedir. Ayrıca statik durum güvenliği Şekil 4'te incelendiğinde ise $2.24 > 1.35$ olarak belirlenmiş ve güvenli olduğu görülmüştür.

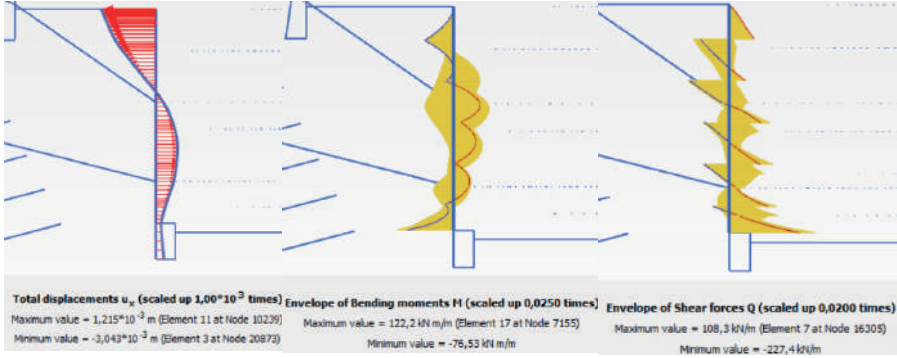


Şekil 3. Nihai kazı sonrasında beklenen yanıl deplasmanlar



ΣM_{Weight}	1,000
ΣM_{sf}	2,242
End time	0,000

Şekil 4. Statik durum analiz sonucu



Şekil 5. Statik durum perde üzerindeki kesit tesirleri ve deplasman değerleri

5. Sonuçlar

Kentsel alanlarda artan yapılaşma ihtiyacı, derin kazıların güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu süreçte kullanılan iksa sistemleri, yalnızca kazı güvenliğini sağlamakla kalmayıp çevredeki mevcut yapıların ve altyapıların korunması açısından da kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada ele alınan İstanbul ilindeki bir projede gerçekleştirilen iksa uygulaması, tasarım parametreleri, sayısal analizler üzerinden değerlendirilmiştir.

Analizler sonucunda, kullanılan iksa sisteminin yatay deplasmanları kontrol altında tuttuğu, iç kuvvet dağılımlarının güvenli sınırlar içerisinde kaldığı ve stabilite koşullarının sağlandığı görülmüştür. Bu bulgular, iksa sisteminin hem mühendislik güvenliği hem de ekonomik açıdan uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, benzer zemin koşullarında gerçekleştirilecek projeler için yol gösterici nitelikte olup, iksa tasarımında saha verilerinin ve sayısal analizlerin birlikte kullanılmasının önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, çevresel etkilerin azaltılması ve maliyet etkinliği açısından da iksa sistemlerinin doğru seçiminin ve tasarımının kritik olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kaynaklar

- Yu, P., Shen, Y., & Ren, Y. (2022). Long-term performance of a deep excavation in silty clay in Xi'an — A case study. *Buildings*, 12(11), 1952. <https://doi.org/10.3390/buildings12111952>
- Zhang, L., Zhang, W., Wang, Z., Liu, S., & Liu, K. (2023). Instability risk assessment for deep excavation of soil-rock combinations containing groundwater. *Applied Sciences*, 13(23), 12887. <https://doi.org/10.3390/app132312887>
- Maher, T., Basha, A. M., Abo-Raya, M. M., & Zakaria, M. H. (2022). General deformation behavior of deep excavation support systems: A review. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 10(01), 039-057.
- Zhao, W. (2018). A numerical study on the influence of anchorage failure for deep excavation in sandy soils. *Journal of Geotechnical & Geological Engineering*. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814018756775>
- Yang, Q. R. et al. (2024). Influence of a flexible retaining wall on performance of an adjacent deep excavation through numerical modeling. *Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0762-x>
- Vural, U., Işık, N.S. (2019). Ankrajlı İksalarda Analiz Sonuçlarının Saha Deneyleri ile Karşılaştırılması. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2(1).
- Wang, G., Deng, F., Ren, K., Fang, Y., & Xu, H. (2025). Finite Element Analysis of the Excavation Stability of Deep and Large Ventilation Shafts of Zimuyan Tunnel Using the Raise Boring Machine Method in a Karst Area. *Buildings*, 15(2), 287. <https://doi.org/10.3390/buildings15020287>
- Wu, C.-Y., & Hsu, C.-F. (2023). Establishment of Localized Utilization Parameters for Numerical Simulation Analysis Applied to Deep Excavations. *Applied Sciences*, 13(18), 10127. <https://doi.org/10.3390/app131810127>
- Oser C & Sargın S (2022). Cantilever piles or well foundations in supporting temporary deep excavations: comparison of performance, safety and cost. *Turkish Journal of Engineering*, 6(2), 140-148
- Özbek, B. S. (2009), Ankraj Destekli Derin İksalarda Deformasyonların İncelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bowles, J. E. (1998). *Foundation Analysis and Design*, McGraw Hill, Singapore.
- Ük, M. (2009), Derin Kazılar ve Derin Kazılara Bir Örnek: Flame Towers Projesi İksa Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Dayıoğlu, M. (2010). Derin Kazıların İncelenmesi ve Derin Kazı Uygulaması Üzerine Bir Örnek: Harbiye Kongre Merkezi Derin Temel Kazısı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul, 2010.

- Koyuncu, S. (2006). Derin Kazı Problemlerinde Betonarme Perde ve Mini kazık Analizi, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul.
- ÜK, M. (2009). Derin Kazılar ve Derin Kazılara Bir Örnek: Flame Towers Projesi İksa Sistemi, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul.

İnşaat Mühendisliği Alanında Güncel Yaklaşım ve Değerlendirmeler

Editör:

Doç. Dr. Evren SEYREK