
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YAPI SEKTÖRÜNDE İKİNCİL ÇELİĞİN ATIK YÖNETİMİ ÇERÇEVESİNDE İNCELENMESİ

Ahsen UZUNLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahsen UZUNLU

19/06/2025

YAPI SEKTÖRÜNDE İKİNCİL ÇELİĞİN ATIK YÖNETİMİ ÇERÇEVESİNDE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahsen UZUNLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Türkiye'de sık yaşanan depremler, yalnızca can ve mal kayıplarına değil, aynı zamanda büyük miktarda inşaat atığı oluşumuna ve ciddi kaynak israfına yol açmakta; bu durum çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sorunlar doğurmaktadır. Bu afetler sonucunda ortaya çıkan yıkıntılar, yapı sektöründe geleneksel üretim ve tüketim kalıplarının sorgulanmasına neden olmakta, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu yeni yaklaşımların benimsenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu noktada, döngüsel ekonomi yaklaşımı ön plana çıkmakta; malzemelerin ömrünü uzatmayı, atıkları azaltmayı ve yapı bileşenlerini yeniden kullanıma kazandırarak kaynakların etkin yönetimini hedeflemektedir. Yapı sektöründe bu dönüşümün sağlanabilmesi için uzun ömürlü, sökülebilir ve tekrar değerlendirilebilir malzeme sistemlerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda çelik yapılar; dayanıklılıkları, yüksek geri dönüşüm oranları, modüler yapıları ve eritilmeden doğrudan ikinci el olarak kullanılabilme potansiyelleri sayesinde hem kaynak korunumunu desteklemekte hem de atık üretimini azaltarak çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Özellikle çelik yapı elemanlarının yeniden üretime sokulmadan, fiziksel niteliklerini koruyarak başka projelerde değerlendirilmesi, döngüsel ekonomi ilkeleriyle birebir örtüşen düşük maliyetli ve çevre dostu bir çözümdür. Avrupa ve Kuzey Amerika gibi bölgelerde, çelik bileşenlerin söküm aşamasından itibaren malzeme kimliğiyle izlenebilir hale getirildiği, mekanik özellikleri, boyutları ve üretici bilgileriyle belgelenerek ikinci el pazarında dolaşıma sokulduğu örnekler yaygınlaşmaktadır. Bu tür uygulamalar, geleneksel "al–yap–at" modelinden uzaklaşarak sürdürülebilir yapı üretimi için döngüsel stratejilerin nasıl işler hale getirilebileceğine dair somut örnekler sunmaktadır. Bu çalışma, çelik yapı elemanlarının ikinci el kullanım potansiyelini ortaya koymayı; döngüsel ekonomi yaklaşımı doğrultusunda sürdürülebilir atık yönetimine olan katkılarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Bilim Kodu	:	80130
Anahtar Kelimeler	:	Yapı sektörü, ikincil çelik, yapısal atık, atık yönetimi, kaynak korunumu, ikincil çelik pazarı
Sayfa Adedi	:	106
Danışman	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

ANALYSIS OF SECONDARY STEEL IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY WITHIN THE CONTEXT OF WASTE MANAGEMENT

(M. Sc. Thesis)

Ahsen UZUNLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

Frequent earthquakes in Turkey not only cause loss of life and property, but also create large amounts of construction waste and serious waste of resources; this situation creates important problems in terms of environmental sustainability. The debris resulting from these disasters causes traditional production and consumption patterns in the construction sector to be questioned, and necessitates the adoption of new approaches compatible with sustainable development goals. At this point, the circular economy approach comes to the fore; it aims to extend the life of materials, reduce waste and reuse building components, thus ensuring effective management of resources. In order to achieve this transformation in the construction sector, long-lasting, demountable and recyclable material systems should be preferred. In this context, steel structures; thanks to their durability, high recycling rates, modular structures and the potential to be used directly as second-hand without melting, both support resource conservation and contribute to the reduction of environmental impacts by reducing waste production. In particular, the use of steel construction elements in other projects without re-production, preserving their physical qualities, is a low-cost and environmentally friendly solution that fully complies with the principles of the circular economy. In regions such as Europe and North America, examples of steel components being made traceable with their material identity from the dismantling stage onwards, documented with their mechanical properties, dimensions and manufacturer information and put into circulation on the second-hand market are becoming widespread. Such practices provide concrete examples of how circular strategies can be put into practice for sustainable building production, moving away from the traditional “take-make-throw-away” model. This study aims to reveal the second-hand use potential of steel structural elements and to evaluate their contribution to sustainable waste management in line with the circular economy approach.

Science Code	:	80130
Key Words	:	Construction industry, secondary steel, structural waste, waste management, resource conservation, secondary steel market
Page Number	:	106
Supervisor	:	Prof. Dr. Figen BEYHAN

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma sürecinde bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Figen BEYHAN 'a, akademik rehberliği ve yol göstericiliği için en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikiminden yararlandığım Gazi Üniversitesi Mimarlık Anabilim Dalı'ndaki tüm öğretim üyelerine ve araştırma görevlilerine, katkıları ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim. Çalışmam süresince mesleki gelişimime katkı sağlayan, aynı zamanda fikir alışverişlerinde bulunma şansı bulduğum Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM)'ndeki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Özellikle desteği, anlayışı ve teşvik edici tutumuyla yanımda olan değerli müdürüm Çağla Yeğnidemir'e ayrıca teşekkür ederim. Tez sürecimde manevi desteğini her zaman hissettiren sevgili aileme ve arkadaşlarıma, sabırları, anlayışları ve cesaretlendirici varlıkları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiv

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xvi

1. GİRİŞ 1

2. YAPI VE ÇEVRESEL ETKİ 7

2.1. Kaynak Tüketimi ve Korunumu 7

2.2. Çevresel Etki 9

2.3. Yapısal Ömür 11

2.4. Yapı Malzemelerinin Yapısal Ömür Sürecinde Değerlendirilmesi 12

2.4.1. Çelik 12

2.4.2. Taş ve tuğla 13

2.4.3. Ahşap 14

2.4.4. Beton 15

2.5. Yapı Analizi 16

2.6. Yapısal Atık Kavramı 17

2.7. Yapısal Atık Yönetilme Metotları 18

2.7.1. Yapısal atıkların sınıflandırılması 19

2.7.2. Yapısal atıkların belirlenmesi 19

2.7.3. Yapısal atıkların tasnif edilmesi 20

2.7.4. Yapısal atıkların geri dönüşüm olarak karşılaştırılması 20

Sayfa

2.7.5. Yapı söküm ve yıkım kararları 22
2.7.6. Çalışma ekiplerinin belirlenmesi 23
2.8. Oluşum Türlerine Göre Atıklar 24
2.8.1. Afet yıkıntı atıkları 24
2.8.2. Deprem ülkelerinde betonarme kullanımının karşılaştırılması 34
2.8.3. Deprem ülkelerinde çelik kullanımının karşılaştırılması 35
2.9. Yapısal Atıkların Performans Değerlendirmesi 36
3. ÇELİĞİN ATIK YÖNETİMİ 37
3.1. Çeliğin Kullanım Avantajları 37
3.2. Çeliğin Deprem Performansındaki Avantajları 38
3.3. Çeliğin Kullanım Dezavantajları 38
3.4. Türkiye'de Demir-Çelik Sektörü 39
3.4.1. Türkiye'de çelik üretici firmalar 40
3.4.2. Çelik firmalarının ürün grupları 41
3.4.3. Mimarların çelik ürün gruplarını kullanımı 42
3.5. Çeliğin Kullanıldığı Yapı Alanları 46
3.6. Yapısal Atık Olarak Çelik 48
3.6.1. Çeliğin geri dönüşümü 49
3.6.2. Çeliğin yeniden kullanılması 49
3.7. İkincil Çeliğin Kullanımına Örnek Projeler 75
4. MATERYAL METOT 87
5. ARAŞTIRMA BULGULARI, SONUÇ VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 99
ÖZGEÇMİŞ 106

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Tez akış şeması 5

Şekil 2.1. Atık yönetim hiyerarşisi 18

Şekil 2.2. Malzemelerin yapı yaşam döngüsü ve geri dönüşüm oranları 21

Şekil 2.3. Şili haritası 26

Şekil 2.4. Putre şehir merkezi 28

Şekil 2.5. Lauca Milli Parkı Parinacota dağ köyü, Şili , Güney Amerika 28

Şekil 3.1. Türkiyenin ham çelik üretimi 40

Şekil 3.2. Ürün gruplarına göre Türkiye çelik ihracatı 41

Şekil 3.3. 2001 yılı Türkiye'de çeliğin yapı tiplerine göre dağılımı 47

Şekil 3.4. 2021 yılı Türkiye'de çeliğin yapı tiplerine göre dağılımı 48

Şekil 3.5. İkili sınıflandırma için altı evrişim katmanı, üç havuzlama katmanı ve üç katmanlı tam bağlı sinir ağı (NN) modeli içeren derin bir özel CNN model mimarisi 67

Şekil 3.6. CNN bağlantı, hasar ve korozyon modellerinin rastgele görüntülerle doğrulanması 69

Şekil 3.7. Holbein Gardens projesi 76

Şekil 3.8. Proje çeliklerinin işlem süreci 77

Şekil 3.9. Proje çeliklerinin yeniden kullanımı 77

Şekil 3.10. Brent Cross Trafo Merkezi Projesi 80

Şekil 3.11. Brent Cross Trafo Merkezi Projesi 81

Şekil 3.12. The Circular Projesi 83

Şekil 3.13. The Circular projesi iç mekandaki yeniden kullanılan çelikler 84

Şekil 4.1. Çeliğin projelerde kullanımı 87

Şekil 4.2. Çeliğin yapısal atık yönetimi 88

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.3. Taşıyıcı çeliğin üretimi ve ürüne dönüşmesi 90

Şekil 4.4. Taşıyıcı olmayan üretimi ve ürüne dönüşmesi 91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Yapısal atıkların tanımlanması 19

Çizelge 2.2. Yapı malzemelerinin geri dönüşümünün karşılaştırılması 21

Çizelge 2.3. Oluşum türlerine göre atıkların tanımlanması 24

Çizelge 2.4. Büyük afetler ve sonucunda oluşan moloz miktarları 25

Çizelge 2.5. Hatay-Maraş depremlerinden sonra oluşan atıklar 25

Çizelge 2.6. Japonya evlerinde yapı tipolojisine göre aldıkları hasarlar 30

Çizelge 2.7. Şili, Japonya ve İtalya'nın deprem öncesindeki ve sonrasındaki yapı tipolojileri ve hasar durumları 35

Çizelge 3.1. Çeliğin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması 39

Çizelge 3.2. Türkiye'deki dünya sıralamasına giren çelik firmaları 40

Çizelge 3.3. Çelik üretim malzemeleri ve kullanım amaçları 43

Çizelge 3.4. Çelik ürünler 44

Çizelge 3.5. Üretilen çelik profillerin özellikleri ve kullanım alanları 45

Çizelge 3.6.Çelik yapıların sınıflandırılması 47

Çizelge 3.7. Çeliğin geri dönüşüm süreci 49

Çizelge 3.8. EN 1090-2 standardına göre tanımlanan Yürütme Sınıfları 51

Çizelge 3.9. İkincil çeliğin faydaları 51

Çizelge 3.10. İkincil çeliğin zorlukları 53

Çizelge 3.11. MVR ve PROGRESS çelik tasarım kılavuzlarının karşılaştırılması 56

Çizelge 3.12. EN 10204 Sertifika Tipleri: Tip 2.2 ve Tip 3.1 karşılaştırma tablosu 57

Çizelge 3.13. Çelik için malzeme pasaportu 58

Çizelge 3.14. Çeliğin tahribatlı ve tahribatsız muayenelerinin karşılaştırılması 59

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.15. Tahribatsız yöntemlerin karşılaştırılması 62

Çizelge 3.16. Tahribatlı testlerin karşılaştırılması 73

Çizelge 3.17. Holbein Gardens proje künyesi 76

Çizelge 3.18. Brent Cross Trafo Merkezi proje künyesi 80

Çizelge 3.19. The Circular proje künyesi 83

1. GİRİŞ

Küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme, altyapı ihtiyacı ve yapı sektöründeki gelişmeler, doğal kaynakların hızla tükenmesine ve atık üretiminin artmasına neden olmaktadır. Özellikle inşaat sektörü, ham madde tüketimi, enerji kullanımı ve sera gazı salımı açısından dünyadaki en büyük çevresel etkilere sahip sektörlerden biridir. Günümüzde yapı sektörünün en büyük problemlerinden biri, üretim ve yıkım süreçlerinde ortaya çıkan büyük miktarda yapı atığıdır. Kentleşmenin hızla artması, eski yapı stoğunun yenilenmesi ve mega ölçekli altyapı projeleriyle birlikte, yapı kaynaklı atıkların miktarında ciddi bir artış yaşanmaktadır. Bu atıklar, sadece doğrudan çevresel etkileriyle değil; aynı zamanda kent içi alanlarda depolanma ve bertaraf edilme güçlüğü, kaynak tüketimi, enerji harcaması ve karbon salımı gibi çok katmanlı sorunlara neden olmaktadır [1].

Kent içi alanların giderek daha fazla yapı atığıyla karşı karşıya kalması, yalnızca bir çevre sorunu değil; aynı zamanda mekânsal, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik açısından da ele alınması gereken çok yönlü bir problemdir. Bu bağlamda, yalnızca atığın bertaraf edilmesi değil, atığın oluşmadan önce önlenmesi, yeniden kullanılması ve malzemenin değerinin korunması gibi yaklaşımlar, yapı sektöründe giderek daha fazla önem kazanmaktadır [1].

Yapı sektörünün bu doğrultuda dönüşüm geçirmesi kaçınılmaz hâle gelmiş ve geleneksel "üret–kullan–at" modelinden, döngüsel ekonomi anlayışına geçiş ihtiyacı daha da görünür olmuştur. Döngüsel ekonomi, atığın oluşmadan önce yönetilmesini, malzemenin yaşam döngüsü boyunca değerini korumasını ve yeniden üretim yerine yeniden kullanımın öncelik kazanmasını amaçlayan sistematik bir dönüşümdür. Bu bağlamda yapı malzemelerinin tekrar kullanıma olan uygunluğu, döngüsel yapılı çevrelerin geliştirilmesinde temel bir rol oynamaktadır [2].

Yapı üretimi bağlamında değerlendirildiğinde, bu dönüşümün uygulanabilirliği her malzeme için aynı ölçüde mümkün değildir. Bu dönüşümde kritik rol oynayan yapı malzemelerinden biri çeliktir. Çelik, hem fiziksel hem de yapısal özellikleri sayesinde döngüsel ekonomiye en uygun yapı malzemelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Yüksek taşıma kapasitesi, dayanımı, modülerliği, fabrikada üretilebilirliği ve demontaj kolaylığı ile yeniden kullanım ve geri dönüşüm açısından öne çıkan bir yapı malzemesidir. Ayrıca, çelik yapı elemanları

mekanik özelliklerini koruyarak defalarca geri dönüştürülebilmekte ve uygun söküm koşulları sağlandığında yeniden kullanıma elverişli biçimde değerlendirilebilmektedir. Bu özellikleri onu yapı sektöründe sürdürülebilir stratejilerin temel unsurlarından biri hâline getirmektedir [3].

Çeliğin bir diğer önemli noktası da Türkiye'nin coğrafi konum olarak deprem kuşağında yer almasıdır. Bir deprem ülkesi olarak her zaman için yatay yüklere maruz kalma ihtimali oldukça yüksektir. Her branşın üzerine düşen görevleri olduğu gibi mimarların da bu konuda oldukça sorumlulukları vardır. Tasarım, yapım, yıkım ve yıkımın en verimli şekilde değerlendirilme süreçlerinde aktif rolleri vardır. Yapım, kullanım ve yıkım aşamalarında yapı malzemelerinin bileşenlerinin ve çevreye nasıl bir etki göstereceği bilinmelidir. Yapı sistemlerinin oluşturulmasında kullanılan çelik, diğer malzemelerle karşılaştırıldığında geri dönüşüm ve yeniden kullanıma daha uygundur. Dayanıklılığı, prefabrik olması, iskele ve kalıba gerek kalmaması, taşınabilmesi, yapım süresinin kısa olması, birleşim detaylarının tipleştirilebiliyor olması da avantajları içerisindedir. Özellikle büyük yapılarda ve geniş açıklıkların olduğu yapıların ömrünü tamamlaması sonucunda mekanın yeniden dönüşümü ya da ortaya çıkacak olan malzemelerin yeniden kullanılmasıyla ilgili yaşam döngüsü içerisinde sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve yeniden kazanımı daha avantajlıdır. Türkiye'nin afet ülkesi olması sebebiyle de yapıların zamanla yıpranmasına ek olarak deprem sebebiyle de ömrünü tamamladığı süreçler görülmektedir. Çelik kullanımının yapının dayanımına etkisi olduğu kadar yapısal atık olarak kabul edildiğinde çevreye daha az zararı dokunmaktadır [4].

Çeliğin bu potansiyellerine rağmen, yeniden kullanımına dair bilgi eksikliği, yönetmelik boşlukları, standartlaştırma yetersizlikleri ve malzeme geçmişine dair verisizlik gibi sorunlar, uygulamada çeşitli engellere yol açmaktadır. Bu nedenle çelik elemanların yapı ömrü sonunda atık değil kaynak olarak değerlendirilmesi; mimari tasarım sürecinden malzeme sökümüne kadar tüm aktörlerin sorumluluklarını yeniden tanımlamayı ve bu konuyu sistematik bir biçimde ele almayı gerektirmektedir [5].

Bu bağlamda, tez çalışması kapsamında yapısal malzemelerin deprem performansı ve ikincil kullanım olarak avantaj ve dezavantajları incelenip; çeliğin üretiminden, yeniden kullanımına kadarki süreçlerinin detaylı olarak çalışılması amaçlanmıştır. Bu çalışmaların ardından malzeme kullanımında çevresel ve yapısal olarak çelik kullanımına bir kılavuz

niteliği oluşturması hedeflenmiştir.

Çalışmanın amacı

Bu çalışmanın amacı, çeliğin yapı ömrü sonunda bir atık değil, döngüsel ekonomi çerçevesinde tekrar değerlendirilebilecek bir kaynak olarak ele alınabileceğini ortaya koymak; geri dönüşüm ve özellikle yeniden kullanım potansiyelini değerlendirmektir.Aynı zamanda bu doğrultuda mimarın üstlenebileceği rolü irdelemek ve tasarım ile yeniden kullanım için çelik için bir kılavuz oluşturmaktır.

Çalışmanın kapsamı

Bu tez çalışması, yapı sektörünün döngüsel dönüşüm süreci kapsamında çelik yapı malzemesinin yeniden kullanım olanaklarını çok yönlü olarak ele alır. Bir deprem ülkesinin sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi kapsamında malzeme kullanımının önemini vurgulamakta olup; çeliğin geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerini, bu süreçlerin çevresel etkilerini, yönetmeliksel çerçevesini, mimari tasarıma etkilerini, malzeme kimliklendirmesi ve test gerekliliklerini, örnek projeler üzerinden somutlaştırarak kapsamaktadır. Çalışma, hem kuramsal hem de uygulamalı boyutta değerlendirme yaparak, çeliğin yapı yaşam döngüsü içerisindeki atık kimliğinden çıkıp, döngüsel ekonomide aktif bir kaynak olarak ele alınabilmesini hedeflemektedir.

Çalışmanın hipotezi

Çelik yapısı gereği üretim aşamasında oldukça enerji tüketen bir malzemedir. Ancak deprem performansı ve yeniden kullanım potansiyelleri göz önünde bulundurulduğunda diğer yapı malzemelerine kıyasla artılarıyla daha öne çıkmaktadır. Yapı elemanlarının yeniden kullanım potansiyelini artırmak için, mimari tasarım sürecinden itibaren döngüsel ekonomi prensiplerine uygun stratejiler geliştirilmesiyle sürdürülebilir bir malzemeye dönüşmesi mümkündür.

Çalışmanın yöntemi

Bu çalışma kapsamında, çeliğin yapı malzemesi olarak kullanımının sürdürülebilirlik, yapısal performans ve atık yönetimi kriterleri doğrultusunda değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bir deprem ülkesi çerçevesinden de bakılarak yapısal kullanım ve geri dönüşüm senaryoları incelenmiştir.

Literatür taraması, vaka incelemeleri, yönetmeliklerin karşılaştırılması, çeliğin üretim ve kullanım alanları detaylandırılarak, örnek projelerde çeliğin geri dönüşüm süreci incelenerek bilgiler toplanmıştır.

Çalışmanın metodolojisi üç temel aşamada yapılandırılmıştır:

1- Çeliğin yapı ömrü boyunca çevresel etkileri, deprem performansı, geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyeli üzerine literatür araştırması yapılmıştır.

2- Farklı yapı tipolojilerinde kullanılan çelikler ve bu çelik tercihlerinin gerekçeleri analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, çeliğin sökülebilirlik, montaj kolaylığı, estetiklik, süreklilik ve yeniden kullanım uygunluğu gibi parametreler değerlendirilerek sınıflandırma ve tipolojik analizler yapılmıştır.

3- Çeliğin yeniden kullanımında karşılaşılan avantajlar, zorluklar, standartlar, test süreçleri ele alınmış, örnekler incelenmiş; bu veriler ışığında, yeniden kullanıma uygunluk kriterleri belirlenmiştir. Aynı zamanda geri dönüşüm sürecinin çevresel ve ekonomik etkileri ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, çeliğin tasarımdan söküme kadar olan sürecinde mimarın alabileceği roller tanımlanmış ve yeniden kullanım odaklı bir tasarım yaklaşımının geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur.



Şekil 1.1. Tez akış şeması

2. YAPI VE ÇEVRESEL ETKİ

Yapı, bir sistem veya nesnedeki bileşenlerin belirli bir düzen ve organizasyon çerçevesinde bir araya getirilmesiyle oluşur. Mimari açıdan değerlendirildiğinde, bir yapının oluşumunu sağlayan çeşitli aşamalar bulunmaktadır. Sürdürülebilir yapı üretimi, çevresel ve ekonomik ilkeler doğrultusunda, yapı ve altyapının planlanması, tasarlanması ve inşa edilmesi süreçlerini kapsar. Bu süreç, hammaddelerin temin edilmesinden üretimine, yapı içinde kullanılmasına, kullanım ömrüne ve yıkım sonrası atık yönetimine kadar geniş bir döngüyü içerir [1].

2.1. Kaynak Tüketimi ve Korunumu

Doğal çevrenin kendini yenileyebilme kapasitesi, sağlıklı bir ekosistemin devamı için hayati öneme sahiptir. Yapı sektöründe bu dengeyi koruyabilmek için, kullanılan malzemelerin uzun ömürlü, doğa dostu ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiş olması gerekir. Yapının tüm yaşam döngüsü boyunca enerji verimliliği, malzeme tasarrufu ve alan kullanımı gibi kriterler bu sürecin sürdürülebilirliği açısından belirleyicidir. Bu bağlamda yaşam döngüsü odaklı çevresel denge (eko-denge) kavramı, malzeme ve yapı performansının değerlendirilmesinde önemli bir araçtır [6].

Sanayi üretiminin yaklaşık %65'i yapı sektöründe kullanılmakta olup, bu üretim faaliyetleri sonunda toplumun ihtiyaç duyduğu yapılar inşa edilmektedir. Ancak bu süreç, özellikle modern üretim biçimlerinde, doğaya geri döndürülemeyecek düzeyde zararlar verebilmektedir. Yapı malzemelerinin elde edilmesi sırasında doğal kaynakların yoğun şekilde tüketilmesi ve süreçten doğan atıkların çevreye salınması, ekolojik dengeyi ciddi şekilde tehdit etmektedir [7].

Geleneksel yapı üretiminde ise doğal malzemeler daha az işlenerek kullanıldığından, çevresel etkiler daha sınırlıdır. Bu tür uygulamalarda, malzemenin yeniden değerlendirilmesi ve yapıların onarılarak kullanım ömrünün uzatılması mümkündür. Bu da hem malzeme israfını önlemekte hem de doğal kaynak tüketimini azaltarak çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır. Buna karşın, günümüzde yapı malzemelerinin kontrolsüz ve yoğun biçimde tüketilmesi çevresel zararları artırmaktadır. Örneğin, demir cevheri çıkarımında

tercih edilen açık ocak madenciliği, yer altı su kaynaklarını bozmakta ve bölgesel ekosistemleri tahrip etmektedir. Bir ton demir cevheri elde edilirken yaklaşık 5–6 ton atık üretilmekte; modern tesislerde günlük 1000 ton demir üretimi için milyonlarca metreküp temiz hava, büyük miktarda su ve yüzlerce ton kömür tüketilmektedir. Benzer şekilde, çelik üretiminde de büyük miktarda kömür, cevher ve kireç taşı kullanılmakta olup bu süreçlerde karbondioksit, sülfürdioksit, arsenik, kadmiyum ve flor bileşikleri gibi zararlı gazlar çevreye salınmaktadır.

İnşaat faaliyetleri, her yıl dünya genelinde çıkarılan taş, kum ve çakılın yaklaşık %40'ını tüketmektedir. Bu durum da erozyon, toz emisyonu, habitat kaybı, yer altı sularının kirlenmesi gibi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Özellikle metal bazlı yapı malzemeleri, yüksek enerji tüketimi ve emisyon düzeyleri nedeniyle çevresel yükü en fazla olan ürünler arasında yer alır. Örneğin, bir kilogram çelik üretimi için yaklaşık 25 MJ enerji, beton için ise sadece 1 MJ enerji gereklidir. Çimento üretiminde ise ton başına 110 kWh elektrik, 100 kg fuel-oil ve 185 kg kömür tüketilmektedir. Ayrıca, yapı sektöründe kereste kullanımı için yağmur ormanlarının yok edilmesi, yapı malzemelerinin doğa üzerindeki yıkıcı etkilerine başka bir örnek olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

Malzeme ve kaynak kullanımının çevresel etkilerle birlikte sayısal olarak değerlendirilmesi, çevresel zararların zaman içinde azaltılabilmesi açısından büyük önem taşır. Bu ölçümler, yalnızca belirli bir ürün ya da sürecin etkisini göstermekle kalmaz, aynı zamanda farklı ürünlerin veya projelerin çevresel performanslarının karşılaştırılabilmesine de olanak tanır. Böylece sektör için referans niteliğinde veriler oluşturulabilir. Malzemelere özgü çevresel etkileri analiz etmek amacıyla en yaygın kullanılan yöntemler arasında karbon ayak izi ve su ayak izi hesaplamaları yer almaktadır. Bu analizler, ISO ve EN standartları tarafından çerçevelendirilmiştir. Örneğin:

- ISO/TS 14067 – Karbon ayak izi hesaplamaları için,
- BS EN ISO 14046 – Su ayak izi analizleri için,
- BS EN ISO 14024-14027 – Çevresel etiketleme ve ürün beyanı için kullanılan standartlardır.

Çevresel değerlendirmeler yalnızca üretim süreciyle sınırlı tutulmayabilir. "Beşikten mezara" yaklaşımı ile, ürünün doğadan elde edilmesinden başlayarak üretimi, kullanımı,

bakım-onarım süreçleri ve ömrünün sonunda atık hâline gelişi ya da geri dönüşümü gibi tüm aşamalar analiz edilebilir. Bu kapsamlı yönteme Yaşam Döngüsü Analizi (LCA) denilmektedir.

LCA analizleri çoğu durumda isteğe bağlı olarak gerçekleştirilse de, ihracat yapan firmalar için önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Zira birçok ülkenin çevre mevzuatları, ithal edilen ürünler için emisyon hesaplamalarının ve çevresel performans belgelerinin sunulmasını şart koşmaktadır. Bu hesaplamaların sonucunda düzenlenen Çevresel Ürün Beyanı (EPD) etiketleri ise, ürünlerin çevre üzerindeki etkileri konusunda şeffaflık sağlamakta olup yapı pazarında güvenilirlik kazandırmaktadır [8].

2.2. Çevresel Etki

Çevresel etki değerlendirmesi, bir projenin çevre üzerindeki olası etkilerini önceden analiz ederek, bu etkilerin azaltılması ya da tamamen önlenmesi için gerekli stratejilerin belirlenmesini amaçlayan sistematik bir yaklaşımdır. Bu süreç, projenin henüz planlama aşamasındayken çevresel etkilerin farkına varılmasını sağlar; bu sayede karar alma süreçlerinde çevreye duyarlı uygulamaların entegre edilmesi mümkün hale gelir. Değerlendirme yalnızca başlangıç aşamasıyla sınırlı kalmaz, aynı zamanda projenin uygulanması ve sonrasında etkilerin izlenmesini de kapsar. Böylece projenin çevresel sürdürülebilirliği bütüncül bir biçimde ele alınmış olur [9].

Bir yapının ya da yerleşim alanının doğal çevreyle kurduğu ilişkinin değerlendirilmesinde, hukuki bir zemin oluşturan Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) raporlarının ilkeleri referans alınarak, yapı ürünlerinin elde edilmesine yönelik çevresel kriterler belirlenmektedir. Bu kapsamda dikkate alınması gereken ölçütler aşağıda sıralanmıştır:

- Ülke genelinde mevcut hammadde kaynaklarının miktarı ve kapasitesi,
- Kaynağın işletmeye uygunluğu ve sürdürülebilirliği,
- Ulusal ölçekte söz konusu kaynağa olan ihtiyaç düzeyi,
- Malzemenin üretim sürecindeki enerji verimliliği,
- Yaşam döngüsü boyunca enerji tüketim düzeyi,
- Ekolojik dengeyi bozucu etkiler,

- Ekolojik dengeyle uyumlu özellikler,
- Üretim yöntemlerinin çevre dostu olup olmaması,
- Hammadde temin edilen alanların rehabilite edilebilirliği,
- Üretim sürecinin ekonomik maliyeti,
- Taşımaya ilişkin ekonomik ve çevresel maliyetler,
- Depolama sürecinin maliyeti ve çevreye olan etkileri,
- Malzemenin geri dönüştürülebilirliği,
- Malzemenin tekrar kullanılabilirliği,
- Yenilenebilir kaynaklara dayanıp dayanmadığı,
- Yerel olarak temin edilip edilemediği,
- Geleneksel yapı kültürüne uygunluğu,
- Hammadde temininde ortaya çıkan atıkların türü ve dönüşebilirliği,
- Üretim aşamasında oluşan atıkların çevresel niteliği,
- Yapıya entegre edilirken oluşabilecek atıkların durumu,
- Kullanım sürecinde ortaya çıkan atıkların zararlılığı ve geri dönüşümü,
- Geri dönüşüm işlemleri sırasında oluşan atıkların çevresel etkileri,
- Nihai yok edilme sürecinde oluşabilecek kalıcı atık türleri,
- Malzemenin yapı biyolojisi ile uyumu ve insan sağlığına etkileridir [7].

Çevresel etki değerlendirmesi ve yapı çevresi analizi, yapı sökümü ve yıkımı işlemleri ile ilgili atık yönetimi kararlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu analiz, gerçekleştirilecek çalışmaların çevre üzerinde yaratabileceği potansiyel etkileri değerlendirir ve bu etkilerin azaltılması için gerekli tedbirlerin alınmasını sağlamaktadır. Ayrıca, seçilen alanın çevresel imkanları da dikkate alınarak analiz edilmesi gerekmektedir. Çevresel etki değerlendirmesi, çevreye yönelik önemli etkilerin belirlenmesi için yapılan ön hazırlık çalışmalarını içerir ve bu süreç, karar alma aşamasını yönlendiren bir rehber olmaktadır. Türkiye'de, günümüzde yapı söküm ve yıkım çalışmalarında çevresel etki değerlendirmesi yaygın olarak kullanılmıyor olsa da, bu çalışmalar çevreyi olumsuz şekilde etkileyebileceği için çevresel etkilerin analiz edilmesi önemlidir [10].

Bu sürecin amacı, çevresel değerleri koruyarak sosyal ve ekonomik gelişimin engellenmemesini sağlamak ve olası olumsuz çevresel etkileri önceden belirleyerek gerekli önlemleri almaktır. Ayrıca, çevreye yakın bölgelerde yaşayan insanlara, yapılan çalışmaların kapsamı ve olası etkileri hakkında bilgilendirme yapılması gerekmektedir. Yapı sökümü ve

yıkımı sırasında çevresel etki değerlendirmesi ve çevre analizi yapılırken, yapıların bulunduğu alanın konumu, yapısal atık yönetim tesislerine mesafesi, çevredeki trafik durumu, çevredeki boş alanlar ve çalışma alanının büyüklüğü gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Ayrıca, rüzgar yönü, iklimsel koşullar, altyapı sistemlerinin yerleri, çevredeki tehlikeli maddeler ve yerel yönetimin yapı çalışamaları kuralları ile düzenlemeleri de analiz edilmesi gereken önemli faktörlerdir [10].

2.3. Yapısal Ömür

Yapı ömrü, genel anlamda bir yapının kullanım sürecini ifade eder ve imalatın tamamlanıp kullanımın başlamasıyla birlikte, çevresel faktörlerin ve zamanın etkisiyle yapı elemanlarının bozulma, yıpranma ya da taşıyıcılık kaybına uğraması sonucunda yapının kullanılamaz hale gelmesine kadar geçen süreyi kapsamaktadır. Her yıl birçok yeni yapı inşa edilirken, benzer sayıda yapının da yıkıldığı gözlemlenmektedir. Bu yıkımlar, dışsal etkiler nedeniyle (örneğin afetler) ya da yapının kendi yapısal yetersizlikleri sonucu gerçekleşmektedir [11].

Yapının kullanım süreci, üretim sürecinin bir parçası olarak değerlendirilmelidir. Zira bu aşamada ortaya çıkan sorunlar, sıklıkla tasarım ya da yapım hatalarına dayanmaktadır. Yapının kullanıcı ihtiyaçlarını ne ölçüde karşıladığı ve öngörülen fonksiyonları yerine getirip getirmediği, bu süreçte net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kullanım aşamasında yapılan değerlendirmeler, sonraki projeler için geri bildirim işlevi taşımaktadır. Bu yönüyle, kullanım süreci yalnızca işlevsel değil, aynı zamanda öğretici bir aşamadır.

Zamanla her yapının çeşitli bölümlerinde eskime, bozulma ve yıpranma görülür. Bu etkiler, yapı bileşenlerinin dayanımına ve bakım-onarım faaliyetlerinin yeterliliğine bağlı olarak ya tolere edilebilir ya da yapının kullanımını sınırlandırıcı hâle gelir. Bu bağlamda, yapı elemanlarının kullanım ömürleri ve dayanıklılık performansı belirleyici faktörler arasında yer almaktadır.

Yıkım olgusu, yalnızca fiziksel bir son olarak değil, aynı zamanda bir süreç olarak da ele alınabilir. Yapı, tamamlandığı andan itibaren fiziksel olarak yıpranmaya ve yaşlanmaya başlar. Bu durum, bir canlının yaşam döngüsüyle benzerlik gösterir: doğumla birlikte başlayan süreç, zamanla ölüme yaklaşır. Ancak her yapı için kaçınılmaz bir yıkım söz

konusu değildir. Tarihsel ve mimari değeri olan yapılar, yüzyıllar boyunca ayakta kalabilmekte ve kültürel miras olarak yaşamlarını sürdürebilmektedir.

Yapıların yıkılma nedenleri oldukça çeşitlidir. Bu nedenler arasında imalat hataları, malzeme yorgunluğu, doğal afetler (deprem, sel, yangın) gibi ani etkenler, ya da planlı yıkım kararları yer alabilir. Bazı yapılar, kendi fiziksel durumu sağlam olsa da çevresel, ekonomik veya politik gerekçelerle yıkıma uğrayabilir. Çünkü yapılar yalnızca fiziksel nesneler değil, aynı zamanda sosyal yaşamın, kültürün ve toplumsal değerlerin biçimlendirdiği mekânsal ifadelerdir [11].

2.4. Yapı Malzemelerinin Yapısal Ömür Sürecinde Değerlendirilmesi

Yapı malzemelerinin her birinin farklı kullanım avantajları ve dezavantajları vardır. Tedarikleri, kullanımları, kullanımdan sonra geri dönüşüm ve yeniden kullanımları farklı niteliktedir.

2.4.1. Çelik

Çelik, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan bir malzemedir ve metalik demir ile karbon, manganez, silisyum, fosfor, kükürt gibi çeşitli elementlerin karışımından oluşmaktadır. Demirin sıcaklığa bağlı olarak kristal yapısının değişmesi ve ısıl işlemle farklı özellikler kazanabilmesi, çeliği geri dönüştürme açısından en yüksek verimliliğe sahip endüstriyel malzeme yapmaktadır. Üretilen her 100 kg çeliğin 40 kg'ı geri dönüşümden elde edilmektedir. Bu sektörde kullanılan hurdanın yaklaşık %70'i ise ithal edilmektedir. Çelik üretiminde ham madde olarak doğadan çıkarılan metallerin temini çevresel etkileri yüksek ve zorlayıcı bir süreçtir. Bu nedenle, hurda çeliğin geri dönüştürülmesi, hem doğal kaynakların korunması hem de çevresel etkilerin azaltılması açısından büyük bir öneme sahiptir [12].

Çelik, kolayca yeniden kullanılabilen bir malzemedir. Özellikle köprüler ve kuleler gibi çelik yapılar, uygun koşullarda sökülüp başka alanlarda tekrar kullanılabilir. Çelik sistemlerdeki modülasyon ve ön yapım elemanları, söküm ve yeniden kullanım süreçlerinde avantaj sağlamaktadır. Çelik kullanımının artması, taşıyıcı elemanların yeniden kullanılabilirliğini kolaylaştırmaktadır. Sökümde zarar görmeyen elemanlar, yeniden

kullanılabilmektedir. Çelik ürünlerin aynen kullanılabilirliği, birleşim detaylarının tasarımına ve uygulamasına bağlıdır. Kullanılmış çelik, olumsuz bir etkilenim olmadıkça yeni çelikle eşdeğer olup genellikle daha düşük maliyetlidir.

Kullanılmış çelik geri dönüştürüldüğünde ve yeniden kullanıldığında, önemli çevresel faydalar sağlanmaktadır. Bu süreçte %74 oranında enerji ve %90 oranında ham madde tasarrufu sağlanırken, su tüketimi %40 oranında azalmaktadır. Ayrıca, atık su kirlenmesi %76, hava kirliliği %86 ve maden atıkları ise %97 oranında düşüş göstermektedir [12].

2.4.2. Taş ve tuğla

Doğaltaş, doğal yapısı gereği bir yapı malzemesi olarak çevreden neredeyse hazır hâlde elde edilebilmektedir. Sadece ocaktan çıkarılması ve şekillendirilmesi için enerji gerekmekte olup, bu enerji miktarı birçok endüstriyel yapı malzemesine göre oldukça düşüktür. Genellikle kesilerek çıkarılan doğaltaşlar, işlenmeye hazır hâle getirildikten sonra kullanıma sunulur. Ancak doğaltaş ve tuğladan oluşan yığma yapıların yeniden kullanımı çeşitli nedenlerle zorluk taşımaktadır.

Bu zorlukların başında, geleneksel yığma yapıların tasarımında söküm ve geri kullanımın düşünülmemiş olması gelmektedir. Ayrıca, yapı elemanları arasındaki yoğun bağlantılar, kullanılan yapıştırıcı ve bağlayıcı malzemelerin (örneğin harç) taş ya da tuğla yüzeylerinden temizlenmesinin güç olması, bu tür yapıların bütünsel olarak yeniden değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır.

Yıkım sürecinde ortaya çıkan taş ve tuğla atıkları, genellikle harç, beton, alçı, ahşap gibi farklı malzemelerle karışık hâlde bulunur. Bu durum, yeniden kullanılabilir malzemelerin ayrıştırılmasını karmaşık ve zaman alıcı bir iş hâline getirir. Sıklıkla elle ayıklama gerektiren bu süreç, maliyeti ve iş gücü ihtiyacını artırmaktadır. Temizlenip tekrar kullanılabilen tuğlalar, genellikle yeni üretilmiş tuğlalardan daha pahalıya mal olmakta ve bu da yeniden kullanımın yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Bu soruna çözüm getirmek amacıyla, Avrupa Birliği tarafından desteklenen REBRICK projesi, tuğlaların otomatik olarak ayrıştırılması ve temizlenmesi üzerine bir sistem geliştirmiştir. Projenin tamamlanmasından sonraki iki yıl içinde, Avrupa'da yıllık tuğla atığının yaklaşık 24.000 ton azaltılması öngörülmektedir. Üstelik her bir geri dönüştürülmüş tuğla, yeni üretim bir tuğlaya göre yaklaşık 0,5 kg daha

az karbondioksit salımına neden olmaktadır. Bu yönüyle proje, hem atık yönetimi hem de karbon emisyonunun azaltılması açısından önemli katkılar sunmaktadır [13].

2.4.3. Ahşap

Ahşap, doğal olarak hızla yenilenebilen ve düşük enerjiyle işlenebilen sürdürülebilir bir yapı malzemesidir. Yaşam döngüsünün tüm evrelerinde enerji etkinliği sağlayan ahşap, çevresel etkisi düşük ve çevre dostu bir yapı çözümü sunmaktadır. Özellikle ahşap yığma yapıların, sökülebilir bağlantı sistemlerine sahip olması, bu yapıların yeniden kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu durum, tarihi ve kültürel öneme sahip yapılarda yer alan ahşap elemanların korunarak değerlendirilmesini de mümkün kılmaktadır.

Ahşap, farklı türleriyle dayanıklı ve biçimsel olarak esneklik gösterebilen bir malzemedir. Eğer nem, böcek, küf gibi biyolojik zararlılardan etkilenmemişse, sökülen elemanlar orijinal işlevleriyle tekrar kullanılabilmektedir. Ancak bu sürecin sağlıklı ilerlemesi için bazı ön işlemler gereklidir. Örneğin:

- Söküm sonrası malzeme, üzerindeki metal bağlantılar açısından metal dedektörle taranmalı,
- Farklı ebatlardaki ahşaplar boyutlandırıcı sistemlerle sınıflandırılmalı,
- Uygun işleme yöntemlerinden geçirilerek yeniden kullanım için hazır hâle getirilmelidir.

Yeniden değerlendirilebilecek ahşap yapı elemanları arasında; yığma duvar panelleri, çatı makasları, döşeme kirişleri, doğramalar, mertekler, kolonlar, aşıklar ve büyük taşıyıcı sistem bileşenleri yer almaktadır. Ayrıca ahşap, sadece birincil değil, ikincil kullanım amaçlarıyla da geri kazanılabilir. Örneğin:

- Erozyon kontrolü için set ve toprak tutucu yapılar,
- Tarımda hayvan altlığı ya da yataklık,
- Toprak yüzey kaplamaları gibi işlevlerle tekrar değerlendirilebilir.

Bunun yanı sıra, doğal veya yapay ahşap atıklar talaş haline getirilerek, sunta, lif levha (MDF) veya ahşap plastik kompozit ürünlerinin üretiminde ham madde olarak kullanılabilmektedir. Ancak bu tür geri dönüşüm işlemleri için ahşap atıkların kirlenmemiş,

kimyasal kaplamalardan arınmış ve uygun kalite standartlarında olması gerekmektedir [13].

2.4.4. Beton

Beton ve betonarme yapı elemanlarının birleşim noktalarındaki detaylara göre, bu elemanların sökülmesi ve yeniden kullanılabilmesi mümkündür. Ancak, yerinde döküm betonarme ve harçla birleşmiş elemanların, zarar vermeden sökülmesi oldukça zordur. Öte yandan, beton veya betonarme elemanlardan ön yapımlı olanlar, birleşim noktalarındaki tasarımlar sayesinde kolayca sökülebilir ve tekrar kullanılabilmektedir. Beton ürünleri arasında sabit olmayan, yapıştırılmamış ve birleştirilmemiş yığma bloklar, döşeme kaplamaları, yapı blokları, beton çatı kaplamaları ve ön yapımlı betonarme taşıyıcı sistem elemanları kolaylıkla sökülüp tekrar kullanılabilmektedir. Ancak, temel birimler, kazık temeller, kesonlar, boru sistemleri, köprü kirişleri, rampalar, yerinde döküm çerçeve sistemleri, kirişler ve kolonlar yeniden kullanılabilir özellikte değildir. Aynen kullanılabilen beton ürünleri arasında bordür ve döşeme taşları, araç güvenlik bariyerleri, harpuşta ve lentolar, döşeme kaplamaları ve bloklar, beton çatı kaplamaları, bahçe ürünleri, tünel elemanları ve ön yapımlı beton ürünler bulunmaktadır [10].

Beton ürünlerin aynen kullanılmasını zorlaştıran bazı engeller bulunmaktadır. Bunlar arasında, söküme uygun tasarım ve uygulama konusunda bilgi eksikliği, yeniden kullanılabilir ürünlerin pazar payının yetersizliği, birleşim yerlerinin yerinde dökme sistemlerle birleştirilmiş olması, beton ürünlerin bozulma, renk değişimi, kırılma ve kimyasal etkilerinin olması, betonarme sistemlerdeki donatının korozyona uğraması ve kaplama ürünlerinin bozulması ve çatlaması gibi faktörler yer almaktadır. Betonarme yapıların yerinde döküm elemanları yeniden kullanılamaz, ancak betondaki donatılar ayrıştırılarak geri dönüştürülebilir. Beton atıkların ikincil kullanım için uygun olabilmesi için içeriğindeki yabancı maddeler %10'u geçmemeli ve temizlenmelidir. Bu atıklar, asfalt beton agregası veya yol yapımında alt temel ürünü vb. çalışmalarda ikincil olarak kullanılabilmektedir.

Yıllık hazır beton tüketimi yaklaşık olarak 0.30-1.40 metreküp/kişi düzeyindedir ve bu tüketim çevresel sorunlara yol açmaktadır. Kırılarak agrega haline getirilip yeni beton üretiminde kullanılan agregaların özelliklerinin standartları karşılaması da gerekmektedir. Geri dönüştürülmüş beton agregaları, betonun dayanımını ve elastisiteyi azaltırken, su emme

kapasitesini artırır. Ayrıca, bu betonun donma-çözünme direnci azalır ve suya fazla maruz kalan yerlerde kullanılmamalıdır. Kalsiyum silikatlı bloklar ve taş gibi yapısal atıklar, tuğla ve sodyum silikatlı blok üretiminde kullanılabilir ve geri dönüştürülerek beton yapımında da değerlendirilebilir. Bu şekilde üretilen betonun dayanımı, normal agregalı betona göre daha düşük olmasına rağmen, yine de kullanılabilir. Geri dönüştürülmüş bu atıklarla üretilen betonun dayanımı, yeni agrega ile yapılan betonun dayanımının %65 ile %90 arasında değişebilir. Bu betonların gerilme dayanımı ve elastisite modülü biraz daha düşük olup, deformasyonları daha yüksektir [10].

2.5. Yapı Analizi

Yapı analizi, yapının mimari yapısı, taşıyıcı sistemi ve yapısal atık verilerini birleştirerek kapsamlı bir değerlendirme süreci sağlamaktadır. Bu analiz, yapı sökümü ve yıkımı sırasında kullanılacak yöntemleri belirler ve atık yönetimi için de temel oluşturmaktadır. Ayrıca, çalışanların ve çevredeki yapıların zarar görmemesi için gerekli güvenlik önlemlerini almaya rehberlik etmektedir. Analiz, yönetim kararlarını daha etkili hale getirirken çevreyi olumsuz etkilerden korur ve yapılan planlamalarla hem çalışanların hem de çevrenin güvenliğini sağlamaktadır [10].

Taşıyıcı sistem değerlendirmesi, yapı analizinin ilk aşamasıdır ve amacı, yapının güvenliğini belirlemektir. Bu süreç, zayıf noktaların tespiti, inceleme gerektiren alanların belirlenmesi ve kullanılacak elemanların seçilmesini içerir. Değerlendirme, gözleme dayalı ve ayrıntılı incelemelerle yapılmaktadır.

Yıkım öncesinde, yapının durumu ilk olarak gözleme dayalı yöntemle değerlendirilmektedir. Bu, uzmanlar tarafından yapılan görsel analizlere dayanır ve hızlı bir tekniktir. Ardından, ayrıntılı inceleme ile taşıyıcı sistem daha derinlemesine analiz edilmektedir.

Taşıyıcı sistem değerlendirmesi sırasında aşağıdaki faktörler göz önünde bulundurulur:

- Taşıyıcı sistemin türü,
- Yapının daha önce uğradığı zararlar,
- Yapının başka bir sistem ya da yapı ile bağlantısı,
- Kolon, temel, döşeme ve kirişlerdeki hasar ve deformasyonlar,

- Sistemin bütünlüğü,
- Duvarların durumu,
- Söküm ya da yıkımda kullanılabilecek taşıyıcı elemanlar.

Mimari değerlendirme süreci, uygulama projesi olmayan yapılarda gerekli ölçümlerin yapılıp rölöve projelerinin hazırlanmasıyla başlamaktadır. Böylece mevcut durum net bir şekilde belirlenerek uygulama projesi olan yapılarda ise mevcut durum önceki haliyle karşılaştırılır ve tarihsel süreçteki değişiklikler incelenir. Mekân analizi yapılarak çalışma yapılacak bölgeler belirlenir ve bu alanlardaki potansiyel tehlikeler tespit edilir. Yapının tarihsel ya da anıtsal değeri göz önünde bulundurulmalı, yapısal atıklar ve düşebilecek nesneler tespit edilmeli, ayrıca toz, gürültü ve titreşim gibi etkiler için gerekli önlemler alınmalıdır [10].

2.6. Yapısal Atık Kavramı

Yapılaşma süreci, inşaat sektöründe kullanılan hammadde ve enerji miktarını artırmakta, dolayısıyla çevresel etkilerin de büyümesine neden olmaktadır. Yapısal atıklar, bu süreçte ortaya çıkan, genellikle inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan malzeme kalıntılarıdır. Beton, metal, ahşap ve diğer inşaat malzemelerinin atıkları, çevreye zarar verebilir ve kaynakların israfına yol açabilmektedir. Bu nedenle, yapılaşmanın sürdürülebilir bir şekilde yapılması, çevresel zararın en aza indirilmesi ve kaynakların verimli kullanılması kritik bir öneme sahiptir. Gelecek nesillere sağlıklı bir çevre bırakabilmek için yapı sektöründeki bu etkilerin dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir [10].

Yapısal atıklar, şehirlerdeki en hacimli atıklar arasında yer almaktadır. Kentsel atıkların %25-30'unu bu tür atıklar oluşturmaktadır. Bu atıklar, çeşitli süreçlerde farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır. İlk olarak, uygulama sürecinde meydana gelen yapısal atıklar, inşaat sırasında kullanılan malzemelerin israfı ve yanlış uygulamalardan kaynaklanabilir. İkinci olarak, kullanım aşamasında oluşan yapısal atıklar, yapıların kullanımı sırasında zamanla meydana gelen aşınma, yıpranma ve onarımlar nedeniyle ortaya çıkar. Üçüncü olarak, yapı ömrünü tamamladığında, eskiyen malzemeler ve yapının yıkılması sonucu oluşan atıklar, yenileme ve yıkım işlemleri sırasında oluşur. Son olarak, doğal afetler, özellikle deprem ve sel gibi olaylar sonrasında, yapısal hasarlar ve yıkımlar sonucunda yeni atıklar meydana gelir. Bu farklı türdeki atıklar, yapısal atıkların çeşitli kategorilerde incelenmesine olanak

tanır. Çevresel zararların en aza indirilmesi ve kaynak kullanımının azaltılması, yapısal atıkların doğru yönetilmesiyle mümkündür. Avrupa Birliği, Atık Çevre Direktifi çerçevesinde kaynakların tüketimini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, atık oluşumunun azaltılması öncelikli hedef olarak belirlenmiş ve atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı gibi çeşitli yöntemlerle bir atık yönetimi hiyerarşisi oluşturulmuştur. Şekil 2.1'de atık yönetim hiyerarşisi verilmiştir. Bu süreçte, en etkili adım olarak atık oluşumunun engellenmesi, en son adım ise bertaraf edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır [14].



Şekil 2.1. Atık yönetimi hiyerarşisi [15]

2.7. Yapısal Atık Yönetilme Metotları

Kentlerde ortaya çıkan yapısal atıklar, hacimsel büyüklükleri ve içerik çeşitliliği nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından özel bir önem taşımaktadır. Bu tür atıklar, inşaat, yıkım, tadilat ve altyapı çalışmaları sonucunda ortaya çıkmakta olup; beton, tuğla, metal, ahşap, cam gibi çeşitli malzemeleri içerebilir. Bu çeşitlilik, hem atıkların geri kazanımı açısından potansiyel barındırmakta hem de uygun şekilde yönetilmediğinde çevresel tahribata yol açmaktadır. Yapısal atıkların kontrolsüz biçimde birikmesi; toprak, su ve hava kirliliğini artırmakta, doğal kaynakların daha hızlı tükenmesine neden olmakta ve kentlerde yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, kentsel ölçekte yapı atıklarının yönetimi sadece bir atık kontrolü meselesi değil, aynı zamanda döngüsel ekonomi ilkeleriyle uyumlu sürdürülebilir bir malzeme politikası oluşturulması açısından da stratejik bir konu haline gelmiştir. Etkin bir yapı atığı yönetimi; kaynakta ayrıştırma, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve bertaraf gibi süreçleri kapsayan entegre bir sistemle ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, hem

çevresel yükleri azaltacak hem de kentlerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında önemli katkılar sağlayacaktır [10].

2.7.1. Yapısal atıkların sınıflandırılması

Yapısal atıklar yapı ve altyapıların içerdiği malzemelerin, yapım, yenileme, onarım, yıkım, afet ve alan çalışmaları gibi süreçler sonucunda atık hale gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Yapım, yenileme ve yıkım atıkları genellikle "yapısal atık" olarak adlandırılsa da, bu süreçlerde oluşan atıklar farklı özelliklere sahip olabilir. Yapısal atıklar Çizelge 2.1'de detaylandırılmıştır.

Çizelge 2.1. Yapısal atıkların tanımlanması

Yapısal Atıklar	Tanımı
Hafriyat toprağı	İnşaat yapılmadan önce arazi düzenleme çalışmaları sırasında alanı hazırlamak için yapılan kazılarda ortaya çıkan toprak
İnşaat atıkları	Konut, bina, köprü, yol gibi alt ve üst yapıların inşası sırasında oluşan atıklar
Yıkıntı atıkları	Konut, bina, köprü, yol gibi alt ve üst yapıların onarım, tadilat, yenileme, yıkım işlemleri veya doğal afetler sonucu meydana gelen atıklar
Tehlikeli inşaat ve yıkıntı atıkları	İnşaat ve yıkım atıklarında bulunan asbest, boya, flüoresan gibi tehlikeli ve zararlı maddeler
Asfalt atığı	Yol, havaalanı pisti gibi altyapıların bakım, onarım, yenileme ve yıkımı sırasında meydana gelen, asfalt, zift ve doğal polimer gibi malzemeler barındıran atıklar
Bitkisel toprak	Bitkilerin büyümesi için gerekli olan su, hava, organik ve inorganik maddeleri barındıran toprak

2.7.2. Yapısal atıkların belirlenmesi

Yapısal atık belirleme çalışması, güvenli bir çalışma ortamı sağlamak ve sağlık açısından risk oluşturabilecek durumları engellemek için gereklidir. Bu çalışma, yapı sökümü veya yıkımı sırasında hangi materyallerin önleneceğini, yeniden kullanılacağını, geri dönüştürüleceğini ya da imha edileceğini belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, atık yönetimi ve yıkım yöntemlerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, yapıda kullanılan ürünlerin tanımlanmasını sağlar ve taşıyıcı sistem ile diğer unsurların sökümü veya yıkımını atık yönetimi açısından daha verimli hale getirmektedir. Bu süreç, ortaya çıkacak atık miktarını, tehlikeli atıkları, söküm ve yıkım yöntemlerini belirlemeye, takvim

ve planlama yapmaya, çalışan sayısını saptamaya ve gerekli tüm planlamaları yapmaya yardımcı olmaktadır [10].

2.7.3. Yapısal atıkların tasnif edilmesi

Yapısal atıkların tasnifi, inşaat ve yıkım faaliyetlerinden doğan atıkların yönetiminde önemli bir aşamadır. Bu süreç, atıkların türlerine göre ayrılmasını sağlayarak geri dönüşüm ve yeniden kullanım imkânlarını artırmayı hedefler. Genellikle inşa, yıkım, onarım ve yenileme sırasında ortaya çıkan bu büyük hacimli ve çeşitli malzemeler, çevresel ve ekonomik etkiler nedeniyle doğru biçimde sınıflandırılmalıdır [16].

Yapısal atıklar; beton, ahşap, metal, cam, alçıpan, plastik ve bazı durumlarda tehlikeli atıkları da kapsayacak şekilde çeşitli malzemelerden oluşmaktadır. Bu tür atıkların yönetimi, belirli bir sıralama doğrultusunda gerçekleştirilmektedir:

1. İnşaat ve yıkım sahalarından atıkların toplanması,
2. Malzemelerin elle veya mekanik yöntemlerle türlerine göre ayrıştırılması,
3. Ayrılan atıkların geri dönüştürülmesi ya da yeniden kullanılabilir hale getirilmesi,
4. Geri dönüştürülemeyen atıkların, çevreye zarar vermeyecek biçimde bertaraf edilmesi veya düzenli depolanması [17].

Bu tür bir sınıflandırma, yapısal atıkların sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda daha etkili yönetilmesini mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlarken, geri dönüşüm oranlarını artırarak ekonomik açıdan da önemli kazanımlar sunmaktadır [17].

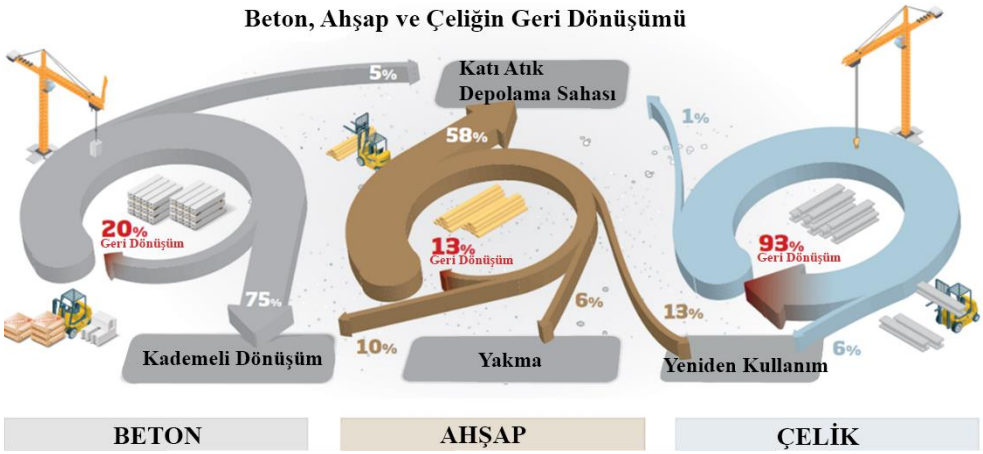
2.7.4. Yapısal atıkların geri dönüşüm olarak karşılaştırması

Farklı yapı malzemelerinin geri dönüşüm oranları, yeniden kullanım potansiyelleri ve çevresel etkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu karşılaştırma, yapı sektöründe geri dönüşüm odaklı stratejilerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle çelik gibi malzemeler yüksek geri dönüşüm oranlarıyla dikkat çekerken, beton ve tuğla gibi malzemeler daha sınırlı dönüşüm potansiyeline sahiptir. Çizelge 2.2’de yapı malzemelerinin geri dönüşüm aşamaları ve dönüştükleri ürünler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yapı malzemelerinin geri dönüşümünün karşılaştırılması

Malzeme	Geri Dönüşüm Tekniği	Geri Dönüştürülmüş Malzeme
Beton	-Beton atıkların, kırma işlemi ve demirli materyallerden elle ya da özel makaslarla ayrılması -Kalite kontrol standartlarına uygunluk sağlamak için farklı boyutların ayrılması ve boyutlandırma işlemi için eleme yapılması.	-Dolgu malzemesi -İkincil agrega malzemesi -Asfalt ve parke taşı
Ahşap	-Ahşap öğütücülerle küçük parçalara ayrılması -Metal içeren ahşap parçaların, manyetik yöntemlerle ayrılması -Ahşap atıkların, kullanım amacına göre uygun boyutlara getirilmek için elekten geçirilmesi -Ahşap atıkların liflerine kadar indirgenerek yeniden yapılanmış levhalar üretilmesi	-Yeniden yapılandırılmış levhalar -Peyzaj düzenlemesi Mobilya mutfak elemanları -Yalıtım malzemesi -Dolgu malzemesi -Kağıt -Enerji kaynağı (yakma)
Taş ve Tuğla	-Harç atıkları temizlendikten sonra, kırma işlemiyle küçük parçalara ayrılması ve daha sonra toz formuna getirilmesi	-Beton ve asfalt uygulamalarında dolgu malzemesi ya da agrega -Yeniden kullanılabilecek tuğla duvar blokları
Metal	-Doğrudan kullanım ya da eritme teknikleri	-Yeni metal üretimi için doğrudan kullanım

Tablodan, metalin yeniden kullanılabilirliğinin en yüksek malzeme olduğu görülmektedir. Hem geri dönüşüm sürecinin daha kolay olması hem de doğrudan kullanılabilmesi nedeniyle, atık yönetiminde bertaraf edilmeden önce iyi bir şekilde ayrıştırılarak tekrar kullanılabilmektedir [18]. Şekil 2.2'de beton, ahşap ve metallerin geri dönüşüm oranları verilmiştir.



Şekil 2.2. Malzemelerin yapı yaşam döngüsü ve geri dönüşüm oranları [19]

2.7.5. Yapı söküm ve yıkım kararları

Yapıların yaşam döngüsü sona erdiğinde, eğer tarihi veya anıtsal bir değeri yoksa ve alanda yeni bir yapı inşa edilmesi, yeşil alan yapılması ya da alanın boş bırakılması planlanıyorsa, yapılar sökülmeli veya yıkılmalıdır. Sözlükte söküm ve yıkımın kelime anlamlarına bakıldığında:

"Söküm: Bir şeyi bulunduğu yerden kuvvet kullanarak ya da gevşeterek çıkarmak, çekip ayırma ya da kurulmuş bir şeyi parçalarına ayırma işlemi",

"Yıkım: Kurulu bir şeyi parçalayarak dağıtma; bozma, tahrip etme işlemi" olarak tanımlanmaktadır.

Yapı sökümü, yapı ürünlerinin geri dönüşüm için uygun şekilde ve zarar vermeden yapıdan ayrılmasını sağlayan bir işlemdir. Yapı yıkımı ise, yapının kasıtlı olarak yıkılması ve bu süreçle ilgili endüstriyel işlemleri içermektedir. Bu süreçte, çok çeşitli ve büyük miktarda yapısal atık ortaya çıkar. Bu atıkların etkili bir şekilde yönetilmesi, doğru teknik ve yöntemlerin uygulanmasını gerektirir. Bu süreç üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, söküm-yıkım öncesidir. Tüm değerlendirme ve analizlerin yapıldığı, planlamaların oluşturulduğu ve çalışmanın güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gerekli önlemlerin alındığı hazırlık sürecidir. İkinci aşama, söküm ya da yıkım işlemlerinin planlara ve belirlenen yöntemlere uygun şekilde gerçekleştirilmesidir. Son aşama ise söküm-yıkım sonrası olup, ortaya çıkan yapısal atıkların önceden yapılan planlamalara göre değerlendirilmesi ve çalışma alanının, hedeflenen duruma uygun olarak düzenlenmesidir [10].

Hong Kong ve Hollanda, yapım, söküm ve yıkım süreçlerinde etkili atık yönetimi politikaları izlemektedir. Hollanda, sınırlı kara alanı nedeniyle yapıları yeniden işlevlendirme veya sökülen malzemeleri tekrar kullanma konusunda başarılı uygulamalar yapmaktadır. 1997 yılında, hükümet atıkların çöp sahalarına gönderilmesini yasaklayarak yapısal atıkların %95'inin yeniden kullanılmasını sağlamıştır. Hong Kong ise, 1993-2004 yılları arasında inşaat sektörü nedeniyle önemli atık üreticisi olmuştur. 2006 yılında "Kirleten Öder" ilkesine dayalı Atık Ücretlendirme Planı uygulamaya girmiş ve atıkları

sınıflandırmayanlara yüksek ücretler getirilmiştir. Bu da yıkım şirketlerini seçici yıkıma teşvik etmiştir [20].

2.7.6. Çalışma ekiplerinin belirlenmesi

Yapı sökümü ve yıkımı sürecinde, hangi ekiplerin görev alacağının belirlenmesi kritik bir aşamadır. Bu süreçte, yüklenici ve/veya yapı sahibi önemli sorumluluklar üstlenmektedir.

Yapı söküm ve yıkım sürecinden önce, yapı sahibinin yerine getirmesi gereken bazı önemli sorumluluklar vardır. Bunlar arasında, yapının ilk projelerine ve planlarına ulaşılması, mühendislik hesaplamaları ve raporlarının sağlanması, söküm veya yıkım öncesi mevcut durum planlarının hazırlanması, yapının geçmiş kullanım verilerinin toplanması, kentsel altyapı ile olan bağlantılarının incelenmesi ve alanında uzman bir yüklenici seçilmesi yer almaktadır.

Yüklenicinin sorumlulukları, projeye uygun yönetim ve yöntem seçimleri yapmayı, alınan kararların doğru şekilde uygulanmasını denetlemeyi, mevcut sorunları belirlemeyi içerir. Ayrıca çevre, sağlık ve güvenlik tedbirlerinin alınması, gerekli ekipman temini, tehlikeli atıkların yönetimi ve riskli alanlarda önlem alınması gibi görevleri vardır. Yüklenici, yerel yönetimlerle uyum içinde çalışmalı, çalışma planlarını onaylatmalı, çalışanları eğitmeli ve yapı çevresini bilgilendirmelidir. Dikkat etmesi gereken bir başka husus da atık yönetimi ve planlamaların yapı ile uyumlu olmasıdır.

Yüklenici, yapı sökümü ve yıkımı sürecinde çeşitli uzmanlıklara sahip ekipler kurmalıdır. Taşıyıcı sistem değerlendirme ekibi yapının taşıyıcı elemanlarını inceler, mimari değerlendirme ekibi iç mekanları analiz eder. Yapısal atık belirleme ekibi, söküm öncesi atıkları belirler ve kaydeder. Yapısal atık yönetimi ekibi atıkların yönetimini, tehlikeli atık yönetimi ekibi ise tehlikeli atıkların doğru şekilde yok edilmesini sağlar. Yapı söküm ve yıkım ekibi tüm işlemleri denetlerken, iş sağlığı, güvenliği ve çevre sağlığı ekipleri güvenlik önlemlerini alır. Tüm ekipler, sürecin güvenli ve verimli bir şekilde tamamlanmasını sağlamak için birlikte çalışır [10].

2.8. Oluşum Türlerine Göre Atıklar

Atıklar oluşum şekillerine göre farklı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Oluşum türlerine göre yapısal atıklar alan, yapım, onarım ve afet atıkları olarak dört başlık altında incelenebilir. Çizelge 2.3'te oluşum türlerine göre atıklar verilerek hangi koşullarda nasıl ortaya çıktıkları verilmiştir.

Çizelge 2.3.Oluşum türlerine göre atıkların tanımlanması [10]

Oluşum Türlerine Göre Atıklar	Tanımı
Alan atıkları	-Bina, yol, köprü inşaatları ya da doğal afetler sonucunda ortaya çıkan zemin kaynaklı atık -Zemin yapısına göre değişiklik -Yüzeysel temizleme veya yapılaşma faaliyetleriyle, toprağın 1-1.5 metre derinliğinde yapılan kazılar sonucu ortaya çıkması -Yeni yapıların temeli için kazı yaparken, mevcut yapılar yıkıldığında ya da tamamlanan bir yapının çevresi temizlenirken oluşması -Yapılaşma çalışmalarında, 1.5 metreden fazla olan kazılarda ortaya çıkan atıklar derin kazı atığı olması
Yapım atıkları	-Modülasyon ve seri üretim süreçlerinde, ürün ve tasarım arasındaki bağlantının kurulamadığı durumlar, hammadde alımında hatalı veri girişi, gereğinden fazla ya da eksik hammadde temini, hammaddenin uygun olmayan koşullarda taşınması ve depolanması, işçilik hataları, yanlış donanım kullanımı, hatalı ölçümler ve modülasyon nedeniyle malzeme artışı gibi sebeplerle oluşan atık
Onarım atıkları	-Yapıların kullanılmasından sonra, tasarım ve üretim hataları, kullanıcı değişiklikleri, estetik kaygılar, güvenlik sorunları ve yapı ömrünün sona ermesi gibi nedenlerle yapılan onarım ve değişiklikler sonucu ortaya çıkan atık -Diğer atıklara göre daha kolay yönetim
Afet yıkıntı atıkları	-Yapıların kullanım ömrünü tamamlamadan deprem, yangın, fırtına, hortum, sel gibi doğal afetler nedeniyle tamamen yıkılması -Kentsel atıklardaki atıkların çoğunluğu

2.8.1. Afet yıkıntı atıkları

Yaşanan bazı doğal afetlerin sonucunda özellikle moloz atıklarının çıkışının oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu atıkların depolanması ve bertaraf edilmesi büyük bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Böyle bir sonuçla karşılaşılmamak adına yapım-söküm sistemiyle olan atık yönetimi gerekli bir hale gelmiştir. Son yıllarda gerçekleşen doğal afetler ve bunların sonucunda oluşan yıkıntı atığı miktarları Çizelge 2.4'te listelenmiştir.

Çizelge 2.4. Büyük afetler ve sonucunda oluşan yıkıntı atığı miktarları [18]

Yıl	Doğal Afetler	Yıkıntı Atığı Miktarları
2023	6-7 Şubat Depremleri (Maraş, Hatay)	138 milyon ton
2017	Mexico City Depremi	1840 ton
2010	Haiti Depremi	23-60 milyon ton
2009	İtalya L'agulia Depremi	1.5-3 milyon ton
2009	Çin-Sichuan Depremi	20 milyon ton
2005	ABD-Hurricane kasırgası	76 milyon m3
2004	ABD/Florida, Frances ve Jeanne kasırgası	3 milyon m3
2004	Hint okyanusu Tsunami	10 milyon m3
2004	ABD-Charley kasırgası	2 milyon m3
1999	Türkiye-Marmara depremi	13 milyon ton
1995	Japonya-Kobe, HansinAwaji depremi	15 milyon ton

Bu çizelgeye göre depremler, tsunamiler ve kasırgaların afet bölgelerinde ciddi hasarlar verdiği görülmektedir. Özellikle de Hatay ve Maraş depremlerinin son 30 yıldaki en çok yıkıntı atığının oluştuğu doğal afet olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu yapı atıklarının ne oldukları Çizelge 2.5'te incelenmiştir.

Çizelge 2.5. Hatay-Maraş depremlerinden sonra oluşan atıklar [18]

Kategori	Malzeme	Toplam	Maraş Depremi Yıkıntı Atığı Miktarı(138 milyon ton)
Geri Dönüştürülebilir	Beton	%60	82.8 milyon ton
	Duvarcılık	%25	34.5 milyon ton
	Toprak ve Kazı Materyali	%5	6.9 milyon ton
	Metaller(Demir Çubuk Dahil)	%5	6.9 milyon ton
Geri Dönüştürülemez	Ahşap,Plastik, Kağıt,Organik Malz.	%4	5.3 milyon ton
Tehlikeli		%1'den az	Max. 1.3 milyon ton

Afet atıklarında en çok atığın depremler sonucunda çıkması ve Türkiye'nin de deprem kuşağında olması sebebiyle depremle baş edebilmede örnek olabilecek bazı ülkeler incelenmiştir. Bu ülkelerin en önemli özelliklerinin depremlerdeki atık oluşumunu minimuma indirebilmeleri olmuştur. Afet yıkıntı atıklarını azaltabilmenin en önemli yolu yapı tekniklerini ya da malzemelerini değiştirerek daha sağlıklı yapılar oluşturmak ve yapıların zarar görmesini engellemektir. Bazı deprem ülkelerinin yapı tipolojileri, malzemeleri ve depreme karşı dayanımları incelenmiştir [18].

Deprem ülkesi olarak Şili

Şili Cumhuriyeti, Güney Amerika kıtasında yer alan bir ülkedir. Şili, doğuda And Dağları, batıda ise Büyük Okyanus ile çevrili olup, uzun ve dar bir coğrafyaya sahiptir. Şekil 2.3'te Şili'nin haritasına bakıldığında Pasifik Okyanusu'nun kıyısında yer aldığı görülmektedir. Ülkenin toplam yüzölçümü 756.096 km² olup, 2017 yılı itibarıyla nüfusu yaklaşık 17,5 milyon kişiye ulaşmaktadır. Başkenti Santiago olan Şili'nin en büyük şehri de aynı adı taşımaktadır ve resmî dili İspanyolcadır [21].



Şekil 2.3. Şili haritası [22]

2010'daki 8.8 büyüklüğündeki Maule depremi ve tsunami, Şili'de büyük yıkıma yol açmış, 12 milyon insanı etkilemiştir. Deprem sonucu, özellikle Maule, Bio-Bio ve O'Higgins bölgelerinde birçok şehir ve kasaba ciddi zarar görmüştür. Binaların %66'sı hasar almış, 190.358 konut kullanılmaz hale gelmiştir. Şili, afet bilinci yüksek bir ülke olmasına rağmen, bu büyük felaket, yapılaşma politikalarının gözden geçirilmesini ve dayanıklı yapılar inşa edilmesini gerektirmiştir. Yeniden yapılanma sürecinde, olası afetlere karşı daha sağlam yapılar ve kesintisiz kamu hizmeti sunulması hedeflenmiştir [23].

Yapı tipolojisi ve deprem dayanımı

Şili mimarisi, ülkenin tarihi, dini kültürü ve iklimiyle şekillenmiştir. Eski bir İspanyol kolonisi olan Şili, İspanyol tarzından etkilenmiş, coğrafi koşullara uygun yapılar inşa edilmiştir. Ülkenin yüksek deprem ve tsunami riski, mimarların dayanıklı yapılar inşa etmelerine ve uygun malzemeler kullanmalarına yol açmıştır. Farklı iklim bölgelerinde, daha kuru olan kuzeyde taş, toprak ve saman, orta bölgelerde kil ve saman, yağmurlu olan güneyde ise fayans ve ahşap gibi malzemeler tercih edilmiştir [24].

Yapısal çelikle inşa edilen binaların maliyetleri yüksektir çünkü yapısal olmayan kaplama malzemeleri temin edilmesi zor ve ülkede ağır çelik parçalar üretilememektedir. Ancak, yapısal çelik, köprüler ve endüstriyel yapılar için yaygın olarak tercih edilmektedir. Şili'de yaygın olarak üç farklı duvar yapım yöntemi kullanılmaktadır: takviyesiz duvarcılık, sınırlı duvarcılık ve güçlendirilmiş duvarcılık. Takviyesiz tuğla duvar kullanımı, 1939 tarihli Genel Yönetmelik ile yasaklanmış olsa da, güçlendirilmemiş tuğla bölme duvarlar hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kerpiç yapılar ise genellikle tek katlı binalarla sınırlıdır. 1985'teki büyük deprem, özellikle Melipilla'da yüzlerce evin yıkılmasına neden olarak kerpiç ve güçlendirilmemiş yığma yapılarında ciddi hasara yol açmıştır. Valparaiso'daki kerpiç yapılar da bu depremde önemli derecede hasar görmüştür.

Takviyeli duvarcılıkta genellikle beton bloklar ve makine yapımı kil tuğlalar kullanılır. Kil tuğlalar, takviye çubuklarının yerleştirilmesine imkan sağlayacak şekilde delikli üretilir ve hafif bir güçlendirme sağlanır. Duvarlarda ortalama düşey donatılar 8 mm çapında çubuklarla yerleştirilir, köşelere ise ek takviye yapılır. Bu tür yapılar için betonarme plakalar da kullanılır. Ancak, 1985 depreminde, makine yapımı kil tuğlalarla güçlendirilmiş duvarlar, açıklıklarda ve döşeme bağlantılarında ciddi çatlamalarla kötü performans göstermiştir [25].

Putre, kuzeyde bulunmakta olup, Bolivya sınırına yakın And Dağları'nda 650 nüfuslu bir köydür. Burada, düşük maliyetli konut projelerinin doğru şekilde tasarlanıp inşa edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Aşırı sıcaklık farkları nedeniyle kerpiç kullanılarak termal kütle sağlanmış, çatılar ise iyi yalıtım için kalın saman tabakalarıyla kaplanmıştır. Şekil 2.4'te Putre'den örnek bir konut görseli verilmiştir. Küçük açıklıklar ve basit yapı formları, evlerin kentsel manzaraya uyum sağlamasına yardımcı olmuştur. Ayrıca, duvarlar çimento ve

çamurla sıvanmış, kapılar kaktüs kabuğuyla kaplanarak evler çevresel koşullara daha iyi adapte edilmiştir [25].



Şekil 2.4. Putre şehir merkezi, Şili [26]

Iquique de kuzeydeki bir sahil şehri olup, kentsel yapısı dış galerili kare evler, güneşten koruyan bitki örtüsüne sahip merkezi avlular ve pencerelere takılan ahşap panjurlar gibi özelliklerle şekillenir. Bu yapılar, gölge sağlamak amacıyla tentelerle donatılmıştır. Şehirdeki binaların tamamı, Panama Kanalı inşa edilmeden önce Kaliforniya'dan getirilen kerestelerle yapılmıştır [24]. Şekil 2.5'te köyden örnek bir sokak görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5. Lauca Milli Parkı Parinacota dağ köyü, Şili , Güney Amerika [27]

Şili'de, modern hayata uyarlanmış yerel mimari çözümler, yerel ve yenilenebilir malzemelerin doğru kullanımıyla yerel kimliği koruma fırsatı sunmaktadır. Sosyal ve ekonomik değişimlerin gerektirdiği yeni çözümler, binaların kentsel dokuyla uyum içinde olmasını sağlamış, çevresel etkilerini azaltmıştır. Yerel malzemelerin kullanımı, yüksek taşıma maliyetlerinden kaçınmayı ve iklim koşullarına uygun yapı çözümleri sunmayı mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım, hem çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir inşaat yöntemlerinin gelişmesine olanak tanımaktadır [24].

Şili, gelişmiş ülkelerden biri olmasa da, bina yönetmelikleri açısından dünya çapında yüksek standartlara sahiptir ve şimdiye kadar birçok depreme dayanıklı yapı tekniği uygulanmıştır. Bugün kullanılan yöntemlerden biri, "güçlü kolon, zayıf kiriş" olarak adlandırılan yeni bir sistemdir. Bu sistemde binalar, çelik çerçevelerle güçlendirilir ve sağlam beton kolonlar üzerine inşa edilir. Beton kirişler, kolonlara bağlanarak katları ve çatıyı oluşturur. Deprem anında kirişler alt kısmından kırılarak enerjiyi dağıtır ve çelik destekler ile kolonlar yapıyı ayakta tutar. 27 Şubat 2010'daki büyük depremin etkilerini araştırmak amacıyla Kanada'dan gelen mühendis ve sismologlardan oluşan bir ekip, çelik binaların başarılı bir performans sergilediğini rapor etmiştir. Ancak, daha çok yapısal olmayan elemanların zarar gördüğü tespit edilmiştir. Şili, hem devlet hem de toplum düzeyinde deprem dayanıklılığı konusunda güçlü bir kültüre sahiptir ve bu nedenle çelik malzemelerin avantajlarından faydalanmaktadır. Ayrıca, yerel malzeme olarak ahşap kullanımı devam etse de, çelik üretimi ve ithalatı yapılmaktadır. 2010 depremi, ülke ekonomisinde büyük tahribat yaratmış olsa da, kısa bir süre sonra çelik üretimini tekrar başlatarak kaybedilen zamanı telafi etmiştir. Santiago'daki haddehaneler, üretim kapasitesini arttırarak kayıpları gidermeye çalışmış, ayrıca 50 bin ton çelik ithalatı yapılmıştır. 2010'da 520 bin ton olan çelik üretim kapasitesi, 2019'da 1.133 tona çıkarak, Şili'nin teknolojik gelişime olan bağlılığını ve modern inşaat kültürüne yönelik bakış açısını göstermektedir [28].

Deprem ülkesi olarak Japonya

Japonya, dört aktif tektonik levhanın kesişim noktasında bulunur: Pasifik, Kuzey Amerika, Avrasya ve Filipin levhaları. Bu bölge, Pasifik Ateş Çemberi olarak adlandırılmaktadır ve sık sık sismik ve volkanik faaliyetlere sahne olur. Levhaların bu şekilde çakışması, Japonya'nın deprem riski taşıyan bir bölge olmasına yol açmaktadır. 19. yüzyıldan itibaren,

Richter ölçeğine göre 6 ve üzeri büyüklükteki depremlerin %20'si Japonya'da gerçekleşmiştir [28].

Yapı tipolojisi ve deprem dayanımı

Japonya'da gerçekleşen 17 Ocak 1995 Hyogo-Ken Nanbu Depremi'nde Kobe kenti ve civarı oldukça hasar görmüştür. Oradaki yapı tipolojisi ve hasar oranı Çizelge 2.6'da incelenerek yapıların türleri ve depremde gördükleri hasarlar incelenmiştir.

Çizelge 2.6. Japonya evlerinde yapı tipolojisine göre aldıkları hasarlar [29]

Yapı Türü	Hasar Derecesi
Geleneksel Japon Evleri – Shinkobe Ağır kiremit çatı Az sayıda bölme duvar Kayar kağıt bölmeler	Tamamen çökme
Yeni Tür Japon Evleri – Okabe Hafif çatı Tahta bölme duvar	Tamamen veya yerel çökme
Eski Tip Betonarme Binalar Etriye aralığı=30cm, 1981 öncesi inşa edilmiş	Yerel çökme/ağır hasarlı
Yeni Tip Betonarme Binalar Etriye aralığı=10cm 1981 sonrası inşa edilmiş	Orta veya az hasar
Eski Tip Çelik Çerçeveler	Yerel çökme/ağır hasar
Yeni Tip Çelik Çerçeveler	Orta veya az hasar

Geleneksel Japon evleri, Shinkabe eski ve Okabe ise daha yeni evler olarak sınıflandırılabilir. Genellikle 1 veya 2 katlı, ahşap taşıyıcı sistemlere sahip bu evler, ağır kiremit çatılar, alt katlarda dükkanlar, üst katlarda ise konutlar ile tanınır. İç mekanlarında genellikle shoji adı verilen kağıt kayar bölmeler kullanılır. Bu yapı tarzı günümüzde azalmış olsa da, yeni yapılarda çatı hafifletilmiş, planda simetri sağlanmış, daha fazla bölme duvarı kullanılmış ve yanal rijitlik artırılmıştır. Ayrıca, düşey taşıyıcı elemanlar beton temellere bağlanarak çelik köşebentler ile güçlendirilmiş, dış cephelerde su yalıtımı yapılmıştır.

Betonarme yapılar, genellikle çelik ve betonarme taşıyıcı sistemlere dayanır. 2. Dünya Savaşı sonrasında yaygınlaşan betonarme kullanımı, son yıllarda çelik yapılarla azalmıştır. Bu yapılar üç ana grupta incelenebilir: Birinci grup, 10 metreden düşük, 3 kata kadar olan, alt katları ticari, üst katları ise konut ya da ticari olan yapılar; ikinci grup, 4 ila 15 katlı ticari ya da konut yapıları; üçüncü grup ise 15 kattan yüksek, son yıllarda inşa edilen yapılar.

Hasarlar çoğunlukla ikinci grupta görülmüştür ve bu yapılar genellikle 1980 öncesi döneme aittir. Hasarın sebepleri arasında yumuşak kat yapıları, taşıyıcı sistemdeki ani değişiklikler ve katlar arası etkileşim yer alır. Hasarlarda denetimden kaynaklı bir sıkıntıya rastlanmamış olup, beton kalitesinde bir sorun gözlemlenmemiştir.

Çelik yapılar, özellikle 1980 sonrasında inşa edilen çok katlı binalarda tercih edilmektedir ve genellikle depreme karşı iyi performans sergilemiştir. Ancak, bazı yapılarda yumuşak zemin kat nedeniyle hasarlar meydana gelirken, diğerlerinde ciddi yanal deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu tür sorunlar, genellikle yanlış sistem seçimi, hatalı detaylandırma ve imalat hatalarından kaynaklanmaktadır [29].

Japonya, çelik üretimi ve uygulamalarında dünyada önde gelen ülkelerden biridir. Bu başarı, yapısal çelik ve diğer çelik malzemelerde teknolojik yenilikler geliştiren kapsamlı Ar-Ge çalışmalarının bir sonucudur. Her yıl Japonya'da 600.000 konut inşa edilmekte ve bunların %40'ı çelik konstrüksiyondan yapılmaktadır. Yıllık çelik tüketimi 50 milyon ton olup, bunun %45'i yapısal alanlarda kullanılmaktadır. Çelik, genellikle yüksek katlı binalarda tercih edilse de, beş kat ve daha az yüksekliğe sahip binalarda da kullanıldığı görülmektedir. Yapısal çelik bileşenleri, sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş çeliklerden üretilmektedir. Çift yönlü sert çerçeve, kutu şeklindeki çelik kolonlar ve kaynaklı kolon-kiriş bağlantıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tasarım, kutu kolonların sismik dayanıklılığı artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Japonya'da yapısal çelik kullanımı 1960'lardan itibaren artmıştır. Konutlarla ilgili inovatif gelişmeler, halkın afet bilinciyle birleşerek afete dirençli toplum anlayışını doğurmuştur [28].

Japonya, deprem deneyimleriyle inşaat tasarımlarını sürekli olarak geliştirmiştir. Günümüzdeki sismik tasarımlar, binalarda plastik deformasyona izin verir ve küçük ile orta büyüklükteki depremlerde elastik kalmasını sağlar. Plastik deformasyon, deprem enerjisinin emilmesine yardımcı olur. Japonya, depremin enerjisini sönümlemek için farklı inşaat teknikleri ve çeliğin süneklik özelliklerinden faydalanmaktadır. Yapısal çelik elemanlar, depremler sırasında kırılmadan deforme olarak enerjiyi sönümleyebilmektedir. 1923 Kanto ve 1995 Kobe depremlerinin ardından Japonya, büyük can ve mal kayıplarından ders çıkararak, depreme dayanıklı inşaat yönetmelikleri oluşturmuştur. Bu yönetmelikler, binaların yüksekliklerine göre farklı koruma yöntemleri içerir. Bu kurallar, binaların yüksekliklerine göre farklı koruma yöntemlerini içermektedir. Alçak binalarda metal donatı

ile güçlendirilmiş duvarlar ve temelde belirli bir kalınlıkta levha kullanımı zorunluyken, orta ve yüksek binalarda ise çelik sönümleyicilerle yapılan taban izolasyonu sistemi uygulanmaktadır [28].

Yapı denetimi, sorumluluk süreleriyle sıkı bir şekilde düzenlenmiştir. Yapının ana unsurlarından kaynaklanan hasarlara karşı sorumluluk süresi 10 yıl olarak belirlenmiştir. Yüklenici firmalar, basit yapılar için 5 yıl, çelik ve betonarme yapılar için ise 10 yıl sorumludur. Yapımı tamamlanan binalara yerel yönetimler tarafından yapı kullanma izni verilir. Ayrıca, Japonya'da yapı sigortası zorunludur ve 2000 yılında çıkarılan düzenleme ile yeni evler için 10 yıl garantili olma şartı getirilmiştir. 2005'teki sahte depreme dayanıklılık verileri skandalının ardından, 2006'da daha sıkı denetimler başlatılmış ve 3 kattan fazla katı olan binalar inşaat süreci boyunca denetlenmeye başlanmıştır [30].

Deprem ülkesi olarak İtalya

L'Aquila, İtalya'nın Abruzzi bölgesinin başkenti olup, Aterno Nehri'nin yukarısındaki bir tepede bulunmaktadır. Şehir, tarihsel olarak depremlerle çok karşılaşmış bir yerdir çünkü eski bir göl yatağı üzerine inşa edilmiştir ve bu da sismik aktivitenin artmasına neden olmuştur. 6 Nisan 2009'da, L'Aquila'da 6,3 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş, bu deprem kuzeybatı-güneydoğu yönündeki Paganica Fayı'nda normal faylanma nedeniyle gerçekleşmiştir. Deprem, L'Aquila'nın tarihi ve modern yapılarında büyük hasarlara yol açmıştır. Şehrin Orta Çağ'dan kalan binalarının çoğu hasar görmüştür. Bunun yanı sıra, L'Aquila Hastanesi'nin depreme dayanıklı olarak yapılan yeni kanadı da büyük hasar almış ve kullanılmaz hale gelmiştir. Toplamda, şehirde 3.000 ile 11.000 arasında bina zarar görmüş ve kapatılmıştır [31].

Yapı tipolojisi ve deprem dayanımı

Depremde, çoğunluğu yığma ve betonarme yapılar olan binalarda büyük yıkımlar yaşanmış ve bu yıkımlar sonucunda 1,5 ila 3 milyon ton arasında moloz meydana gelmiştir. Yapılan araştırmalara göre, bu enkazın %70-80'inin beton ve dolgu malzemesinden oluştuğu tahmin edilmektedir.

L'Aquila depremi sonrası, afet atıklarının toplanıp geri dönüştürülmesi, yasal süreçlerin karmaşıklığı ve kurumsal yapıdaki eksiklikler nedeniyle etkili bir şekilde yönetilememiştir. Afet planlamasında sosyal, ekonomik ve çevresel etkiler yeterince dikkate alınamamış ve kurumsal çerçevenin eksikliği sürecin yönetilmesinde zorluklara yol açmıştır. Benzer bir durum, 2016'daki Amatrice depreminde de yaşanmıştır. Ancak, kurumsal çerçevenin hızlıca aldığı kararlarla, afet atığı yönetimi kısa süre içinde uygulanmaya başlanmış ve bu da sosyo-ekonomik iyileşmeyi hızlandırmıştır. 2016'daki deprem sonrası, afet atıklarının toplanması ve sınıflandırılmasıyla ilgili yönetmelikler hızla devreye alınmıştır. 1 Eylül 2016 tarihli 391 sayılı yönetmelik ile, afet atıklarının toplanması, geçici depolama alanlarına taşınması, atıkların sınıflandırılması ve kodlanması gibi süreçler düzenlenmiş ve afet atık yönetimine kısa süre içinde müdahale edilmiştir [18].

Betonarme yapılardaki hasarlar, genellikle yapısal olmayan duvarların çökmeleri ve betonarme çerçeve elemanlarının kırılmaları olarak iki ana gruba ayrılabilir. Depremler sırasında bu tür hasarların büyük bir kısmı, kullanılan malzemelerin kalitesizliği ve depreme karşı yeterli süneklik sağlanmayan detaylardan kaynaklanmaktadır. İncelenen yıkılmış binalar, betonarme moment-çerçeve sistemlerinde sismik tasarımın ya hiç yapılmadığını ya da çok az uygulandığını göstermektedir. Betonarme yapılarda, depreme karşı dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanılabilecek perde duvarların eksikliği dikkat çekmektedir. Çoğu binada, cephe duvarları ve iç kısımlarda dolgu duvarlar tercih edilmiştir. Ayrıca, beton kalitesindeki düşük seviyeler ve yapısal elemanların yetersiz detaylandırılması, bu yapıların daha kırılgan hale gelmesine yol açmıştır. Kolon-kiriş bağlantılarındaki kesme sıkıntıları ve eksik donatı, binaların dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir. L'Aquila depremi, betonarme binalarda detayların zayıf olduğunu ve bu yapıların beklenen performansı gösteremediğini ortaya koymuştur.

Yığma yapılar, tarihsel olarak en eski yapı türlerinden biri olup, özellikle düşük katlı binalarda hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçmişteki depremler, yığma yapıların zayıf yönlerini ortaya koymuş ve bu konuda yapılan araştırmalar, yapı mühendisliğine önemli bilgiler sunmuştur. Birçok yığma bina tarihi özelliklere sahip olup, inşa kalitesi genellikle düşük olmuştur. L'Aquila'nın kırsal alanlarındaki diğer taş yapılar da çoğunlukla moloz taş veya ağır bloklarla inşa edilmiş ve bu yapılar çoğunlukla mühendislik açısından zayıftır. Bağlantısız iç ve dış duvarlar, yapısal sorunlara yol açmıştır. Ayrıca, çapraz duvarların kötü bir şekilde bağlanması ve köşe noktalarındaki yığma birimlerin uyumsuzluğu, depreme

dayanıklılığı zayıflatmıştır. Bu durum, deprem anında duvarların ayrılmasına yol açabilmektedir [32].

Bu depremden sonra yaklaşık olarak 2.650.000 m³ atık ortaya çıktığı belirlenmiştir. Olayın sonrasında hızlı bir atık yönetimi sağlamak amacıyla bir Bakanlık Kararnamesi çıkarıldı ve geri dönüşüm oranlarını artırmak için çalışmalar başlatıldı. Ancak, enkaz kaldırma operasyonları hala tamamlanmamıştı. Moloz arıtılmasının ardından geri dönüştürülmüş agregaların potansiyel kullanımı çevresel dolgular ve kapalı ocakların rehabilitasyonu gibi sınırlı alanlarla kısıtlanmıştı. Bu plan, yaklaşık 935.000 m³ geri dönüştürülmüş agreganın yerleştirilebileceği alanı hedeflemişti. Ancak, bu tür bir plan teorik beklentilerle karşılaşıp sınırlamalara takıldı. Atık yönetim stratejisinde, belediyeler teknik ve ekonomik kaynak eksiklikleri nedeniyle enkazları tamamen kaldırmaya devam edememişlerdir. Enkaz yönetim süreci başlamış olsa da, bir yıl sonra bile tarihi merkezin büyük bir kısmı hâlâ enkazla dolu olduğu görülmüştür [33].

2.8.2. Deprem ülkelerinde betonarme kullanımının karşılaştırılması

Japonya, Şili ve İtalya'daki betonarme yapılarda meydana gelen hasarların incelenmesi, yapım ve kullanım aşamalarındaki hata paylarının bu tür hasarlara yol açtığını göstermektedir. Şili'deki çoğu bina betonarme ile inşa edilmiştir. Depremler sırasında bu yapılar da zarar görmüştür. Ancak, güçlendirilmiş kolon ve zayıf kiriş sistemi gibi yeni yöntemler, betonarme yapılarda daha dayanıklı tekniklerin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Japonya'da betonarme genellikle az katlı yapılarda kullanılmış ve genellikle alt katlar işyeri, üst katlar ise konut olarak tasarlanmıştır. Bu işlevsel fark, binalarda yumuşak katların oluşmasına neden olmuş ve depremler sırasında bu durum önemli bir zayıflık yaratmıştır. İtalya'daki betonarme yapılar ise, özellikle kalitesiz malzeme ve yetersiz süneklikle ilgili sorunlar nedeniyle ciddi hasar görmüştür. İncelemeler, çok az sismik tasarımın uygulandığını ve perde duvarların çoğu çok katlı binalarda kullanılmadığını ortaya koymuştur [34].

Bu üç bölgedeki betonarme hasarları, proje ve denetim süreçlerinin güçlendirilmesi gerektiğini, malzeme kalitesinin daha sıkı kontrol edilmesi gerektiğini ve deprem bölgelerinde daha dayanıklı tasarımlar yapılması gerektiğini göstermektedir. Bu dersler, yeni mevzuatların geliştirilmesine yol açmıştır. Şili, çelik üretimini artırarak ve eksik kalan

yerleri ithalatla tamamlayarak çelik kullanımına ağırlık vermiştir. Ayrıca, mevcut betonarme sistemlerde de iyileştirmeler yapılmıştır [21].

2.8.3. Deprem ülkelerinde çelik kullanımının karşılaştırılması

Şili'de yapısal çelik binaların maliyeti yüksek olup, bunun nedeni yapısal olmayan kaplama malzemelerinin teminindeki zorluklar ve ülke içindeki ağır yapısal çelik bölümlerinin haddelenmemesidir. Ancak, deprem sonrası çelik üretimi artırılmış ve dışarıdan ithalat yapılmıştır. Japonya'da ise çelik yapılar, yanlış sistem seçimleri, hatalı detaylandırma ve imalat hataları nedeniyle depremde zarar görmüştür. Japonya, çeliği sıkça kullanan bir ülke olup, hem çelik üretimi hem de uygulama açısından dünyadaki en gelişmiş ülkelerden biridir. Bu başarı, yapısal çelik ve diğer çelik malzemelerinde yapılan kapsamlı Ar-Ge çalışmalarıyla elde edilmiştir. Japonya'da her yıl 600.000 konut inşa edilmekte ve bu konutların %40'ı çelik konstrüksiyonlardan oluşmaktadır. Deprem bilincine sahip bu ülkede, sağlam birleşim detayları sayesinde depreme dayanıklı bir yapı tipolojisi geliştirilmiştir. İtalya'da ise çelik yapı örnekleri oldukça nadirdir; burada genellikle betonarme ve yığma taş kullanımı tercih edilmiştir [28]. İncelenen ülkelere ve yapı malzemelerine göre karşılaştırmaları aşağıdaki Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Şili, Japonya ve İtalya'nın deprem öncesindeki ve sonrasındaki yapı tipolojileri ve hasar durumları

Ülkeler	Depremler Öncesindeki Yapı Tipolojisi	Hasar Durumu	Depremler Sonrasındaki Yapı Tipolojisi	Hasar Durumu
Şili	-Kil tuğla -Kerpiç -Kereste -Beton	Ağır hasarlı	-Çeliğe yoğunluk verilip, zayıf kiriş güçlü kolon uygulamasıyla çelik ve betonarme yapılara ağırlık verilmesi	Az hasarlı
Japonya	-Betonarme -Ahşap ve toprak esaslı geleneksel malzemeler ağır çatı ve kayar bölme duvarlarla birarada	Ağır hasarlı	-Beton da kullanılmakla birlikte çelik yapılara oldukça ağırlık verilip yapım tekniklerinde iyileştirmeler yapılması	Az hasarlı
İtalya	-Taş -Tuğla -Betonarme	Ağır hasarlı	-İyileştirilmiş tekniklerle taş ve betonarme olduğu gibi çelikler de kullanılması	Az hasarlı

2.9. Yapısal atıkların performans değerlendirmesi

Yapı malzemeleri, kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra tekrar değerlendirilebilmek için çeşitli işlemlerden geçirilmektedir. Ancak bu süreçte yaşanan aksaklıklar, döngünün sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Çelik ise doğrudan yeniden kullanılabilme özelliği sayesinde, diğer malzemelere kıyasla daha avantajlı bir konuma sahiptir. Kaynak tüketimini azaltmasının yanı sıra, gömülü enerji ve karbon salımını en aza indirerek çevresel etkileri minimize etmektedir. Bu sayede çelik, yapı sektöründe hem ekonomik hem de sürdürülebilir bir çözüm sunarak küresel ölçekte çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Yapı malzemeleri, kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra yeniden değerlendirilmek için çeşitli işlemlerden geçmek zorundadır. Ancak bu süreçlerde yaşanan aksaklıklar, malzemelerin döngüsel kullanımı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Çelik, doğrudan tekrar kullanılabilme özelliği sayesinde diğer yapı malzemelerine kıyasla daha avantajlıdır. Hem kaynak tüketimini azaltması hem de gömülü enerji ve karbon salımını minimize etmesi, çeliği sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında öne çıkarır. Bu özellikleriyle çelik, yapı sektöründe hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli bir çözüm sunar.

Yapısal atıkların geri dönüşüm süreçleri ve ürünleri incelenip, deprem ülkelerindeki malzemelerin de kullanımı göz önünde bulundurulduğunda çeliğin önemli iki faydası görülmüştür:

- Çelik yapılar, hafif ve esnek yapısıyla depremlerde yıkılma riskini azaltır. Zemine uyguladığı yük daha düşük olduğundan, depremin etkileri de hafifler. Bakım gereksiniminin az olması, korozyon ve çürüme riskini en aza indirerek ömrünü uzatır. Betonarmeye kıyasla daha dayanıklı ve sürdürülebilir olan çelik, özellikle deprem bölgeleri için güvenli bir alternatiftir [4].

- Her ne kadar üretiminde yüksek enerji gerektirse de, yapısal atık olarak pazara kazandırılması yeniden değerlendirilmesinin daha kolay olması, sağladığı ekonomik ve çevresel faydaları açısından uygun bulunmuştur [13].

3. ÇELİĞİN ATIK YÖNETİMİ

Çelik, küresel ölçekte geri dönüştürülmesi en kolay yapı malzemelerinden biridir. Çelik hurdası, %100 oranında yeniden işlenerek çelik malzemeye dönüştürülebilir ve doğru üretim teknikleriyle hem güvenilir hem de ekonomik bir seçenek sunar. Çelik malzemenin tekrar kullanılabilir olması, bir yapının sökülüp başka bir yerde yeniden kurulabilmesini sağlar, bu da malzeme kaybı olmadan sürdürülebilir inşaat çözümleri sunar [28].

3.1. Çeliğin Kullanım Avantajları

Çeliğin mimari açıdan tercih edilmesinin birkaç önemli nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, şeffaflık ve hafiflik özellikleri, tasarımlarda geniş açıklıkların ve büyük cam yüzeylerin kullanılmasına olanak verir. Ayrıca, çelik malzeme, mimari özgünlüğü artırarak tasarımda esneklik sağlamakta ve serbest form yaratılmasına imkan tanımaktadır. Bu özellikler, özellikle modern yapıların estetik açıdan daha yaratıcı ve fonksiyonel olmasını sağlar. Çelik, aynı zamanda mekandan tasarruf sağlayarak yapının daha verimli kullanımını desteklemektedir.

Aynı özelliklere sahip bir çelik yapı, betonarmeye kıyasla %50 daha hafif olur. Çeliğin hafif ve dayanıklı olması, yüksek çekme ve basınç mukavemetlerine sahip olmasından dolayı çelik taşıyıcılı yapılar, deprem bölgelerinde tercih edilmektedir. Ayrıca, çelik iskeletli yapılarda kolon ve kiriş gibi strüktürel bileşenler, modern üretim teknikleriyle fabrikalarda üretilir, bu da montaj hatalarını en aza indirir. Fabrikalarda kontrol altında üretilen bileşenler, depremsel dayanımı artıran önemli bir faktör olarak öne çıkar. Çelik yapı bileşenleri montajı tamamlandığı andan itibaren tam yükle çalışmaya başlar, beton ise taşıyıcı özelliğini kazanmak için belirli bir süre beklemeyi gerektirir.

Yapısal çelik, şantiyeye gelmeden önce fabrikalarda üretilir ve bu üretim süreci, betonarme yapımlara kıyasla daha hızlı bir inşaat süreci sağlar. Önceden üretilen bileşenler kullanılarak yapılan bu inşaat yönteminde, şantiyedeki işçi sayısı ve hareketlilik azalır. Ayrıca, çeliğin hafifliği sayesinde temel maliyetlerinde düşüş sağlanır ve deprem dayanıklılığına sahip yapılar daha ekonomik şekilde inşa edilebilir. Yapısal çelik kullanımı, iskele ve kalıp ihtiyacını ortadan kaldırarak, kalıp maliyetlerini de azaltır. Çeliğin üretim

süreci, kötü hava koşullarından etkilenmeden devam edebildiği için daha verimli bir inşaat süreci sunar. Modern üretim teknolojileriyle üretilen yapısal çelik, yüksek hassasiyet, güvenlik ve verimlilik sağlar, nakliyesi ise oldukça kolaydır. Çelik çerçeveli yapılarda mekanik sistemlerin entegrasyonu da daha hızlı ve kolay gerçekleşmektedir [35].

3.2. Çeliğin Deprem Performansındaki Avantajları

Çelik, yüksek dayanımlı ve hafif bir malzeme olduğu için, taşıyıcı sistemi çelik olan binalarda öz ağırlığı taşıdığı yükle karşılaştırıldığında daha düşük olur, bu da yapının toplam ağırlığını azaltarak depreme karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Deprem sırasında yapının ağırlığının az olması arzu edilen bir özellik olarak öne çıkar. Ayrıca, çelik malzeme, betona oranla 10 kat daha fazla esneklik gösterdiği için deprem titreşimlerine, dinamik yüklere ve stabilite sorunlarına karşı uygun bir şekilde davranır. Çeliğin sünek (esnek) yapısı, tekrarlayan yüklere karşı kırılmadan dayanabilmesini sağlar, bu da onu depreme karşı dayanıklı kılar. Deprem sırasında çelik malzeme, yatay yükler karşısında büyük deformasyonlarla dayanım gösterir. Taşıyıcı sistemin çelik olduğu yapılarda birleşim noktalarının dönebilir olması, dinamik enerjiyi azaltarak yapıya destek sağlar. Çelik taşıyıcı ve çelik çerçeveli yapılar, deprem sonrası betonarme yapılara kıyasla daha az hasar görür ve büyük yıkımlar veya sökme takma işlemleri gerektirmeksizin ekonomik şekilde onarılabilir [28].

3.3. Çeliğin Kullanım Dezavantajları

Çelik, kullanım olarak çok fazla avantaja sahip olmakla birlikte bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Korozyon çelik için oldukça önemli bir konudur. Korozyona karşı hassasiyeti, nem ve hava koşullarına maruz kaldığında paslanma riskini artırır. Bu nedenle, özellikle dış mekânlarda kullanıldığında düzenli bakım yapılması ve koruyucu kaplamalar uygulanması gerekmektedir. Isıya duyarlı olması sebebiyle, yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybına ve genleşmeye yol açarak yapısal bozulmalara sebep olabilir. Yangın durumunda betonarme yapılara kıyasla daha hızlı zayıfladığı için ek koruyucu önlemler alınması gerekmektedir. Maliyet açısından bakıldığında, çelik üretimi, işlenmesi ve montajı betonarmeye göre daha pahalı olabilir. Özel alaşımlar ve kaplamalar gerektiğinde bu maliyet daha da artmaktadır. Gürültü ve titreşim iletimi, çelik yapıların ses ve titreşimi daha fazla aktarmasına neden olur, bu yüzden yalıtım önlemleri alınmalıdır. Ayrıca, uzman işçilik

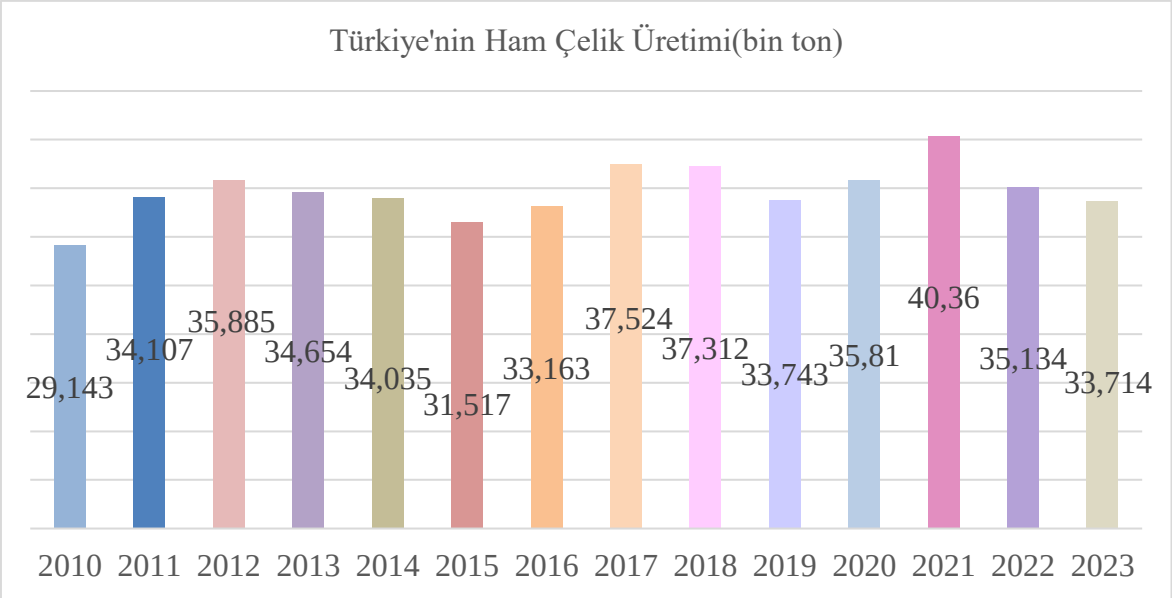
gereksinimi, çeliğin özel kaynak teknikleri ve montaj detayları gerektirmesi sebebiyle nitelikli iş gücüne olan ihtiyacı artırmaktadır [36]. Çizelge 3.1'de çeliğin kullanım avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1. Çeliğin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması

Çelik Kullanımının Avantajları	Çelik Kullanımının Dezavantajları
Yüksek dayanıklılık ve mukavemet	Korozyon riski
Hafiflik ve esneklik	Isıya ve yangına karşı duyarlılık
Hızlı ve kolay montaj	Yüksek üretim maliyeti
Sökülerek yeniden kullanılabilme	Gürültü ve titreşim iletimi
Profabrikasyon imkanı	Bakım gereksinimi
Büyük açıklık geçilebilmesi	Isı yalıtımında zayıflık
İnşaat atığının daha az olması	
Özel kaplamalarla yangına dayanıklı hale gelmesi	

3.4. Türkiye'de Demir Çelik Sektörü

2021 yılında Türkiye, tüm zamanların en yüksek ham çelik üretimini gerçekleştirmişken, 2022 ve 2023 yıllarında iç ve küresel pazarlardaki rekabet gücünü kaybetmesiyle üretimde belirgin bir azalma yaşanmıştır. 2021'de 40.4 milyon ton olan üretim, 2022'de %12.9 oranında düşerek 35.1 milyon tona gerilemiş, 2023'te ise bu düşüş devam ederek üretim 33.7 milyon tona inmiştir. Küresel sıralamada, Türkiye 2022'de 8. sıraya gerileyerek Almanya'ya 7. sırayı bırakmış, 2023'te sıralamada bir değişiklik olmamıştır. Enerji fiyatlarının artışı, çelik fiyatlarının düşüşü ve Türk Lirası'nın değer kaybı, iç pazarda belirsizliklere yol açmış ve üretimdeki düşüşü hızlandırmıştır. 2022'de enerji fiyatlarının yükselmesi, Türkiye'nin elektrik ark ocaklarıyla ürettiği ham çeliğin maliyetlerini artırmış, 2023'te enerji fiyatları düşse de bu azalma üretim maliyetlerine tam olarak yansımamıştır. Artan elektrik maliyetleri, yerli üreticilerin küresel pazarda rekabet gücünü zayıflatmış ve 2023 Şubat ayında meydana gelen büyük deprem, bazı üretim tesislerinde kesintilere neden olarak üretimi olumsuz etkilemiştir [37]. Dünya genelinde sıralaması böyleyken 2010 yılından 2023 yılına kadarki üretim grafiği Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Türkiyenin ham çelik üretimi [37]

Avrupa'da hızla ön plana çıkan "yeşil çelik" yaklaşımı, 1990 yılına kıyasla 2030 yılına kadar çelik üretimindeki karbon salımını %30, 2050 yılına kadar ise %95 oranında düşürmeyi hedeflemektedir. Bu gelişme, Avrupa pazarına çelik ihracatı yapan Türkiye'nin sektörünü doğrudan etkileyecektir. Avrupa Birliği'nin Yeşil Mutabakat çerçevesinde belirlediği karbonsuzlaşma hedefleri, Türkiye'nin çelik ihracatını önemli ölçüde etkileyecek ve dış ticaretin en kritik başlıklarından biri haline gelmesi düşünülmektedir. Bu bağlamda, Türkiye'nin çelik sektöründe sürdürülebilirlik ve karbonsuz üretim için yapacağı yatırımları artırması ve Avrupa'nın Yeşil Mutabakat standartlarına uygun üretim gerçekleştirmesi gerekmektedir [37].

3.4.1. Türkiye'de çelik üretici firmalar

Demir çelik üretiminde Türkiye iyi bir üreticidir. 2023 yılı istatistiklerine bakılarak dünyadaki çelik üreticilerinde ilk 100 sıralamasına giren 3 çelik firmalarının dünyadaki sıralamaları ve genellikle üretim yaptıkları alanlar Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

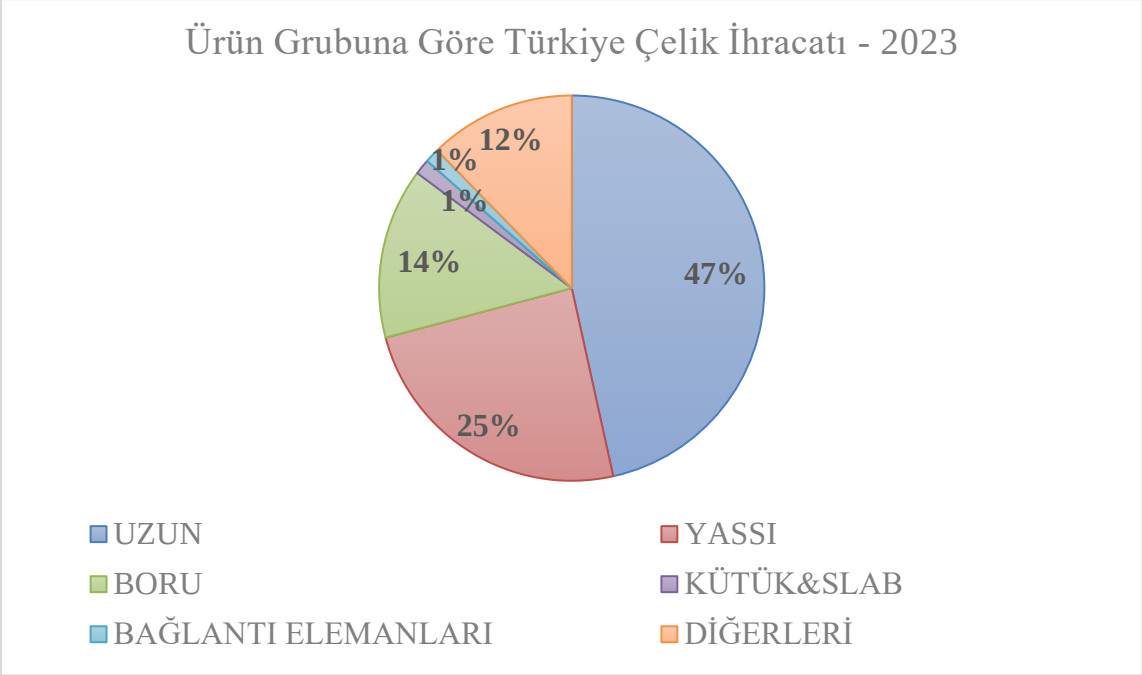
Çizelge 3.2. Türkiye'deki dünya sıralamasına giren çelik firmaları [38]

Firma Adı	Üretim Alanı	Dünyadaki Sıralaması
Erdemir Group	inşaat, gemi inşa ve enerji santralleri	52
Tosyalı Holding	İnşaat, beyaz eşya, otomotiv, savunma	63
Habaş	İnşaat, beyaz eşya ve otomotiv	87

Türkiye'nin hem yurt içinde hem de yurt dışında en fazla ihracat yaptığı sektörler arasında otomotiv, yedek parça, makine ve ekipmanları, tekstil ve hazır giyim, kimyasal ürünler, demir-çelik, gıda ve mobilya öne çıkmaktadır. Özellikle demir-çelik sektörü, Türkiye'nin ihracat ettiği ürünler arasında önemli bir yer tutmakta olup, inşaat demiri, çelik borular, çelik levhalar ve profiller en çok ihraç edilen ürünler arasında yer almaktadır. Bu sektörde İzmir, Sivas ve Zonguldak'taki sanayi bölgeleri büyük bir üretim kapasitesine sahip olup, her yıl birçok ülkeye yüksek miktarda demir-çelik ihracatı gerçekleştirilmektedir. Türkiye'nin üretici ve ihracatçı kimliği, küresel pazarda rekabet gücünü artırarak sektördeki konumunu güçlendirmektedir [39].

3.4.2. Çelik firmalarının ürün grupları

Türkiye'nin en çok ihraç ettiği çelik kategorilerinde uzun, yassı ve boru ürünler vardır. Özellikle inşaat ve altyapı projelerine yönelik uzun çelik ürünlerde güçlü bir dış talep yakaladığını ve yassı malzemelerde ise Avrupa başta olmak üzere geniş bir pazar hâkimiyeti mevcuttur. Çelik üretim grupları ve dağılımları Şekil 3.2'de incelenmiştir.



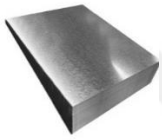
Şekil 3.2. Ürün gruplarına göre Türkiye çelik ihracatı [40]

Çelik ürünleri farklı kategorilere ayrılmaktadır. Uzun çelik ürünleri arasında inşaat çeliği, profiller, filmaşin, tel, alaşımlı çubuk ve profiller yer almaktadır. Bu grupta en yüksek üretim oranına %49,9 ile inşaat çeliği sahipken, onu %24 ile profiller takip etmektedir. Yassı çelik ürünleri içinde sıcak haddelenmiş ürünler %49 ile en fazla üretilen grup olurken, ardından yassı kaplama, soğuk haddelenmiş, alaşımlı ve paslanmaz yassı çelikler gelmektedir. Boru ürünleri incelendiğinde %93 oranında dikişli borular ön plana çıkarken, dökme demir borular, dikişsiz borular ve bağlantı parçaları diğer bileşenleri oluşturmaktadır. Diğer çelik ürünleri arasında ise %51,8 ile inşaat aksamı başı çekerken, hurda, bağlantı elemanları, depolama tankları, ray ve malzemeleri önemli yer tutmaktadır [40].

3.4.3. Mimarların çelik ürün gruplarını kullanımı

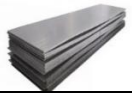
Çelikler projelerde kullanılırken her projenin ihtiyaçları ve teknik gereklilikleri için farklı çelik malzeme grupları kullanılmaktadır. Paslanmaz, karbon, galvanizli, alaşımlı ve corten olmak üzere farklı üretim sınıfları vardır. Bunların sınıflandırılması, malzeme özellikleri, sıklıkla kullanılan alanları ve mimarın malzemelerdeki kullanım amaçları ve müdahaleleri Çizelge 3.3'te incelenmiştir.

Çizelge 3.3. Çelik üretim malzemeleri ve kullanım amaçları [41]

	Malzeme Özelliği	Yaygın Kullanım Alanları	Mimarın Müdahalesi
Paslanmaz Çelik 	-Dayanıklı -Uzun ömürlü -Estetik görünüş -Paslanmaya dirençli	-Dış cepheler -Korkuluklar -Merdivenler -Kapı kolları -Yüzey kaplamaları	-Estetik amaçlı şekillendirilebilir -Farklı yüzey dokuları -Parlaklık seviyeleriyle farklı görsel etkiler -Modüler sistemlerde ve modern yapılarda yapısal eleman
Karbon Çelik 	-Dayanıklı -Kolay şekillendirilebilme	-Yapısal çelik elemanlar (kirişler, direkler, çerçeveler) -Dış cepheler -Metal paneller -Çelik iskelet yapılar ve döşeme sistemleri	-Büyük ölçekli ticari ve endüstriyel yapılarda iskelet sistemi -Modern ve endüstriyel tarzdaki projelerde, estetik görünüm için açıkta bırakılan kirişler ve kolonlar
Galvanizli Çelik 	-Çeliğin üzerine çinko kaplama -Paslanmaya dirençli -Zorlu koşullara dayanıklı	-Dış mekan yapıları -Çatılar, teraslar -Dış cepheye kaplamaları -Endüstriyel yapılar	-Dayanıklı ve estetik görünüm -Ahşap ve taş gibi doğal malzemelerle de estetik uyum
Alaşımlı Çelik 	-Karbon çeliğe ek krom,nikel, molibden gibi alaşım elementleri içermesi -Yüksek mukavemet -Yüksek korozyon direnci	-Yüksek dayanıklılık gerektiren yapısal elemanlar -Özel tasarımlar, köprüler, yüksek binalar ve şasi sistemleri	-Büyük yapılar için ihtiyaç duyulan yüksek mukavemetli çözümler -Estetik açıdan zarif ve dayanıklı yapı elemanları oluşturmak
Corten Çelik 	-Yüzeyuinde koruyucu pas tabakası oluşturmasıyla korozyona direnç -Hava şartlarına karşı dayanıklılık -Uzun süre kullanım	-Cephe kaplamaları -Peyzaj mimarisi -Heykel ve anıtlar -Saçak detayları -Dış mekan ürünleri	-Malzemenin yaşlanma süresinin estetik görünüme dönüşmesi -Bakım gerektirmemesi

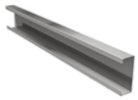
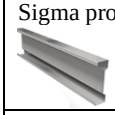
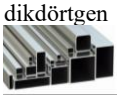
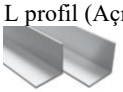
Çelik malzemeler ürünlere dönüşürken de farklı şekillerde ürünlerle ortaya çıkmaktadır. Kullanılacak projelere göre ürün tipleri de farklılık göstermektedir. Dönüşen ürün tipleri, yaygın kullanım alanları ve detaylı incelemesi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çelik ürünler [42]

	Ürün Özelliği	Yaygın Kullanım Alanları	Mimarın Müdahalesi
Çelik Profil 	-I profili -U profili -H profili Köşe profili -Z profili -T profil -Sigma profil -Kutu profil -Boru profil	-İnşaat yapılarındaki taşıyıcı sistemler (çelik iskelet yapılarında, çatı sistemleri ve köprüler) -İnşaat yapılarındaki taşıyıcı olmayan sistemler	-Yapıların taşıyıcı sistemlerinde temel bileşenler -Estetik açıdan minimal bir görünümle açıkta bırakılması -Özgün bir tasarım imkanı
Çelik Levhalar 	-Minimal ve hafif -Çeşitli yüzey tanımları	-Cephe panelleri -İç mekanlar ve modern tasarımlar	-Hafif ve zarif tasarımlar -Estetik ve işlevsel açıdan farklı şekiller

Çelik ürünler, inşaat sektöründe yapı elemanlarının işlevsel gereksinimlerine yanıt verecek şekilde farklı kesit ve profil türlerinde üretilmektedir. Bu profiller, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan ana elemanlar (kolon, kiriş, çaprazlama gibi) ya da taşıyıcı olmayan tamamlayıcı elemanlar (cephe sistemleri, bağlantı detayları, korkuluklar vb.) olarak sınıflandırılabilir. Kullanım amacına bağlı olarak çelik profillerin şekli, boyutu, kesit kalınlığı, üretim yöntemi ve yüzey işlemleri farklılık gösterir. Örneğin; H ve I profilleri yüksek taşıma kapasitesi ile ağır yük taşıyan ana taşıyıcı sistemlerde tercih edilirken, L, C, U ve düz lama profilleri daha çok bağlantı elemanı ya da ikincil sistemlerde kullanılır. Ayrıca, yapım tekniği açısından sıcak hadde, soğuk şekillendirme ya da kaynaklı üretim gibi farklı imalat yöntemleriyle elde edilebilmektedir. Bu çeşitlilik, mimari tasarım sürecinde hem yapısal hem estetik kararların daha esnek şekilde alınmasına olanak tanımaktadır. Kullanılan profiller ve özellikleri Çizelge 3.5'te özelliklerine ve şekillerine göre ayrılmıştır.

Çizelge 3.5. Üretilen çelik profillerin özellikleri ve kullanım alanları [42]

Çelik Profiller	Özellikleri
H profil 	-Geniş başlıklı I profili -Güçlü taşıma kapasitesi -Farklı et kalınlığı ve yüksekliğe göre farklı çeşitli -I profile göre daha dayanıklı -Ağır
HEA	-H profillere nazaran daha hafif, dayanım olarak daha az yük taşıyan yapılarda kullanım
HEB	-Orta ağırlıktaki H profil -Hem dikey hem yatay taşıyıcılarda kullanım -HEA'ya göre daha yüksek dayanım
HEM	-Et kalınlığı ve başlığının genişliği daha fazladır. Ağır bir H profil türüdür. Büyük açıklıklar ve ağır yükler için kullanılır.
I profil 	-H profile göre başlıkları orta genişlikte -Yüksek taşıma kapasitesi -Farklı et kalınlığı ve yüksekliğe göre farklı çeşitli -Ağır
IPE	-Başlığının genişliği IPN'ye göre daha geniş -İnce hafif olması sebebiyle genellikle çatı kirişleri ve kat döşemelerinde kullanım
IPN	-Başlığı biraz daha geniş -Daha yüksek mukavemet gerekli yerlerde kullanım
C profil 	-Ana taşıyıcı olarak zayıf -Destek eleman olarak mukavemeti iyi -Duvar ve zemin sistemlerinin desteklenmesi, prefabrik yapılarda bölme duvarlar, iklimlendirme tesisleri, kaplama işlemleri, izolasyon, asma tavan sistemleri, giydirme duvar sistemleri, cephe kaplamalarında kullanım
Sigma profil 	-Hafif çelik ev üretiminde ve endüstriyel uygulama alanlarında yaygın kullanım -Demonte olarak üretim -Kanallı yapısından dolayı kolay ankre özelliği -Hafiflik
Z profil 	-Hafif -İnşaat, çelik yapı, hafif çelik yapı, otomotiv, elektrik-elektronik, metal eşya, enerji, cephe, çatı, konstrüksiyon v.b. sektörlerindeki endüstriyel yapılarda kullanım -Çelik yapılarda taşıyıcı ya da yardımcı eleman -Ağır hadde profil malzemeleri ile üretilmiş yapılara göre malzeme ve fiyat avantajı
U profil 	-Çerçeve yapılarında, destekleyici elemanlarda ve kaplama alt yapılarında kullanım
UPN	-Başlık kalınlığı uç noktaya yaklaştıkça azalır -Genellikle ikincil taşıyıcı sistemlerde kullanım
UPE	-Başlığı daha geniştir ve mukavemeti daha fazla
Kutu profil (Kare ve dikdörtgen kesit) 	-Hafif ve orta yük taşıma kapasitesine sahip -Estetik ve modern yapılarda kullanım -Cephe sistemleri, korkuluklar, kaplama alt yapıları
Boru profil 	-Yuvarlak, kare veya dikdörtgen kesitli -Hafif çelik yapılar, dekoratif elemanlar, taşıyıcı olmayan sistemlerde kullanım
L profil (Açı profili) 	-Köşe bağlantıları, destek elemanları ve yardımcı taşıyıcı sistemlerde kullanım -Genellikle ikincil taşıyıcı sistemlerde ve güçlendirme amaçlı kullanım
T profil 	-Kiriş bağlantılarında, özel detay çözümlerinde ve bazen estetik amaçlarla kullanım
Lama 	-Taşıyıcı değil, tamamlayıcı bir çelik profildir. -Mimari detaylar ve alt sistem bağlantılarında işlevseldir. -Estetik bir malzeme olarak yalın, rasyonel ve teknik görünümlü tasarımlara uygundur. -Maliyeti düşük, uygulanabilirliği yüksek bir profil türüdür.

Mimar tasarımındaki her bir çizgiyi düşünmek durumunda olduğu için projesinde de hangi çelik profilinin projesine uygun olduğu ve tasarımında nasıl duracağı hakkında fikir sahibi olması gerekmektedir. Örneğin aşık gibi, ataleti tek yönde önemli olan ve hafif olması gereken bir profil seçilmesi gerekiyorsa, başlığı orta genişlikte olan bir I kesitli profil veya U kesitli profil tercih edilebilir. Bu tür kesitler, eğilme dayanımını artırırken malzeme ağırlığını optimize ederek yapının taşıyıcı sistemine gereksiz yük bindirmez. Kolonlar için yalnızca normal bir I profili tercih edilirse, yalnızca tek yönde yeterli rijitlik sağlanırken diğer yönde yetersiz kalabilir. Ancak, kolonlar her iki yönde de yüksek atalet ve mukavemet momentine sahip olmalıdır. Bu nedenle, daha ağır ve rijitliği yüksek olan HEA, HEB veya HEM profillerinin kullanılması daha uygundur. Profillerin de uygulama detaylarında tasarımı etkilemesi ve yapımda da malzeme satin alırken gereksiz bir ödeme yapılmaması adına her ne kadar mühendislerin hesap yapması önemli olsa da mimarların da rolü önemlidir [42].

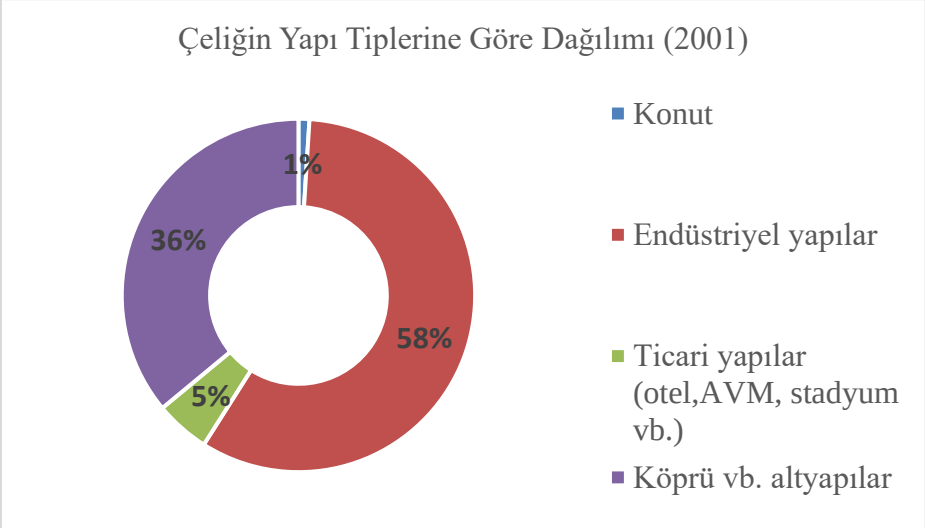
3.5. Çeliğin Kullanıldığı Yapı Alanları

Çelik, yapı sektöründe çok yönlü bir malzeme olarak farklı ölçek ve işlevdeki projelerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Endüstriyel tesislerden konut yapılarına, yüksek katlı ofis binalarından köprü ve altyapı projelerine kadar geniş bir yelpazede yer bulur. Her projenin işlevsel ihtiyaçları, yapının ölçeği, maruz kaldığı yükler ve tasarım hedefleri birbirinden farklı olduğu için, kullanılan çelik elemanların türü, kesiti ve birleşim detayları da bu gereksinimlere göre değişiklik göstermektedir. Örneğin; yüksek rijitlik ve taşıma kapasitesi gerektiren çok katlı yapılarda çelik çerçeve sistemleri tercih edilirken, açıklık geçme ya da hafiflik gerektiren geçici strüktürlerde daha hafif çelik profiller veya modüler sistemler kullanılabilir. Bu farklılıklar, çeliğin esnek tasarım potansiyeli sayesinde mimari açıdan da çeşitlilik sunmasına olanak tanır. 2015 yılında Türk Yapısal Çelik Derneği (TUCSA) tarafından düzenlenen çelik yapıların sınıflandırılması Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

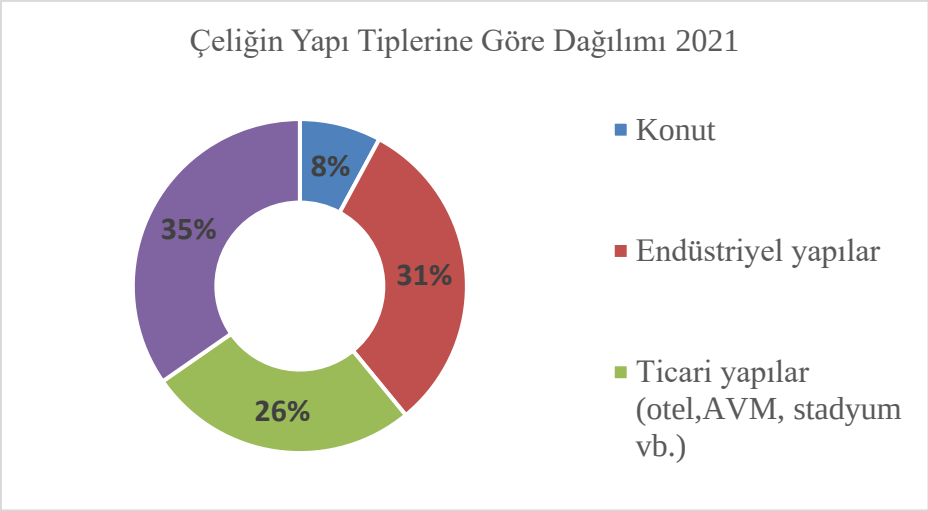
Çizelge 3.6.Çelik yapıların sınıflandırılması [43]

Kullanım Alanlarına Göre	1.Binalar (Üst Yapı)	a.Konut binaları b.Genel amaçlı binalar (1)Ticari ve kamusal binalar(Ofis binası, otel, AVM, hastane, okul, müze vb) (2)Ulaştırma tesisleri (Havaalanı, tren istasyonu, terminal binaları vb.) (3)Spor tesisleri(Stadyum, kapalı spor salonu) c.Sanayi binaları d.Diğer yapılar (Sundurma, açık Pazar, zirai ve depo binaları)
	2.Altyapı	a.Köprüler (Karayolu ve demiryolu köprü ve viyadükleri, yaya/bisiklet köprüleri, vb.) b.Kuleler ve direkler (1) Levhadan mamul RES kuleleri, (2) Profilden yapılma RES kule, ENH kule, direkleri vb. c.Diğer altyapı işleri (Baraj kapakları, istinat duvarı destek elemanları vb.)
Kat Sayılarına (Yüksekliklerine) Göre Binalar	a.Tek katlı binalar b.Az katlı binalar (10m'ye kadar) c.Orta yükseklikte binalar (10-27m) d.Çok katlı binalar (28-36m) e.Yüksek binalar (37-75m) f.Kule/gökdelen binalar	

Türkiye için çeliğin kullanıldığı alanlar yapı tiplerine göre incelenmiştir. Literatürde araştırma yapıldığında 2001 ve 2021 verilerine rastlanmıştır. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te yer alan grafiklerde başlıca göze çarpan detay, eskiden konutta kullanımı az alması ve genellikle endüstriyel yapılarda kullanılması iken son yıllarda konutlara da ağırlık verildiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.3. 2001 yılı Türkiye'de çeliğin yapı tiplerine göre dağılımı [44]



Şekil 3.4. 2021 yılı Türkiye'de çeliğin yapı tiplerine göre dağılımı [43]

Geçtiğimiz son 20 yılda çeliğe teşviğin olduğu ve kullanımda avantajlarının sadece endüstriyel yapılarda olmadığının farkındalığının yaşandığı görülmektedir. Ticari yapıların da yapımının artarak geniş açıklık geçme ihtiyacı doğması sebebiyle de çelik kullanımı bu alana da yönelmiştir.

3.6. Yapısal Atık Olarak Çelik

Çelik yapısal atık olarak iki durumda değerlendirilebilir. Birincisi geri dönüşüm süreçlerinden geçirilerek yeniden kullanılması, diğeri ise herhangi bir işlem sürecine girmeden direkt olarak yapı pazarına kazandırılarak doğrudan kullanılmasıdır [45].

Yapı tasarımında, malzemenin yaşam döngüsü sonunda nasıl değerlendirileceğinin önceden düşünülmesi, özellikle yeniden kullanım olanaklarını artırmak açısından önemlidir. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) kapsamında yer alan bu yaklaşım, birincil malzemelerin yeniden kullanılmasına imkân tanıyarak çevresel faydaların ekonomik kazanca dönüşmesini sağlar. Bu çerçevede, güncellenen Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPBD), inşaat sektöründe sıfır karbon hedefine ulaşmada döngüsel ekonomiyi önemli bir araç olarak ele almaktadır. Ayrıca, EN 15978 standardının son taslaklarında, yeniden kullanım ve hurda geri dönüşümü ayrı bölümler olarak değerlendirilmiştir. Geri dönüşümle karşılaştırıldığında, yeniden kullanımın çevresel avantajları pek çok yapı malzemesi için geçerlidir. Bu bağlamda çelik, yalnızca yeniden kullanılabilirliğiyle değil, aynı zamanda diğer malzemelerin döngüsel ekonomiye entegrasyonunda da kritik bir rol üstlenen anahtar malzeme olarak öne

çıkmaktadır. Hurda temelli çelik üretimi, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlarken, demir cevheri yerine hurda kullanılması çelik kalitesi üzerinde olumsuz bir etki yaratmaz ve enerji verimliliği açısından da avantaj sunar [46].

3.6.1. Çeliğin geri dönüşümü (recycle)

Çelik, geri dönüştürülebilen bir malzemedir ve bu süreç metallerin özelliklerini kaybetmeden defalarca tekrar yapılabilir. Geri dönüşüm, hem çevresel faydalar sağlar (enerji tasarrufu, doğal kaynakların korunması, daha az karbondioksit salımı) hem de ekonomik olarak tasarruf ve yeni istihdam fırsatları yaratır. Hurda metalin uygun fiyatı, geri dönüşümü yaygınlaştıran önemli bir etkendir. Geri dönüşümün farklı aşamaları Çizelge 3.7'deki gibi sıralanabilir [47].

Çizelge 3.7. Çeliğin geri dönüşüm süreci [47]

Toplama	-Çeliğin yüksek hurda değeri sebebiyle diğer malzemelerden farklılaşma -Amerika'da çoğunlukla hurda araçlardan elde edilip, diğer ülkelerde çelik yapılar, demiryolları, tarım ekipmanları ve tüketicilerden sağlanan hurdalarla temin edilmesi
Sıralama	-Karışık haldeki hurda çeliğin, mıknatıslar ve sensörler yardımıyla ayrılması -Ardından, otomatik geri dönüşüm işlemleriyle materyaller düzenlenip işleme aşamasına geçecek şekilde hazırlık yapılması
İşleme	-Çeliklerin, daha hızlı ve verimli bir işlem sağlamak amacıyla küçük parçalara ayrılması
Eritme	-Hurda çeliğin, büyük boyutlu fırınlarda eritilmesi
Arıtma	-Eritme işleminden sonra, çeliğin kalitesinin artırılması için içinde kalan yabancı metal türlerinin ayrılmak üzere arıtma yapılması.
Döküm	-Saflaştırılan ve karıştırılan çeliğin, çeşitli şekillerde dökülmesi -Döküm sırasında çelik, levha, çubuk veya boru gibi farklı formlara dönüştürülmesi
Katılaştırma	-Eritilen ve saflaştırılan çeliğin, soğutulup katı hale geldikten sonra taşınmasını ve kullanılmasını kolaylaştıracak şekilde bantlar halinde düzenlenmesi ve çubuklar haline getirilmesi
Test ve Kalite Kontrol	-Son ürünün, kalite kontrol testlerine tabi tutulması. -Bu testlerin, çeliğin dayanıklılığını, sertliğini ve diğer mekanik özelliklerini ölçmesi
Dağıtım ve Yeniden Kullanım	-Son olarak, geri dönüştürülmüş çeliğin, inşaat, otomotiv, enerji ve diğer sanayi sektörlerinde tekrar kullanılmak üzere dağıtılması

3.6.2. Çeliğin yeniden kullanılması (reuse)

Mevcut bir yapıdan çıkarılan çelik, tekrar yapı elemanı olarak kullanılabilir, bu da maliyetleri düşürerek ekonomik bir fayda sağlar. Ayrıca, yeniden kullanılan çelik çevresel açıdan büyük avantajlar sağlar çünkü neredeyse sıfır karbonlu bir malzemedir ve geri dönüşüme kıyasla daha yüksek verimlilik sunar.

Yeniden kullanım, inşaat malzemeleri için döngüsel ekonominin önemli bir parçasıdır. Çelik çerçeveler ve prekast beton paneller, tersine çevrilebilir cıvatalı bağlantılarla birleştiğinde kompozit olarak çalışabilir. Cepheler ve cephe kaplamaları, demontajı kolaylaştırmak ve uyarlanabilirlik sağlamak amacıyla çelik yapı elemanlarına sökülebilir şekilde bağlanabilir. Ancak, radyoaktivite, yangın, şiddetli korozyon, aşırı yorulma yükleri veya plastik deformasyona uğramış çelikler yeniden kullanılamaz; bu durumda geri dönüşüm önerilir [46].

Mevcut binalardan çıkan yapısal çeliğin yeniden kullanımı, EN 1090-2 standardının 5.1 maddesi ile mümkündür. Bu madde, çelik yapıların üretimi için kullanılan bileşenlerin Avrupa standartlarına uygun olmasını şart koşar, ancak uyumlaştırılmış standartlar kapsamında olmayan bileşenlerin kullanılmasına da izin verir, ancak bunların özelliklerinin belirtilmesi gerekmektedir. Özellikle, sertifikalar mevcut olduğunda EXC1 ve EXC2 binalarının bileşen ürünlerinin yeniden kullanılması mevcut binalar için güvenli bulunmaktadır.

Yeniden kullanım konusunda, İsveç yönergesi (MVR 2021) ve PROGRESS projesi gibi mevcut yönlendirmeler izlenmektedir. Bazı Avrupa Birliği (AB) üye devletleri, çeliğin yeniden kullanımına dair ulusal standartlar geliştirmektedir. Ancak (AB) düzeyinde uyumlu standartların oluşturulması gerekmektedir.

Mevcut binalardan çelik geri kazanımı, tasarımlarının yeniden kullanım için yapılmamış olmasından dolayı bazı zorluklarla karşılaşır. Yeniden kullanımın yaygınlaştırılması için dijital pasaportlar, optimize edilmiş sökme prosedürleri ve malzeme bankaları gibi yenilikçi sistemler gereklidir. Tedarik zincirindeki tüm aktörlerin hem mevcut hem de yeni binalar için yeniden kullanımı, iş birliği yaparak güçlü kurallar ve standartlar oluşturması, yeniden kullanımın etkin bir şekilde uygulanması için önemlidir [46].

EXC1 ve EXC2 sınıflarının tanımı

EXC1 ve EXC2, EN 1090-2 standardına göre tanımlanan “Yürütme Sınıfları”dır (Execution Classes) ve çelik yapı elemanlarının imalat ve montaj kalitesinin seviyesini belirler. Bu sınıflar, yapıların taşıdıkları risk, önem derecesi, kullanım amacı ve çevresel etkiler gibi

faktörlere göre belirlenir [48]. Çizelge 3.8'de bu sınıfların tanımları ve uygulama örnekleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. EN 1090-2 standardına göre tanımlanan yürütme sınıfları [48]

Sınıf	Tanım	Uygulama Örneği
EXC1	En düşük riskli yapı sınıfı	Tarımsal yapılar, geçici yapılar
EXC2	Genel binalar ve mühendislik yapıları	Konutlar, ticari binalar, hafif sanayi
EXC3	Daha yüksek güvenlikli yapılar	Köprüler, spor salonları, istasyonlar
EXC4	Özel güvenlikli ve kritik yapılar	Nükleer santraller, büyük köprüler

İkincil çeliğin avantajları

Çeliğin doğrudan kullanılması, ikincil çelik olarak yapı pazarına çıkmasıdır. Bunun çevresel, ekonomik ve tenik olarak faydaları bulunmaktadır. Çizelge 3.9'da üç ana kategoride avantajları incelenmiş olup yapılardaki yapım ve sonrasındaki sürecinde etkilerinden bahsedilmiştir.

Çizelge 3.9. İkincil çeliğin faydaları [49]

Çevresel Faydaları	-Yeni çelik için gerekli daha az CO_2 emisyonunu ve enerji tüketimi -Doğrudan kullanıldığı için üretim sırasında daha az atık oluşumu -Doğal kaynakların tüketilmesini önlemesi
Ekonomik Faydaları	-Yeni çeliğe kıyasla çok daha düşük maliyet -Demontaj ve yeniden kullanım imkanı -Depolama ve lojistik olarak daha çok avantaj -Hurda çelikteki fiyat dalgalanmalarından daha az etkilenim
Teknik Faydaları	-Uzun ömürlü ve dayanıklı olduğu için gerekli testlerden geçtikten sonra yeniden kullanım -Modüler yapılar ve prefabrik sistemlerde ikinci el çelik yaygın kullanım -Standart çelik profillerin kolayca tedarik edilmesi

İkincil çeliğin yeniden kullanım süreci

Çeliğin üretilip belli bir yapıdaki ömrünü tamamlayıp yeniden kullanılabilmesi için belli aşamalardan geçmesi gerekmektedir:

1. Değerlendirme ve İnceleme: Yapının ve çelik elemanların mevcut durumu detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Malzeme sertifikaları, üretim yılı ve önceki kullanım şekli gözden geçirilmelidir.

2. Demontaj ve Depolama: Çelik elemanlar, mümkün olan en az hasarla sökülmelidir. Pas ve korozyon gibi olumsuz etkilerden korunması için uygun koşullarda depolanmalıdır.

3. Test ve Sertifikalandırma: Tahribatsız testler (NDT), kimyasal analizler ve mekanik testler uygulanmalıdır. Çeliğin güvenilirliğini belgelemek ve sertifikalandırmak gerekmektedir.

4. Yeniden Kullanım ve Montaj: Yeniden kullanılan çelik, mühendislik hesaplarına ve tasarıma uygun şekilde projeye entegre edilmelidir. Kaynak, cıvata bağlantıları ve yüzey işlemleri gerektiğinde tekrar yapılabilir [5].

İkincil çeliğin yeniden kullanımında mimara düşen görevler

Yapı sökümü ile ilgili bilimsel araştırmalarda, tasarım aşamasında sökümün kolaylaştırılması için verimli yapı elemanlarının seçilmesi, bina katmanlarının tasarımı ve uygun tasarım dokümantasyonlarının oluşturulması gibi faktörleden bahsedilmektedir. Bu bağlamda tasarım ve yapım süreçlerinde uygulama detaylarında mimarların yapabileceği ve göz önünde bulundurabilecekleri bazı unsurlar şunlardır:

- Mimari projelerde, taşıyıcı sistem ve bina alt yapılarındaki karmaşıklığı en aza indiren, basit ve/veya modüler tasarımlar,
- Prefabrikasyon veya önceden montaj yapılabilen yapım tekniklerinin tercih edilmesi,
- Bina katmanlarının birbirinden bağımsız olacak şekilde ayrılması,
- Yüksek dayanımlı, yeniden kullanılabilen veya geri dönüştürülebilen malzemelerin seçilmesi,
- Kompozit malzemeler ve ikincil kaplama kullanılan ürünlerden kaçınılması,
- Kolay erişilebilen ve dayanıklı derzlerin tasarlanması,
- Standartlaştırılmış bağlantı detayları ve basit bağlantı tasarımları yapılması,
- Bağlantı elemanlarında kaynak, çivi ya da yapıştırma yerine somun/cıvata gibi mekanik bağlantıların tercih edilmesi,

- Yapı bileşenlerinin standartlaştırılması, tür ve sayılarının mümkün olduğunca azaltılması,
- Reçine ve ikincil cilalar gibi işlemlerden kaçınılması,
- Zehirli ve tehlikeli maddelerin kullanımından sakınılması,
- Malzeme türleri ve bağlantı yöntemlerini tanımlayan kapsamlı envanterlerin hazırlanmasıdır.

Bu unsurlar, yapıların yeniden kullanılabilirliğini artırmak ve söküm işlemlerini kolaylaştırmak adına tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardır [46].

İkincil çeliğin zorlukları

İkincil çelik kullanımının avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Malzemelerin taşınması ve taşınmasının çevresel etkileri, yaşam döngüsü analizlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerdir. Yeniden kullanılan bileşenler, bazen uzak bölgelerde yer alabilir ve bu durum, yeniden kullanım için lojistik süreçleri daha karmaşık hale getirebilir. Ayrıca, birçok yapı ürünü şu anki haliyle, ayrılması zor bir biçimde birleştirilmiş durumdadır; bu da yeniden kullanım sürecini engelleyen bir başka zorluktur. Bunun yanı sıra, bazı yapı elemanlarının dayanıklılığı ve kullanım ömrü tam olarak bilinmediğinden, malzeme testleri yapılmadan yeniden kullanım gerçekleştirildiğinde sorunlar ortaya çıkabilir. Çizelge 3.10'da zorlukları dört ana kategoride incelenmiştir.

Çizelge 3.10. İkincil çeliğin zorlukları [50]

Kalite ve Performans Kontrolleri	-Çeliğin önceki kullanımındaki yorgunluk, deformasyon veya korozyon gibi etkilerinin testi
Malzemeye Erişim	-İkinci el pazarının geniş olmaması sebebiyle yeniden kullanılacak ürünlere erişim kısıtlılığı -Yeniden kullanılan ürünler için geri kazanım tesisleri ve planlanan ve devam eden yıkımlardan elde edilen mevcut bileşenler hakkında bilgi eksikliği
Demontaj ve Lojistik	-Bu konuda uzmanlaşan şirketler tarafından işlemlerin yürütülme gerekliliği -Şirketlere erişmekte zorluk -Malzemelerin taşınma süreçleri
Standartlara Uygunluk	-Standartlara uygunluk gerekli -CE belgelendirilmesi ve yeniden sertifikalandırılması gerekli

Yeniden kullanım için malzeme mevcudiyeti

Yapı sektöründe malzeme geri kazanımının sürdürülebilirlik açısından büyük önemi olsa da, bu sürecin uygulanabilirliği çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır. En temel sorun, yıkım süreçlerinden elde edilen malzemelerin büyük oranda geri kazanılamamasıdır. Kullanılmamış ya da projeden arta kalan malzemeler nispeten daha kolay yeniden değerlendirilebilmekte ve atık miktarını azaltarak karbon salımını düşürmektedir. Ancak binaların yıkımı, sektörde hâlihazırda hız ve maliyet odaklı yöntemlerle gerçekleştiğinden, bu süreçlerde geri kazanım genellikle göz ardı edilmektedir. Etkin geri kazanımın sağlanabilmesi için zamana ve finansal kaynaklara ihtiyaç duyulmakta; gecikme riski veya maliyet artışı, yüklenicilerin bu adımı atlamasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, yeniden kullanım faaliyetlerini teşvik edecek düzenlemeler ve ekonomik destekler büyük önem taşımaktadır.

Ayrıca, yıkımlardan elde edilen yapısal elemanların çeşitliliği ve miktarı sınırlı olabildiğinden, bu elemanların yeni projelerde uygun biçimde değerlendirilmesi de güçleşmektedir. Yeniden kullanılabilir bileşenlerin toplanması, depolanması ve dağıtımı karmaşık, maliyetli ve özel uzmanlık gerektiren bir süreçtir. Bu alanda gerekli teknik altyapının ve pazar sisteminin yetersizliği, geri kazanımın yaygınlaşmasının önündeki önemli engellerden biridir.

Malzeme pasaportları, her bir yapı malzemesine dair teknik ve içerik bilgilerini barındırarak, yeniden kullanım sürecinin verimliliğini artırmakta ve geri kazanım potansiyelini desteklemektedir. Bu sistem; test, yeniden işleme, kaynak bulma gibi adımlarda maliyetleri düşürerek çeliğin yeniden kullanımını kolaylaştırmaktadır. Yeniden kullanım türüne bağlı olarak ton başına 150 ila 1000 £ arasında tasarruf sağlanabileceği öngörülmektedir. Bu sistemden özellikle, malzeme tedarik eden ya da geri kazandıran firmalar ile üreticiler doğrudan yarar sağlamaktadır [5].

İkincil çeliğin yeniden kullanımı için tasarım kuralları, yönetmelikler ve standartlar

Yapısal elemanların yeniden kullanımı önündeki başlıca engellerden biri, yeni yapı tasarımının geri kazanılmış elemanlarla teknik açıdan uyumlu hâle getirilmesindeki zorluktur. Tasarımcılar ve mülk sahipleri, bu süreci yönetecek yeterli bilgi ve kılavuzdan

yoksun olduğundan, yeniden kullanım uygulamaları istenilen düzeyde yaygınlaşamamaktadır. Bu durum ayrıca yasal düzenlemeler, teknik standartlar ve kamuoyundaki farkındalık eksikliğiyle de ilişkilidir. Çelik elemanlar için özel bir yeniden kullanım standardı olmasa da, EN 1090-2 standardının 5.1 maddesi kapsamında, belirli koşullar altında mevcut binalardan sökülen çelik bileşenlerin tekrar kullanılması mümkün olabilmektedir. Bu durum, çeliğin döngüsel ekonomi içinde daha etkin değerlendirilmesine katkı sunmaktadır.

EN 1090-2 standardının 5.1 maddesi, yeniden kullanılacak yapısal çelik elemanlar için malzeme özelliklerinin açık biçimde tanımlanmasını şart koşmaktadır. Sertifikalandırma süreçleri ve yeniden üretimle ilgili teknik zorluklar, bazı ülkelerde çeşitli uygulama kılavuzlarıyla giderilmeye çalışılmaktadır. Örneğin, Avrupa Birliği düzeyinde ve bazı ülkelerde, bu konuda başvurulabilecek önemli referanslar mevcuttur [5].

Bu bağlamda, İsveç tarafından geliştirilen yapısal çeliklerin yeniden kullanımına yönelik MVR (2021) kılavuzu, geri kazanılmış çelik elemanların teknik özelliklerini belirlemede pratik bir yöntem sunmaktadır [5].

Bir diğer tasarım kılavuzu da PROGRESS'tir. PROGRESS Çelik Tasarım Kılavuzu, Avrupa Birliği tarafından desteklenen PROGRESS (PROactive Guidelines for Re-uSE of Structural Steel) adlı bir araştırma projesi kapsamında hazırlanmıştır. Bu rehberin geliştirilmesinde özellikle Birleşik Krallık (İngiltere), Hollanda, Belçika ve Almanya gibi ülkelerden akademik kurumlar, mühendislik firmaları ve endüstri paydaşları yer almıştır. Sadece 1970 yılından sonra üretilen çelikler tekrar kullanılabilir olarak kabul edilmekte ve proje kapsamı tek katlı binalarla sınırlandırılmaktadır [5]. Bahsedilen MVR ve PROGRESS kılavuzlarının detaylı karşılaştırılması Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. MVR ve PROGRESS çelik tasarım kılavuzlarının karşılaştırılması [51-52]

Kriter	MVR 2021	PROGRESS
Hazırlayan Kurum	İsveç Çelik Üreticileri Birliği (MVR)	Avrupa Birliği destekli çok ortaklı araştırma projesi (İngiltere, Hollanda, Belçika vb.)
Odak Noktası	Geri kazanılmış çeliklerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi	Yapısal çeliğin yeniden kullanımına yönelik tasarım ve süreç rehberi
Kapsam	1970 öncesi ve sonrası üretilmiş çelikler; sertifikasız elemanlar dahil	Sadece 1970 yılından sonra üretilen çelikler ve tek katlı binalar
Standartlarla Uyumu	EXC1 ve EXC2 yürütme sınıflarına uygunluk	EN 1090, Eurocode ve CE işareti gibi Avrupa teknik düzenlemeleri
Uygulama Alanı	İsveç'te aktif uygulama; özellikle sahadan çıkan sertifikasız çelikler	Avrupa genelinde önerilen; yeni yapılarda tasarım yoluyla yeniden kullanım
Güçlü Yönleri	Teknik güvenlik testi odaklı, pratik ve sahada uygulanabilir veri odaklı	Süreç bazlı yaklaşım, yeniden kullanımın tasarıma entegrasyonu
Zayıf Yönleri	Tasarım ve proje yönetimi açısından sınırlı rehberlik	Malzeme özelliklerinin sahada belirlenmesi konusunda detay test protokolleri sınırlı

Çelik, zamanla yaşlanma etkisiyle belirgin bir bozulmaya uğramamakla birlikte, deprem gibi etkilerle oluşabilecek korozyon ve plastik deformasyonlara karşı hassasiyet gösterebilir. Bu nedenle, geri kazanılmış çelik bileşenlerin yeniden kullanıma uygunluğunun sağlanabilmesi için, belirli performans ve kalite standartlarını karşılaması gerekmektedir. Bu kapsamda, SCI(Birleşik Krallık merkezli Çelik Yapı Enstitüsü) ve ECCS(Avrupa Yapısal Çelik Birliği) gibi önde gelen kuruluşlar, yeniden kullanım için önerilen bir malzeme değerlendirme protokolü sunmuşlardır. Bu protokol, özellikle EN 1090-2 standardının 5.1 maddesine uygun olarak aşağıdaki mekanik ve kimyasal özelliklerin beyan edilmesini önermektedir:

- Akma ve çekme dayanımı gibi mukavemet özellikleri
- Süneklik kapasitesi
- Isıl işlem sonrası teslim koşulları
- Kaynaklanabilirlik durumu ve buna bağlı olarak kimyasal bileşim (özellikle sertifikasız malzemelerde)

Yeniden kullanılacak çelik bileşenlerin CE işaretli EN 10204 Tip 3.1 veya Tip 2.2 Muayene Sertifikası alması gerekmektedir. Çizelge 3.12'de bahsedilen bu sertifikalar, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini belgeleyerek ilgili standartlara uygunluğunu kanıtlar. Ancak tüm bu gerekliliklere rağmen, geri kazanılmış çeliğin yeniden sertifikalandırılması için uygulanacak test yöntemleri henüz standartlaştırılmış değildir. Test protokollerinin,

örnekleme yöntemlerinin ve test sayılarına ilişkin kararlar şu anda mühendislerin takdirine bırakılmış durumdadır. Dolayısıyla, bu alanda verimli, güvenilir ve uygun maliyetli test sistemlerinin geliştirilmesi, çeliğin yeniden kullanımını yaygınlaştırmak açısından kritik önemdedir[5].

Çizelge 3.12. EN 10204 Sertifika Tipleri: Tip 2.2 ve Tip 3.1 karşılaştırma tablosu [53]

Sertifika Tipi	Verilen Taraf	İçerik	Kullanım Amacı
Tip 2.2	Üretici	-Ürünün teknik şartnamelere uygun olarak üretildiğini gösteren test sonuçları -Verilerin yalnızca üreticinin kendi beyanına dayanması	-Düşük riskli uygulamalarda ve genel kalite kontrol süreçleri -Yeniden kullanım gibi daha yüksek güvenlik gerektiren projeler için yetersiz
Tip 3.1	Üretici içi bağımsız birim ya da 3. taraf denetim kuruluşu	-Malzemenin kimyasal bileşimi, çekme ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerini bağımsız şekilde doğrulaması	-Yüksek güvenlik gerektiren yapısal uygulamalarda -CE işareti alma süreçlerinde ve geri kazanılmış malzemenin yeniden kullanımında -EN 1090-2 standardı kapsamında çeliğin yeniden kullanılabilmesi için genellikle bu belge türünün talep edilmesi

Çeliğin zamanla kayda değer bir yapısal değişime uğramamasıyla birlikte, depremler sonucunda meydana gelebilecek korozyon ve plastik deformasyon gibi etkenler malzeme özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, geri kazanılan çelik elemanların tekrar kullanılabilir olup olmadığını belirlemek için belirli kalite ve performans kriterlerine uygunluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir.Korozyon, mukavemet, süneklik, ısıl işlem teslim koşulu gereklidir. Yeniden kullanılabilir olması için CE işaretli olması veya testlerden geçmesi (EN 1090-2 sertifikası alması) gerekmektedir. Bu gerekliliklere rağmen, mevcut test protokolleri henüz standartlaştırılmamıştır. Geri kazanılmış çelik elemanlarının yeniden değerlendirilmesine yönelik etkili ve maliyet açısından uygun prosedürler, yeniden kullanım uygulamalarının yaygınlaşmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Günümüzde, hangi test yönteminin uygulanacağı, kaç test yapılacağı ve numune seçim süreci gibi kararlar, nihai olarak sorumlu mühendislerin inisiyatifine bırakılmaktadır [5].

Çelik için malzeme pasaportu oluşturulması

İkinci el çelik malzemeler için oluşturulan malzeme kimlik kartları ve çelik pasaportları, geri kazanılmış çeliğin teknik özelliklerini ve kullanım geçmişini izleyebilmek adına büyük

önem taşır. Bu belgeler, çeliğin yeniden güvenli ve uygun bir şekilde değerlendirilmesini sağlamak için kritik bir araçtır. Kimlik ve pasaport sistemleri; malzemenin üretim yılı, üretici firması, çelik türü, mekanik özellikleri ve önceki kullanıldığı projelere dair bilgileri içerir. Aynı zamanda çeliğin yük taşıma kapasitesi, dayanım değerleri, gerilme-uzama oranları ve dönüşüm noktaları gibi yapısal veriler de bu belgelerde yer alır.

Bu sistem sayesinde, yeniden kullanılmak üzere seçilen çelik malzemenin teknik uygunluğu belgelenebilir ve şeffaf bir biçimde doğrulanabilir. Test sonuçları, mekanik performans raporları, CE işaretine uygunluk belgeleri ve çevresel etki değerlendirmeleri gibi dökümanlar da pasaporta dâhil edilir. Ayrıca, çeliğin daha önce nerede kullanıldığı, hangi yöntemlerle söküldüğü, ne tür işlemlerden geçirildiği gibi bilgiler, yeniden kullanım sürecinde rehberlik sağlar. Bu belgeler, malzemenin yeniden değerlendirilmesinde gerekli işlem ve modifikasyon önerilerini de içererek, hem güvenlik standartlarını karşılamaya yardımcı olur hem de döngüsel ekonomi ilkelerine katkı sağlar [5].

Yeni Zelanda'da yürütülen Steel Circularity Project (SCP), yapısal çeliklerin yeniden kullanım yoluyla döngüsel ekonomiye entegrasyonunu amaçlayan öncü bir araştırma ve uygulama programıdır. Bu projenin temel bileşenlerinden biri, geri kazanılmış çelik elemanlar için standartlaştırılmış malzeme kimlik belgeleri (pasaportlar) geliştirmektir. SCP kapsamında, çelik bileşenlerin geçmiş kullanım bilgileri, mekanik ve kimyasal özellikleri, test verileri ve yeniden kullanım potansiyelleri sistematik biçimde dijital olarak kayıt altına alınmaktadır [54]. Çizelge 3.13'te örnek bir malzeme pasaportu verilmiştir.

Çizelge 3.13. Çelik için malzeme pasaportu [5]

Parça numarası	Üretilen her parçaya ömrü boyunca saklanan ve satıldıktan sonra bile ömrü boyunca taşıyacağı bir seri numarası verilir.
Satın alma	Satın alma sipariş numarasıdır.
Bölüm	Bölümün boyutu
Uzunluk	Malzemenin mm cinsinden kullanılabilir uzunluğu.
Nitelik	Asal, ikinci el, üretim fazlalığı vb.
Koşul	Malzemenin yüzey durumunu tanımlar (pas, boya, galvaniz vb)
Bitiş	Bitiş durumu (kesilme şekli)
Kaplama	Boyanmışsa ne tür bir boya ile boyandığı
Kusurları	Ezikleri, delikleri vb. (bu kusurlar 1 ile 10 derece arasında derecelendirir.)
Derece	Çelik sınıfı
Yer	Çeliğin yeri
Kaynak	Malzemenin nereden geldiği (örneğin biliniyorsa bina adı veya çeliğin geldiği uzaklık)

Yeniden kullanım için çelik elemanların test edilmesi

Malzeme değerlendirme süreci genellikle saha içinde ya da saha dışında yapılır ve tahribatsız muayene (NDT) ile tahribatlı muayene (DT) yöntemlerini kapsar. Çeliğin yapısal performansını belirlemek amacıyla boyutsal inceleme, girinti testi, kimyasal bileşim analizi ve bozunma denetimi gibi çeşitli NDT teknikleri kullanılabilir. Ancak, NDT ve DT süreçleri hem zaman alıcıdır hem de maliyetleri artırarak yeniden kullanım açısından çeliği daha az cazip hale getirebilir. Buna rağmen, NDT'nin önemli bir avantajı, elementlere zarar vermeden kusurların boyutunu belirleme, tespit etme ve ölçme yeteneğine sahip olmasıdır; böylece uzun süren laboratuvar testlerine duyulan ihtiyacı azaltır. Yeniden kullanılacak yapısal çelik elemanların, önceki kullanım süreçlerinden kaynaklı herhangi bir hasar taşımaması gerekmektedir. Bu elemanlarda korozyonun neden olduğu ciddi kusurlar, kalıcı deformasyonlar veya kesit kayıpları bulunmamalıdır. Çizelge 3.14'te tahribatlı ve tahribatsız muayeneler ve standartları sıralanmıştır [5].

Çizelge 3.14. Çeliğin tahribatlı ve tahribatsız muayenelerinin karşılaştırılması [55]

Tahribatli Muayene	Tahribatsiz Muayene
Çekme Testi	Görsel muayene
Eğme Testi	Penetrant muayene
Çentik darbe testi	Manyetik parçacık muayenesi
Kırma testi	Ultrasonik muayene
Sertlik testi	Radyografik muayene
Makro ve mikro test	Genel
Spektral (Kimyasal) test	

Her bir geri kazanılmış çelik bileşeni için yaygın olarak kaydedilen özellikler aşağıdaki tabloda sunulmaktadır. Bozulma ve hasarın ayrı ayrı ele alınması ve değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bozulma, malzemenin maruz kaldığı çevresel koşullar nedeniyle fiziksel özelliklerinde veya boyutlarında meydana gelen azalmalardır. Çelikte en yaygın görülen bozulma türü, çevresel faktörlerin etkisiyle ilerleyen bir süreç olan korozyondur. Korozyonun hızı, çeliğin oksijen ve su ile temas miktarına bağlı olarak değişir. Bu tür bozulmaların önüne geçmek amacıyla, metal ile dış ortam arasında koruyucu bir bariyer işlevi gören kaplama tabakaları uygulanmaktadır. Ancak, kaplama altında da korozyon gelişebilir ve bu durum, gizli konumu nedeniyle tespit edilmesini zorlaştırır [5].

Çeliğin tahribatsız muayenesi

Malzemenin uygunluğunu değerlendirmek, yerinde kullanıma elverişli olup olmadığını belirlemek veya malzeme özelliklerini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen testlerin bütününü kapsamaktadır. Elde edilen bulgular, ilgili standartlarla karşılaştırılarak değerlendirilir. Hasar oluşturmadan yapılan bu inceleme sürecine tahribatsız muayene (NDT) denir. Bu süreçte;

-İncelenen parçaya zarar verilmez,
-Malzemenin kullanım için gerekli özellikleri korunur,
-İç yapı ve yüzeydeki süreksizlikler takip edilir,
-Tespit edilen kusurların kaynağı belirlenerek, üretim aşamasında düzeltme yapılmasına olanak tanırken yeniden kullanımda malzemenin tekrar kullanılabilirliğinin anlaşımasında yardımcı olur [56].

Görsel muayene

Gözle muayene, bir malzeme veya kaynak bölgesinin yüzey kusurlarını değerlendirmek amacıyla çıplak gözle ya da optik yardımcılar (büyüteç, endoskop, vs.) kullanılarak yapılan temel bir tahribatsız muayene (NDT) yöntemidir. Genellikle diğer NDT yöntemlerinden önce uygulanır ve elde edilen bulguların kayıt altına alınması tavsiye edilir. Detaylı bilgiler tablo 3.15.'te verilmiştir.
İlgili Standartlar: TS EN ISO 17635, TS EN ISO 17637, TS EN ISO 5817, TS EN ISO 6520-1, 13018, 1330-10, 13927, ISO 3058, EN 1370 [55].

Penetrant muayene

Sıvı penetrant muayenesi, yüzeye açık süreksizliklerin tespiti için uygulanan bir tahribatsız muayene (NDT) yöntemidir. Özellikle ince çatlaklar, gözenekler ve bağlantı hataları gibi yüzey kusurlarının belirlenmesinde etkilidir. Tüm metalik ve birçok metalik olmayan, gözeneksiz malzemeye uygulanabilir. Detaylı bilgiler tablo 3.15.'te verilmiştir.
İlgili Standartlar: TS EN ISO 9712, 17635, 3452-1, 3452-2, 3452-3, 3452-4, 3059, 23277, TS EN 1371-1, 1371-2, 10228-2 [56-58].

Manyetik parçacık muayenesi

Manyetik parçacıkla muayene, yalnızca ferromanyetik malzemelerde uygulanabilen bir tahribatsız muayene (NDT) yöntemidir. Yüzeyde veya yüzeye yakın süreksizliklerin belirlenmesinde kullanılır. Muayene, manyetik akı ile yüklenen malzeme üzerindeki akı kaçağı noktalarında ferromanyetik tozların birikmesi esasına dayanır. Detaylı bilgiler tablo 3.15.'te verilmiştir.
İlgili Standartlar: EN ISO 9934-1, 9934-2 , 9934-3, 3059, 16828, EN 1330-7 [59].

Ultrasonik muayene

Ultrasonik muayene, katı malzemelerin yüksek frekanslı ses dalgalarını iletme özelliği esasına dayanan bir tahribatsız muayene (NDT) yöntemidir. Bu yöntem, malzeme içindeki süreksizlikleri tespit etmek amacıyla 0.2 – 25 MHz aralığında ses dalgaları kullanır. Dalgalar, malzeme içerisindeki farklılıklar nedeniyle yansır ve bu yankılar analiz edilerek kusurlar belirlenir. Detaylı bilgiler tablo 3.15.'te verilmiştir[60].
İlgili Standartlar: EN ISO 16810 , 16811 , 16823, 16826, 16827, 16828, 2400, 7963, EN 12668-1 , 12668-2, 12668-3, 1330-4

Radyografik muayene

Radyografik muayene, malzeme içindeki yoğunluk farklarını tespit etmek amacıyla kullanılan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Yüksek nüfuz gücüne sahip kısa dalga boylu X-ışınları veya gama ışınları, malzeme içinden geçirilerek film veya dijital algılayıcı üzerinde gölge görüntü oluşturur. Bu görüntü, iç kusurların neden olduğu ışın soğurulma farklılıklarına dayanır. Detaylı bilgiler Çizelge 3.15'te verilmiştir [61].
İlgili Standartlar: EN ISO 5579, 19232-1, 19232-2, 19232-3, 19232-4, 19232-5, 17636-1 , 17636-2, 10675-1, 10893-6 , 10893-7, EN 1330-3 , 12681

Çizelge 3.15. Tahribatsız yöntemlerin karşılaştırılması [62]

	Görsel Muayene	Penetrant Muayene	Manyetik Parçacık Muayene.	Ultrasonik Muayene	Radyoaktif Muayene
Yaygın Kullanım alanları	Görsel erişimin sağlandığı tüm yüzeyler	Gözeneksiz tüm malzemeler	Sadece ferromanyetik malzemeler	Çoğu metal ve alaşım	Kalınlığa bağlı olarak tüm malzemeler
Etkin kusur türü ve ölçeği	-Makroskopik yüzeysel çatlaklar ve kusurlar	-Yüzeysel çatlaklar ve kusurlar	-Yüzeysel çatlaklar (yüksek), -İç çatlaklar (orta) -Korozyon	-Yüzeysel çatlaklar(düşük) İç çatlaklar (yüksek) -Gözenek büyüklüğü -Katman ayrılması -Korozyon	-İç kusurlar (yüksek) -Yüzeysel çatlaklar (orta)
Test ortamı	Hava	Hava	Hava, petrol, yağ, gaz	Hava	Hava
Hassasiyet	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Maliyet	Ucuz	Ucuz	Göreceli	Orta	Orta
Güvenilirlik	Düşük	Orta	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Test Hızı	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta	Orta

Materyallerde zamanla meydana gelen kusurlar, yapısal bozulmalara yol açarak ciddi maddi kayıplara sebep olabilir. Bu tür kusurların erken tespiti için tahribatsız muayene yöntemleri uygulanmalıdır. Muayene sürecinde, materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerine en uygun yöntemin seçilmesi büyük önem taşır. Yanlış yöntem kullanımı, gereksiz maliyetlerin artmasına ve test sonuçlarının güvenilirliğinin azalmasına neden olabilir. Doğru yöntemle yapılan düzenli kontroller, materyalin daha verimli kullanılmasını sağlayarak olası maddi kayıpların önüne geçer. Yeniden kullanılacak olan çelikler için de kullanım durumunun testlerden geçerek güvenli bir malzeme oluşturması gerekmektedir [62].

Tahribatsız muayenenin avantajları

- Parçaya zarar verilmemesi en önemli avantajdır.
- Tahribatlı muayenelerde karşılaşılan numune alma ve numunenin tüm parçayı temsil etme konusundaki belirsizlikler tahribatsız muayene ile giderilir.
- Test yapılma imkanı fazladır. Aynı parça üzerinde farklı bölgelerde ve farklı özelliklerde birden fazla tahribatsız muayene yöntemi peş peşe veya eş zamanlı olarak uygulanabilir. Bu sayede, parçanın servis ömrü ve performansı hakkında kapsamlı değerlendirmeler yapılabilir.
- Büyük miktarda parçalar test edilebilir. Parça sayısı fazla olsa bile maliyet hesaplanarak istenildiğinde tüm parçalar muayene edilebilir.

- Vinç ve çelik konstrüksiyon gibi yapıların en fazla gerilime maruz kalan bölgeleri ya da tadilat yapılan alanları düzenli aralıklarla kontrol edilerek güvenlik artırılabilir. Kritik bölgelerin güvenliği sıklıkla kontrol edilebilir.
- Büyük ve pahalı parçalar için avantajlıdır.
- Testler yalnızca laboratuvarlarda değil, sahalarda da yapılabilmektedir.
- Bu yöntem, üretim sırasında yeni parçaların kontrolü için olduğu kadar, periyodik bakım ve işletme sırasında çalışan sistemlerin muayenesi için de uygundur.
- Bazı durumlarda, parçalar monte edilmiş haldeyken ve hatta sistem çalışırken muayene yapılabilir. Bu durum tahribatsız muayenenin önemli bir avantajıdır.
- Rafineri ve kimya endüstrisinde kullanılan metalik kaplar, içeriden korozyona uğrayabilir. Radyografik ve ultrasonik testler ile işletme durdurulmadan korozyon ölçümleri yapılabilir. Ayrıca, teleferik halatları gibi çelik halatlar, özel cihazlarla iç kusurlar açısından yerinde kontrol edilebilir [63].

Tahribatsız muayenenin dezavantajları

- Mukavemet ölçümü yapılamaz. Tahribatsız muayene yöntemleri, malzemenin mekanik dayanımını doğrudan ölçemez.
- Yük dayanımı belirlenemez. Bir malzemenin ne kadar yüke dayanabileceği yalnızca tahribatsız muayene yöntemleriyle tespit edilemez.
- İşletme ömrü tek başına belirlenemez. Geri kalan kullanım ömrü yalnızca tahribatsız muayene ile hesaplanamaz. Ancak, bilgisayar destekli tasarım ve analizlerle birlikte değerlendirildiğinde, konstrüksiyonların kalan ömrü hakkında tahmin yapılabilir [63].

Tahribatsız muayenede teknolojik uygulama

Geleneksel deneysel testler çoğu zaman hem zaman alıcıdır hem de yorumlama süreci karmaşıktır. Bu durum, özellikle yeniden kullanılacak çelik malzemelerin değerlendirilmesini zahmetli ve maliyetli hale getirerek uygulamayı sektörde daha az tercih edilir kılmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, yapay zekâ (AI) tabanlı yaklaşımların devreye alınması, operatörlerin yükünü azaltabilir ve yeniden sertifikalandırma süreçlerini hızlandırabilir. Örneğin, kaynaklı birleşimlerde kullanılan Penetrant Testi (PT) gibi tahribatsız muayene yöntemlerinde, derin öğrenme algoritmalarıyla otomasyon sağlanarak

çatlak tespiti süreci dijitalleştirilmiştir. Bu tür uygulamalarda karar verme süreci kolaylaştırılmış, aynı zamanda denetim süresi de önemli ölçüde kısaltılmıştır.

Bu yaklaşımın örneklerinden biri, Avrupa Birliği'nin Horizon 2020 araştırma programı kapsamında yürüttüğü bir projede görülmektedir. MANUNET(Manufacturing Research Funding Network) tarafından finanse edilen bu çalışma, endüstriyel parçalardaki kusurları otomatik tespit etmeyi hedefleyen bir sistem geliştirmiştir. Uygulanan modelde, görüntüler üzerindeki olası çatlaklar sinir ağı mimarisi ile analiz edilmekte; hem derin sinir ağları hem de çok katmanlı algılayıcılar birlikte kullanılmaktadır. Sistem, her çatlak veya noktasal kusuru, havacılık ve uzay endüstrisine uygun olarak belirlenen üç ayrı kategoriye ayırabilmektedir.

Bu teknolojik yaklaşım, geri kazanılmış çelik bileşenlerin yapısal değerlendirmesi ve yeniden kullanım uygunluğunun sınıflandırılması gibi alanlara da entegre edilebilir. Böylece, hem zaman hem de kaynak tasarrufu sağlanırken, malzemenin güvenli kullanımı da dijital doğrulama ile desteklenmiş olur [5].

Yeniden kullanılabilirlik değerlendirmesi için yapısal dijital ikiz

Yapısal dijital ikiz (DT), fiziksel bir yapının sanal temsili olup, gerçek zamanlı izleme, kestirimci bakım ve yapısal sağlık değerlendirmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu teknoloji, yapılar üzerindeki test, analiz ve simülasyon maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlayarak mühendislikte verimliliği artırmaktadır. Dijital ikiz, yapı malzemelerinin fiziksel davranışlarını, yükleme koşullarını ve çevresel etkileri dikkate alarak yapının zaman içindeki bozulma eğilimlerini doğru biçimde yansıtabilir. Bu sistemin güvenilir tahminlerde bulunabilmesi için, malzemenin zamana bağlı çok ölçekli mekanik tepkilerinin modele entegre edilmesi gereklidir. Geçmiş yapısal verilerle bakım kayıtlarının birleştirilmesi, dijital ikizin arıza olasılıklarını önceden tahmin etmesine olanak tanır. Bu teknoloji, yapının hangi noktalarında ve hangi zaman diliminde bir arıza veya hasar gelişme ihtimali olduğunu belirleme konusunda önemli bir kapasite sunar.

Etkin bir dijital ikiz uygulaması için şu unsurların dikkatle planlanması gerekir:

- İzlenecek bölgelerin doğru belirlenmesi
- Uygun sensörlerin yerleştirilmesi
- Veri toplama sıklığının tanımlanması
- Elde edilen verilerin doğru yorumlanması

Her ne kadar DT teknolojisi yüksek bir potansiyele sahip olsa da, başlangıç kurulum maliyetlerinin yüksek oluşu, bu sistemi birçok endüstriyel uygulama açısından henüz yaygın hale getirmemektedir [5].

Zamana bağlı güvenilirlik endeksi

Güvenilirlik analizi, bir yapısal bileşenin belirli çevresel ve yük koşullarında, belirlenen hizmet süresi boyunca beklenen işlevini sürdürebilme olasılığını ifade eder. Bu kavram, yapı mühendisliğinde yaygın biçimde kullanılan güvenlik katsayısı yaklaşımıyla ilişkili olup, tasarım sürecinin temel unsurlarından biridir. Ölçüm doğrudan fiziksel olarak bir cihazla yapılmamaktadır. Bunun yerine istatiksel modelleme ve yapısal mühendislik hesaplamalarıyla elde edilen sayısal bir değerdir.

Yapısal sistemlerin zamanla değişen performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan güvenilirlik endeksi, deterministik gerilme veya yorulma analizlerini; yük, malzeme, geometri ve çevresel etkilere bağlı stokastik değişkenlik ile birleştirir. Özellikle korozyon gibi bozunma mekanizmalarının etkisiyle yapıların taşıma kapasitelerinde zaman içinde meydana gelen düşüş, bu endeks yardımıyla izlenebilir.

Bu bağlamda güvenilirlik endeksi, çelik gibi sürekli bozulmaya maruz kalan malzemelerde muayene sıklığının planlanması ve yeniden kullanım potansiyelinin belirlenmesi açısından kritik bir araçtır. Endeksin belirli bir hedef seviyenin altına düşmesi, yapının doğrudan işlevini kaybettiği anlamına gelmemekle birlikte, daha yüksek bir arıza riski bulunduğuna işaret eder. Bu hedef seviye, bileşenin genel yapısal bütünlük içindeki rolüne göre belirlenir. Örneğin, farklı korozyon oranlarına göre oluşturulan güvenilirlik eğrileri, zamanla düşüş göstererek belirli eşik noktalarını kesebilir. Bu tür analizlerde, yapının hizmet süresi içinde hangi noktada yeniden değerlendirmeye veya müdahaleye ihtiyaç duyacağı öngörülebilir.

Özellikle eski yapı elemanlarının başka yapılarda yeniden kullanılabilirliği söz konusu olduğunda, bu elemanların yorulma geçmişi, korozyon durumu ve denetim kayıtları ayrıntılı olarak incelenmelidir. Bu tür değerlendirmeler, sadece güvenlik sağlamakla kalmaz; aynı zamanda denetim aralıklarının planlanmasında ve ikinci ömür için uygunluk kararlarının verilmesinde de rehberlik eder [5].

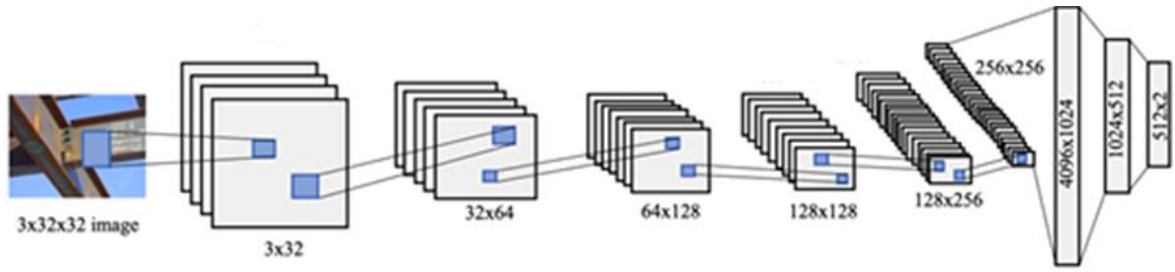
Çeliğin yeniden kullanımını sağlamak için dijital yöntemler

Kullanım ömrünü tamamlamış yapı stoğundan elde edilen yapısal bileşenlerin yeniden değerlendirilmesi, birçok risk ve belirsizlik barındırır. Ancak bu belirsizliklerin, gelişmiş dijital teknolojilerin entegrasyonu sayesinde önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmektedir. Ne var ki, inşaat sektörü, genel endüstriyel dijitalleşme düzeyi açısından hâlen en geri kalan sektörlerden biridir. Bu durum, sektörün dijital dönüşümündeki ilerlemenin yavaşlamasına neden olmuştur.

Bu kapsamda, yeniden kullanım kararlarının sağlıklı biçimde alınabilmesi için; lojistik uygulanabilirlik, yapısal performans, yaşam döngüsü etkileri, ekonomik ve güvenlik değerlendirmeleri gibi birçok faktörü bir arada değerlendiren çok kriterli karar verme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Dijital teknolojilerin sunduğu olanaklar, yıkım öncesi denetim, görsel tanılama ve yeniden kullanım uygunluk analizlerinin otomatikleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu sayede hem maliyet azaltılabilir hem de insan hatası en aza indirilerek güvenilirlik artırılabilir. Şekil 3.5'te gösterilen bir çalışmada, yeniden kullanım potansiyelini analiz etmek amacıyla özel olarak tasarlanmış derin evrişimli sinir ağı (CNN) mimarisi önerilmiştir. Bu yapay zekâ modeli, yıkım öncesi görsel verileri kullanarak yapı elemanlarının yeniden kullanılabilirliğini sınıflandırabilmektedir.

Bu tür dijital çözümler, farklı sektörlerdeki yaygın uygulama potansiyeli sayesinde yalnızca analiz sürecini kolaylaştırmakla kalmaz; aynı zamanda yapı malzemelerinin yeniden kullanımı için gereken sertifikasyon sistemlerinin ve teknik düzenlemelerin oluşturulmasını da destekler. Bu bağlamda, dijitalleşmenin artırılması ve yapay zekâ temelli sistemlerin yaygınlaştırılması, döngüsel inşaat uygulamaları için gerekli altyapının oluşturulmasına katkı sağlayabilir [5].



Şekil 3.5. İkili sınıflandırma için altı evrişim katmanı, üç havuzlama katmanı ve üç katmanlı tam bağlı sinir ağı (NN) modeli içeren derin bir özel CNN model mimarisi [5]

Yeniden kullanım için yapay zeka

Yapay zekâ (AI), döngüsel ekonomi hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir tarafından belirtildiği üzere, yapay zekâ teknolojileri, malzemelerin dolaşımını sağlayacak sistemlerin iyileştirilmesinde kilit rol oynayabilir. Bu sistemler, özellikle AI algoritmalarının kamera ve sensör destekli nesne tanıma yeteneklerine odaklanmaktadır. Yapay zekâ, döngüsel ekonomiye üç temel yolla katkı sağlar:

- Otomatik Değerlendirme: Kullanılmış ürünlerin durumu yapay zekâ ile analiz edilerek, yeniden kullanım, onarım, yeniden satış veya geri dönüşüm kararları otomatikleştirilebilir. Böylece malzeme değerinin korunması en üst düzeye çıkarılabilir.

- Otomatik Söküm Süreçleri: Ürünlerin konumu ve durumu dikkate alınarak, AI tabanlı sistemler söküm işlemlerini planlayabilir ve yönlendirebilir. Bu sayede daha verimli söküm stratejileri geliştirilebilir.

- Akıllı Malzeme Sıralama: Yapay zekâ ile bütünleştirilen robotik sistemler, özellikle tüketici sonrası karışık atık akışlarının görsel tanıma ile ayrıştırılması sürecinde kullanılabilir. Bu, malzeme geri kazanımında kaliteyi artırır.

Bu yapay zekâ uygulamaları, sadece genel üretim sistemleriyle sınırlı kalmayıp, inşaat sektöründe de malzeme yeniden kullanımını destekleyecek şekilde genişletilebilir. Makine öğrenimi modelleri, yapı bileşenlerinin görsel verilerini kullanarak bu elemanların ön değerlendirmesini otomatikleştirebilir. Örneğin, Birhane & Kanyılmaz (2022) tarafından geliştirilen bir model, derin öğrenme kullanarak çelik yapı bileşenlerinin korozyon

durumunu %83, bağlantı türünü %89, hasar seviyesini %83 doğrulukla tahmin edebilmiştir. Bu tür sistemler, otomatik sertifikalandırma, yeniden kullanım planlaması ve denetim öncesi ön sınıflandırma açısından büyük avantajlar sunmaktadır [5]. Şekil 3.6'da yapılan çalışmaya örnek verilmiştir. Gerçekte olan ve yapay zekanın tahminiyle olan karşılaştırmaları görsellerin üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 3.6. CNN bağlantı, hasar ve korozyon modellerinin rastgele görüntülerle doğrulanması [5]

Bu tür yapay zekâ destekli sistemlerin benimsenmesi, yapı elemanlarının manuel olarak incelenmesi ve değerlendirilmesiyle ortaya çıkan yüksek maliyet ve zaman ihtiyacını azaltabilir. Aynı zamanda analiz sürecinin tutarlılığı ve güvenilirliği de bu sayede artırılabilmektedir.

Gelişen teknolojiyle birlikte, İHA'lar (dronlar), yer robotları, akıllı telefonlar ve tabletler gibi kamera entegreli mobil cihazların yaygınlaşması, yıkım öncesi ya da kullanım süresi sonundaki yapılara dair yüksek hacimli görsel veri toplanmasını mümkün hale getirmiştir. Bu bağlamda, evrişimli sinir ağları (CNN) gibi bilgisayarla görme tabanlı yapay zekâ modelleri, görüntüler üzerinde:

- Yeniden kullanılabilir elemanları algılama,
- Bu elemanları tanıma ve sınıflandırma,
- Görüntüden anlamlı yapısal bilgi çıkarma gibi görevleri başarıyla gerçekleştirebilir.

Bu sürecin otomatikleştirilmesi, özellikle bina sahipleri ve yeniden kullanım uzmanları açısından büyük kolaylık sağlar. Kullanım ömrünü tamamlayan yapılarda, hangi bileşenlerin yeniden kullanılabilir olduğunu hızlı ve güvenilir bir biçimde belirlemek, bu sistemler sayesinde daha erişilebilir hâle gelmektedir [5].

Çeliğin tahribatlı muayenesi

Malzemelerin sertlik, süneklik ve mukavemet gibi temel mekanik özellikleri, iç yapılarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple, malzemelerin içyapılarının ve özelliklerinin iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu özelliklerin belirlenmesi için çeşitli mekanik testler uygulanır. Tahribatlı muayene, malzemelerin çekme, basma ve eğilme gibi kuvvetlere karşı direncini ve dayanımını ölçmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, incelenmek istenen özelliğe uygun olarak seçilen bir numune teste tabi tutulur ve elde edilen sonuçlar raporlanır. Tahribatlı muayene, üretim öncesinde malzeme ve üretim sürecinin değerlendirilmesi, seri üretime alınacak ancak henüz servise girmemiş makine parçalarının analizi, kullanım sürecindeki ekipmanların kontrolü ve hasar görerek servis dışı kalmış yapıların incelenmesi gibi çeşitli alanlarda uygulanmaktadır [64].

Çekme testi

Çekme testi, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan temel bir tahribatlı test yöntemidir. Bu test sırasında, belirli standartlara göre hazırlanmış bir numune, tek eksenli çekme kuvvetine maruz bırakılır ve kopma gerçekleşene kadar yük uygulanır. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [65].
İlgili Standartlar: ISO 6892-1, 10113, 10275, 15630-1, ASTM E8 / E8M, ASTM A370, ASTM B557, E345, E21, E517

Eğme testi

Eğme testi, bir malzemenin eğilme yüklerine karşı gösterdiği direnci ve deformasyon davranışını değerlendirmek amacıyla uygulanan bir tahribatlı test yöntemidir. Testte, numune genellikle iki destek (mesnet) üzerine yerleştirilir ve ortasına ya da belirli noktalarına kuvvet uygulanarak eğilme momenti altında davranışı gözlemlenir. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [66].
İlgili Standartlar: ISO 7438, 8491, 178, ASTM E290, A370, D790, D522, C1161, D671

Çentik-darbe testi

Çentik darbe testi, malzemelerin ani ve dinamik yükler altında gösterdiği dayanımı belirlemek amacıyla uygulanan tahribatlı bir test yöntemidir. Özellikle, çelik gibi yapı malzemelerinin tokluk (darbe enerjisi absorpsiyonu) kapasitesini değerlendirmek için tercih edilir. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [67].
İlgili Standartlar: ISO 148-1, 148-2, 14556, ASTM E23, E208, A370

Kırma testi

Kırma testi, özellikle kaynaklı birleştirmelerin iç yapısında bulunan kusurların tespiti amacıyla uygulanan bir tahribatlı muayene yöntemidir. Bu testte, kaynaklı bir bölgeden alınan numune, belirli bir kuvvetle kontrollü biçimde kırılır ve ortaya çıkan kırılma yüzeyi analiz edilir. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [67].
İlgili Standartlar: ISO 9017, 17639, ASTM E290, A370

Sertlik testi

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvete karşı gösterdiği plastik deformasyona direnç olarak tanımlanır. Sertlik testleri, malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmede en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu testler hem pratik hem de malzeme üzerinde minimum zarar oluşturan tahribatlı testler arasında yer alır. Belirli bir yük altında, genellikle elmas gibi çok sert bir uç, test edilecek malzeme yüzeyine bastırılır. Malzeme yüzeyinde oluşan iz ya da çökme miktarı ölçülerek sertlik değeri hesaplanır. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [67].
İlgili Standartlar: ISO 16859-1/2/3, ASTM E140, ASTM E1400

Makro ve mikro test

Makro ve mikro testler, kaynaklı bağlantıların belirli bölgelerinde detaylı analiz yapılmasını sağlar. Bu testlerde numune yüzeyi uygun kimyasallarla dağlandıktan sonra düşük (makro) veya yüksek (mikro) büyütmeli cihazlarla incelenir. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [67].
İlgili Standartlar: ISO 17639, 3651-2, 9044, ASTM E3, E407, E112, E340

Spektral (kimyasal) test

Optik Emisyon Spektrometresi (OES), metal malzemelerin kimyasal bileşimini element düzeyinde analiz etmek amacıyla kullanılan, güvenilir ve yaygın bir spektroskopik yöntemdir. Özellikle farklı alaşımların içeriğini hassas biçimde tespit etme imkânı sunduğu için malzeme tanımlama ve kalite kontrol süreçlerinde kritik bir rol oynar. Detaylı bilgiler Çizelge 3.16'da verilmiştir [67].
İlgili Standartlar: TS EN ISO 9556, 10701, 14284, 10204, TS 708, 3657

Çizelge 3.16. Tahribatlı testlerin karşılaştırılması

	Amaç	Uygulama	Ölçülen Özellikler	Avantajları	Dezavantajları
Çekme Testi	-Malzemenin elastik ve plastik deformasyonunu, kopma noktasını belirlemek	-Numunenin çekme kuvvetine tabi tutulması ve gerilim-gerinim eğrisi oluşturulması	-Akma gerilimi, çekme mukavemeti, kopma uzaması, elastisite modülü	-Temel mekanik özelliklerin doğrudan belirlenmesini sağlamak	-Numune yok edilir -Büyük parçalar için uygulanması zor -Gerçek yükleme koşullarını her zaman tam yansıtamama
Eğme Testi	-Malzemenin eğilmeye karşı direncini belirlemek	-Numunenin iki mesnet arasına yerleştirilip ortasına kuvvet uygulanması	-Eğilme mukavemeti, süneklik	-Gerçekçi yükleme koşullarını simüle etmesi	-Gerilim dağılımı homojen değil -Malzeme içindeki gerilme farklılıkları nedeniyle doğrudan gerilim analizleri sınırlı
Çentik-darbe Testi	-Malzemenin ani darbelere karşı dayanıklılığını ölçmek	-Çentikli numunenin sarkaçlı bir çekiçle kırılması	-Darbe enerjisi, süneklik-kırılganlık davranışı	-Ani yükler altındaki davranışın değerlendirilmesi	-Sadece tek bir darbe davranışını ölçmesi ve diğer yükleme türleri hakkında bilgi vermemesi
Kırma Testi	-Kaynaklı malzemelerin iç kusurlarını tespit etmek	-Kaynaklı numunenin kırılarak yüzeyindeki hataların incelenmesi	-Çatlaklar, gözenekler, nüfuziyet kusurları	-Hızlı ve kolay uygulama	-Niteliksel bir test olup kesin sayısal veri sağlamaması
Sertlik Testi	-Malzemenin yüzey sertliğini belirlemek	-Bir sert ucun malzemeye bastırılarak ölçüm yapılması	-Brinell, Rockwell veya Vickers sertlik değeri	-Küçük numuneler için uygun	-Yüzeyde deformasyona neden olması -Tüm malzeme hakkında bilgi vermemesi
Makro ve Mikro Test	-Kaynaklı malzemelerin iç yapısını ve tane yapısını belirlemek.	-Numune kesilir, yüzeyi parlatılır ve kimyasal dağlama ile mikroskop altında incelenir	-Kaynak metali, tane boyutu, çatlaklar	-Malzemenin iç yapısını detaylı inceleme imkanı	-Metal alaşımlarının tanımlanması -Kalite kontrolü geri dönüşüm yönetimlerine yardımcı olması -Hızlı sonuç vermesi -Numunenin tamamına zarar vermemesi
Spektral Test(Kimyasal)	-Malzemenin kimyasal bileşiminin belirlenmesi.	-Numune yüzeyine yüksek enerjili kıvılcım uygulanır, çıkan ışık spektrumu analiz edilir.	-C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, V, Ti gibi elementlerin yüzdesel miktarı	-Zaman alıcı ve özel ekipman gerektirmesi	-Yalnızca yüzeysel analiz yapması -Cihaz maliyeti yüksek

Çeliğin hangi tahribatlı testinin uygulanacağı, testin amacına ve elde edilmek istenen bilgilere bağlıdır. Örneğin, çekme testi mekanik dayanımı ölçmek için tercih edilirken, çentik darbe testi malzemenin ani yükler karşısındaki tepkisini ölçmek için uygundur. Eğme ve kırma testleri, malzemenin çatlamaya karşı direncini anlamaya yardımcı olurken, sertlik testleri yüzey dayanımını belirlemek için kullanılır.

Çeliğin korozyonu

Korozyon, genel anlamda maddelerin, özellikle de metal ve alaşımların, çevresel faktörlerin etkisiyle kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu aşınmasıdır. Metal yüzeyinde meydana gelen bu karmaşık ve heterojen tepkimeler, yapısal bozulmalara ve fiziksel çözünmeye yol açar. Platin ve altın gibi soy metaller korozyona karşı dayanıklıyken, demir-çelik başta olmak üzere birçok metal korozyona uğrayabilir. Çelik malzeme, maruz kaldığı korozyon miktarına bağlı olarak zamanla yapısal bütünlüğünü kaybedebilir ve kullanılamaz hale gelebilir. Bu nedenle, korozyonun önlenmesi ve kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır. Yeniden kullanılacak olan çelik için de testlerden geçerek kullanılabilme durumu analiz edilmelidir [68].

Çeliğin korozyon testleri

Çeliğin yeniden kullanımında en önemli engeller birisi malzemenin korozyona uğramasıdır. Buna maruz kalıp kalmadığının test edilmesi gerekmektedir. Korozyon bazen gözle görülecek kadar net olsa da bazen testlerden geçmesi gerekmektedir.

Test süreci

Test sürecinde iilk olarak numune hazırlığı yapılmalıdır. Belirli boyutlarda numune hazırlanır. Numune hazırlığından sonra test ortamının hazırlanması gerekmektedir. Numuneler tuzlu su spreyi, asitli veya bazik çözeltiler gibi çeşitli koşullara maruz bırakılır. Test uygulanırken tuz sprey, daldırma ve nem testleri yapılmaktadır. Tuz sprey testi en yaygın kullanılan yöntemdir. Tuz spreyi uygulandıktan sonra malzemenin bu çözelti altındaki davranışı gözlemlenir. Daldırma testinde numuneler belirli bir süre kimyasal çözeltilere batırılmaktadır. Nem testinde ise yüksek nem koşullarında korozyon dayanıklılığı

ölçülmektedir. Malzemenin korozyon dayanıklılığı ölçülerek uygun koruyucu önlemler belirlenir. Ölçümler yüzeysel olarak görsel ve mikroskopik olarak yapılmaktadır.

İdeal sonuçlar

- Düşük korozyon oranı ve hızı
- Yüksek elektrokimyasal direnç
- Görsel ve mikroskobik olarak minimum aşınma
- Tuzlu su ve nem gibi çevresel faktörlere karşı yüksek dayanım

Tahribatsız testtir, çünkü malzemenin iç yapısına veya mekanik bütünlüğüne zarar vermez. Ancak uzun süreli maruz bırakıldığında test edilen yüzeyde korozyon oluşabilir, bu nedenle bazı durumlarda numunenin tekrar kullanımı sınırlı olabilir [69].

3.7. İkincil Çeliğin Kullanımına Örnek Projeler

İkincil çeliğin yapı projelerinde kullanımı, hem çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamak hem de döngüsel ekonomi ilkelerini desteklemek açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu tür uygulamalarda, daha önce farklı yapılarda kullanılmış çelik elemanların yeniden değerlendirilmesi söz konusudur. Yeniden kullanım, yalnızca malzemenin fiziksel özelliklerinden faydalanmakla kalmaz, aynı zamanda karbon ayak izini azaltarak yapım süreçlerinin çevresel etkilerini de düşürür. İkincil çeliğin projelere entegrasyonu, tasarım sürecinde esneklik ve yaratıcılık gerektirirken; aynı zamanda mühendislik, standartlar ve belgelemeye dair özel dikkat ve yöntemler de talep eder. Bu konu ile ilgili birkaç proje tezin devamında detaylı incelenmiştir.

<u>Holbein Gardens Projesi</u>

Holbein Gardens projesi ikincil çelik kullanımı için verilebilecek güzel örneklerden birisidir. Londra'da bulunan bir projedir. Mevcutta bulunan bir binada ekleme ve tadilat projesi olmuştur. Proje görseli Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Holbein Gardens projesi[70]

Tüm bina ikincil çelikle yapılmamış, sonradan yapılan kısımlarında ikincil çelikten yararlanılmıştır. Proje ile ilgili genel bilgiler Çizelge 3.17'de verilmiş olup yeniden kullanılan çelik miktarı ve somutlaştırılmış karbon tasarrufu da proje bittikten sonra hesaplanarak çevreye olan duyarlılıkları öne çıkmıştır.

Çizelge 3.17. Holbein Gardens proje künyesi [70]

Proje türü	Ticari
Yerleşim alanı	2.363 m²
Proje metrekaresi	25.000 m²
Yer	Londra, Sloane Meydanı
Proje yılı	2022
Proje özeti	1980'lerden kalan ofis yapısının yenilenmesi ve 1 katlı uzantısı
Yeniden kullanılan çelik	24 ton
Somutlaştırılmış karbon tasarrufu	35 ton



Şekil 3.8. Proje çeliklerinin işlem süreci [71]



Şekil 3.9. Proje çeliklerinin yeniden kullanımı [71]

Bu proje, Belgravia'daki Sloane Meydanı'nda yer alan ve 1980'li yıllardan kalan bir ofis binasının yeniden geliştirilmesi ile ona eklenen tek katlı bir uzantının tasarımını kapsamaktadır. Yeniden işlevlendirilen yapı, toplamda 25.000 metrekarelik çağdaş bir çalışma alanı oluşturmuştur.Çalışma kapsamında, mevcut yapıya %25 oranında alan artırımı ve üst kat eklentisi gerçekleştirilmiş; bu süreç yaklaşık 70 ton çelik kullanımı gerektirmiştir. Projede kullanılan toplam çeliğin yaklaşık %35'i, yani 24 tonu, yeniden kullanım yoluyla sağlanmıştır [70].

İngiltere'de çeliğin yeniden kullanımına yönelik erken örneklerden biri olan bu projede, çeliğin önemli bir kısmı Grosvenor'un portföyünde bulunan diğer yıkım sahalarından, özellikle Bermondsey'deki eski Bisküvi Fabrikası ile ABD Eski Büyükelçilik binasından elde edilmiştir. Bu sahalardan toplamda 9 ton geri kazanılmış çelik sağlanmış, ek olarak Cleveland Steel and Tubes firmasından temin edilen 15 tonluk ikincil çelik ile çatı katı uzantısının yapımı tamamlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu yeniden kullanım sayesinde, yaklaşık 35 tonluk karbon salımı tasarrufu sağlanmıştır. Hesaplamalara göre, geri kazanılmış çeliğin imalat sonrası karbon ayak izi 0,3 $kgCO_2/kg$ olarak ölçülmüştür; bu değer, üretim dahil birincil çelik için hesaplanan 1,7 $kgCO_2/kg$ ortalamasına kıyasla önemli bir azalma göstermektedir [70].

Geri kazanılmış çeliğin kalitesi, test ve sertifikasyonları

Çeliklerin bazılarının testleri ve orjinal sertifikaları bulunmaktaydı. Bazı çeliklerin sertifikasyonu yoktu ancak yeni durumdaydı. Bermondsey'deki bisküvi fabrikasından gelen çelik çıkarılması kolay ince bir boya tabakası ile iyi ve hasarsız durumdaydı. Ancak yine de mevcut sertifikaları ve etiketleri doğrulamak için testler kullanıldı. Cleveland Steel and Tubes(CST)'tan gelen çeliklerden bazısı film setinden çıkarılan çeliklerdi. Bunlar herhangi bir kaplama olmadan ve minimum bağlantı ve delik ile iyi durumdaydı. Bu firmadan alınan bazı çelikler yerel bir stokçudan alınmıştı ve bunların sertifikaları yoktu. Bu nedenle çelik bölümler ayrı ayrı test edilmiştir. ABD Büyükelçiliği'nden gelen çelik, sadece ince bir boya tabakasıyla iyi durumda bulunmuştur. Çelikler CE / UKCA işaretli olduğu için herhangi bir garanti sorunu yaşanmamıştır.

Geri kazanılmış çeliğin ekonomik etkileri

Projede ikincil çelik kullanımının başlangıç aşamasında, yıkım ve yeniden hazırlama süreçleri nedeniyle maliyetlerin kısmen daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak genel değerlendirmede, bu farkın ekonomik olarak nötr bir düzeye çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, malzemenin proje sürecinin erken safhalarında rezerve edilmesi sayesinde, 2021 sonu ile 2022 başında yaşanan çelik fiyatlarındaki ciddi artıştan kaynaklanabilecek ek maliyetlerden kaçınılmış ve önemli bir tasarruf sağlanmıştır [70].

Proje sürecindeki zorluklar ve başarılar

Bu proje kapsamında çeliğin yeniden kullanım süreci, programlama ve maliyet yönetimi açısından önemli dinamikler ortaya koymuştur. Mevcut betonarme iskeletli binadaki çelik elemanların yeni yapıda kullanılması planlanmış; ancak söküm, sınıflandırma ve hazırlık işlemlerinin 6–8 hafta sürecek olması nedeniyle proje takvimine uyum sağlanamamış, bu malzemeler müşterinin diğer projelerinde değerlendirilmiştir.

Yıkım öncesi saha denetimlerinde, Bermondsey Bisküvi Fabrikası'ndan elde edilen çeliklerin çoğu uygun bulunmamış(örneğin uygun olmayan kesitler, eski üretim standartları, beton kaplı yüzeyler); sadece küçük bir asma kattan sökülen, tekrarlı ve kolay taşınabilir

elemanlar yeniden kullanılmıştır. Ek olarak Cleveland Steel and Tubes ile eski ABD Büyükelçiliği'nden de uygun çelikler temin edilmiştir.

Söküm süreci, sağlık ve güvenlik gerekleri nedeniyle iskele destek sistemleri kurulmasını gerektirmiş ve maliyetleri artırmıştır. Cıvatalı bağlantıların doğrudan sökülmesi maliyet kontrolüne katkı sağlamıştır. Ayrıca, söküm sırasında çeliklerin uzunluk kaybı yaşaması olağan bir durum olarak gözlemlenmiştir [70].

Tasarım sürecinde, mevcut stoktaki geri kazanılmış çeliklere uyum sağlayacak esnek çözümler geliştirilmiş; farklı standartlardaki profiller (örneğin Avrupa HE serileri) tasarım çeşitliliğini artırmıştır. Yapı, kullanım ömrü sonunda sökülebilir olacak şekilde mekanik bağlantılarla tasarlanmıştır. Projede, geri kazanılan çeliklerdeki delik ve yüzey izleri korunarak estetik bir özellik olarak değerlendirilmiş ve kullanıcılar tarafından kabul görmüştür. Üretim aşamasında, her biri farklı ölçü ve özelliklerde toplam 350 çelik bileşen üretilmiş, bu durum imalat sürecine karmaşıklık getirmiştir. Ayrıca, CLT (Çapraz Lamine Kereste) panellerin entegrasyonu amacıyla bazı çelik elemanlardan sertleştirici parçaların çıkarılması gerekmiş, bu da ek zaman ve işçilik ihtiyacı doğurmuştur.

Tedarik zinciri

Müteahhitlerin çelik yeniden kullanım sürecine yeterince aşina olmamaları ve bu uygulamanın etkilerine ilişkin duydukları endişeler, başlangıçta maliyet tahminlerinin yüksek tutulmasına yol açmış olabilir. Bu durumu dengelemek amacıyla, hisse sahibi olan CST, proje sürecinin erken aşamalarında ana yükleniciye danışmanlık sağlamak üzere devreye girmiştir. CST'nin müşteri ile yakın iş birliği ve tedarik zincirinin tümünde çelik yeniden kullanımına yönelik güçlü desteği, projenin bu hedef doğrultusunda ilerlemesine önemli katkı sağlamıştır [70].

Brent Cross Town Trafo Merkezi

Brent Cross Town projesi, Avrupa'nın en büyük kentsel dönüşüm projelerinden biridir. Projede yer alan 80 MVA kapasiteli trafo merkezi için kullanılan çeliğin %45'i geri kazanılmış malzemelerden sağlanmış, böylece %40 karbon tasarrufu elde edilmiştir. Proje görseli Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Brent Cross Trafo Merkezi Projesi [72]

Projede geri dönüştürülmüş çelikler, petrol ve gaz sektöründeki artık borulardan temin edilmiş ve kalite testlerinden geçirilmiştir. Maliyet olarak, yeniden kullanılan çelik yeni çeliğe göre %25 daha ekonomik olmuştur. Süreçte, stok sınırlamaları ve tedarikçiyle iletişim eksiklikleri nedeniyle bazı elemanlarda birincil çelik kullanılmış ve 22 tonluk karbon tasarrufu potansiyeli kaçırılmıştır. Çizelge 3.18'de proje künyesi verilmiştir.

Çizelge 3.18. Brent Cross Trafo Merkezi proje künyesi [73]

Proje türü	Endüstriyel
Boyutu	21m yüksekliğinde 52m uzunluğunda, 115m çevre uzunluğu
Yer	Londra, Brent Cross
Proje yılı	2022
Proje özeti	Kuzey Londra'da büyük bir karma kullanılan yeniden geliştirme için trafo merkezi
Yeniden kullanılan çelik	33.46 ton
Somutlaştırılmış karbon tasarrufu	66 ton



Şekil 3.11. Brent Cross Trafo Merkezi Projesi [72]

Brent Cross Town, Şekil 3.11'de görselinden bakıldığında çeliğin soğuk görüntüsünün aksine renkli panellerle desteklenmiştir. Avrupa'nın en büyük kentsel dönüşüm projelerinden biri olup, birçok konut, ofis ve sosyal alanlara enerji sağlamaktadır. Bu proje için inşa edilen 80MVA kapasiteli trafo merkezi, 21 metre yüksekliğinde ve 115 metre çevresinde renkli panellerle çevrelenmiş, kamusal bir sanat eseri olarak tasarlanmıştır.

Projede en büyük yapısal elemanı oluşturan çelik işçiliği için konsept yapı mühendis firması olan Arup, yeniden kullanım önerisinde bulunmuş ve bu yaklaşım, 2030 karbon nötrlüğü hedefleri doğrultusunda müşteri ve proje ekibi tarafından desteklenmiştir. Sonuç olarak, yapıda kullanılan çeliğin yaklaşık %45'i geri kazanılmış malzemelerden sağlanmış, böylece %40 oranında karbon tasarrufu elde edilmiştir. Uzun kolonlar için geri dönüştürülmüş çelik borular tercih edilmiş, cephe taşıyıcılarında ise daha verimli bağlantılar için yeni çelik kullanılmıştır. Geri kazanılan çelikler, Cleveland Steel and Tubes firmasından temin edilmiş olup, ihtiyaç fazlası petrol ve gaz boru hattı projelerinden doğmuştur [73].

Geri kazanılmış çeliğin kalitesi, test ve sertifikasyonları

Tedarik edilen borular oldukça iyi durumdaydı. Çelik, SCI P427 protokolüne uygun olarak bağımsız olarak test edildi ve kaynak muayenesinden geçirilmiştir. Geri kazanılmış çelik CE / UKCA işaretliydi, bu nedenle herhangi bir garanti sorunu yaşanmamıştır.

Geri kazanılmış çeliğin ekonomik etkileri

2021'de yapılan bir maliyet analizi, ton başına geri kazanılmış malzeme maliyetinin yeni çelikten %50 daha düşük olduğunu gösterdi. Test, yüzey hazırlama ve nakliye gibi ek maliyetler göz önüne alındığında, yeniden kullanılan çeliğin maliyeti yeni çelikten %25 daha düşük olmuştur [73].

Proje sürecindeki zorluklar ve başarılar

Geri kazanılmış çelikle gerçekleştirilen tasarım süreci genel hatlarıyla geleneksel yaklaşıma benzer şekilde ilerlemiş, ancak üç temel noktaya özel önem verilmiştir: mevcut çelik elemanların kullanılabilirliğinin güvence altına alınması, tasarımın verimliliği ve tedarikçilerle erken aşamada kurulan iletişim. Tasarım verimliliği, sınırlı stok nedeniyle gereğinden büyük kesitlerin kullanılmaması açısından belirleyici olmuştur. Geri kazanılmış çeliğin yetersiz kaldığı cephe taşıyıcısı gibi bazı durumlarda, daha az hantal ve bağlantı açısından daha verimli olduğu için birincil çelik tercih edilmiştir. Her ne kadar çelik elemanlar bağımsız testlere tabi tutulmuş ve SCI P427 standardına uygun olarak kaynak denetiminden geçmiş olsa da, önceden delinmiş, farklı uzunluklara sahip bazı profiller; yeniden işleme gereksinimi, potansiyel boyutsal uyuşmazlık riskleri ve fazladan iş yükü nedeniyle tercih edilmemiştir.

Tedarik zinciri

Tasarım sürecinde, özellikle mimari konsept, taşıyıcı sistem ve bağlantı tasarımı gibi farklı disiplinlerin bir arada yürütüldüğü çelik yapı projelerinde, tasarım ekibi ile tedarik zinciri arasındaki etkin iletişim büyük önem taşımaktadır. Bu projede, başlangıçta geliştirilen tasarımlar proje ekibiyle paylaşılmış olsa da, daha sonra çelik yapı mühendisi tarafından yapılan revizyonlar çelik tedarikçisine yeterince açık ve zamanında aktarılmamıştır. Bu iletişim eksikliği sonucunda, daha önce ayrılan geri kazanılmış çelik malzemeler yeni tasarımla uyum göstermemiştir. Bu nedenle, bazı taşıyıcı elemanlar için birincil çelik kullanılması gerekmiş ve böylece yaklaşık 22 tonluk gömülü karbon tasarrufu potansiyeli kaçırılmıştır [73].

The Circular Building

The Circular Building, döngüsel ekonominin tüm ilkelerine uygun olarak tasarlanmış, tamamen sökülebilir ve yeniden kullanılabilir yapı bileşenleriyle inşa edilmiştir. Şekil 3.12'de projenin bağlamıyla birlikte görseli verilmiştir.



Şekil 3.12. The Circular Projesi [75]

Geri dönüştürülmüş çelik iskelet, QR kodlu malzeme takibi, SIPS duvar sistemi ve mekanik bağlantılarla desteklenmiştir. Tüm malzemeler kalite testlerinden geçirilmiş, malzeme pasaportları sayesinde izlenebilir hâle getirilmiştir. Bu yaklaşımla hem atık azaltılmış hem de maliyet düşürülmüştür. Tasarım süreci, estetik ve demontaj hedefleri nedeniyle uzamış, ancak proje eğitim ve farkındalık açısından önemli bir örnek olmuştur. Çizelge 3.19'da proje künyesi verilmiştir.

Çizelge 3.19. The Circular proje künyesi [73]

Proje türü	Prototip bina
Boyutu	Yaklaşık olarak 5x10m ölçülerinde 4.5m yükseklik
Yer	Londra
Proje yılı	2016
Proje özeti	2016 yılında Londra Tasarım Festivali için tasarlanmış ve inşa edilmiş bir prototip yapıdır. Bu yapı, Birleşik Krallık'ta döngüsel ekonomi ilkelerine göre tasarlanmış ilk binalardan biridir.



Şekil 3.13. The Circular projesi iç mekandaki yeniden kullanılan çelikler [75]

The Circular Building işlevsel bir yapı tasarlanıp inşa edilirken döngüsel ekonominin tüm prensiplerine yanıt veren bir yaklaşım olarak düşünülen bir projeydi. Tüm yapı bileşenlerinin yaşam döngüleri boyunca tam potansiyelleriyle kullanılması ve uygulanması gerekmekteydi. Aynı zamanda kullanıcı için konforlu ve estetik bir ortamın yaratılması düşünülmüştür. Şekil 3.13'te projenin iç görselleri verilmiştir.

Mevcut yapı teknikleri geri dönüşecek olan malzemelerle entegre edilmiştir. Mekanik bağlantıların yerine hassas mühendislik detaylarını kullanan ve test edilen bir sistem oluşturulmuştur. Sonuç olarak, oldukça düşük atık üreten, kendi kendini taşıyabilen ve demonte edilebilir bir SIPS (Yapısal İzole Panel Sistemi) duvar sistemi geliştirilmiştir. Duvar ile geri dönüştürülmüş çelik iskelet arasındaki kelepçe bağlantılar sayesinde her iki bileşen de gelecekte yeniden kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Dış cephe kaplaması ve döşeme, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmiş, ısıl işlem görmüş, dayanıklı ve geri dönüştürülebilir ahşaptan üretilmiştir [75].

Geri kazanılmış çeliğin kalitesi, test ve sertifikasyonları

Proje kapsamında kullanılan tüm yapı bileşenleri, QR kodlarıyla etiketlenerek dijital bir "Malzeme Veritabanı"na kaydedilmiştir. Bu sistem, her bir parçanın üretim bilgileri, malzeme özellikleri ve gelecekteki yeniden kullanım potansiyelini izlemeye olanak tanımaktadır. Geri dönüştürülmüş çeliklerin yeniden kullanımı öncesinde, bu malzemelerin mekanik özelliklerini ve uygunluğunu değerlendirmek için çeşitli testler uygulanmıştır. Bu

testler arasında çekme, akma ve darbe dayanımı gibi mekanik testler yer alır. Ayrıca, çeliklerin kimyasal bileşimi ve iç yapısı da incelenerek, standartlara uygunluğu doğrulanmıştır [74].

Geri kazanılmış çeliğin ekonomik etkileri

İlk satın alım maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüş ve yeni hammadde temininden kaynaklanan mali yükleri azaltmıştır. Malzeme pasaportları ve dijital izleme sayesinde malzemeler daha verimli bir şekilde envantere dahil edilerek atık azaltımına fayda sağlamıştır [76].

Proje sürecindeki zorluklar ve başarılar

Tüm yapı elemanları QR kodlu dijital etiketlerle kayıt altına alınmıştır. Bu sayede binanın her parçası izlenebilir, analiz edilebilir ve yeniden kullanılabilir hâle gelmiştir. Geliştirilen SIPS paneller, yapının düşük atıkla üretilmesini ve kolaylıkla sökülmesini sağlamıştır. The Circular Building, 2016 Londra Tasarım Festivali'nde sergilenerek mimarlar, mühendisler ve öğrenciler için bir eğitim aracı ve ilham kaynağı olmuştur. Zorluklarına bakıldığında uygun boyut, kalite ve teknik özelliklere sahip kullanılmış çelik elemanları bulmak zaman almıştır. Çelik elemanların teste tabii tutulmaları gerekmiştir. Binanın hem estetik hem de tamamen sökülebilir olması hedeflenmiştive bu nedenle bağlantı detaylarının ve sistem elemanlarının özel olarak geliştirilmesi gerekmiş, sonucunda tasarım süreci uzamıştır [75].

Türkiye’de ikincil çelik kullanımı

Mevcut binalardan çelik geri kazanımı, mevcut bilgiler binaların yeniden kullanım için tasarlanmadığı gerçeği ve çelik elemanları bu elemanlara zarar vermeden geri kazanmanın zorlukları, yeni binalar zorluk oluşturmaktadır. Yeniden kullanımın yeni binalarda büyük çapta benimsenmesine yönelik temelleri oluşturmak ve mevcut binalarda yeniden kullanım potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için bütün bir tedarik zincirinin iş birliği gereklidir. Tüm tedarik zinciri aktörleri hem mevcut hem de yeni binalar için yeniden kullanımı uygulamak, sağlam ve tutarlı kurallar ile standardizasyon çerçevesini pekiştirmek üzere gerekli araçları geliştirmek için koordineli bir şekilde çalışmalıdır [46]. Türkiye’de hurda çelik her ne kadar çok kullanılıyor olsa da ikincil çelik kullanımında aynı durum söz konusu

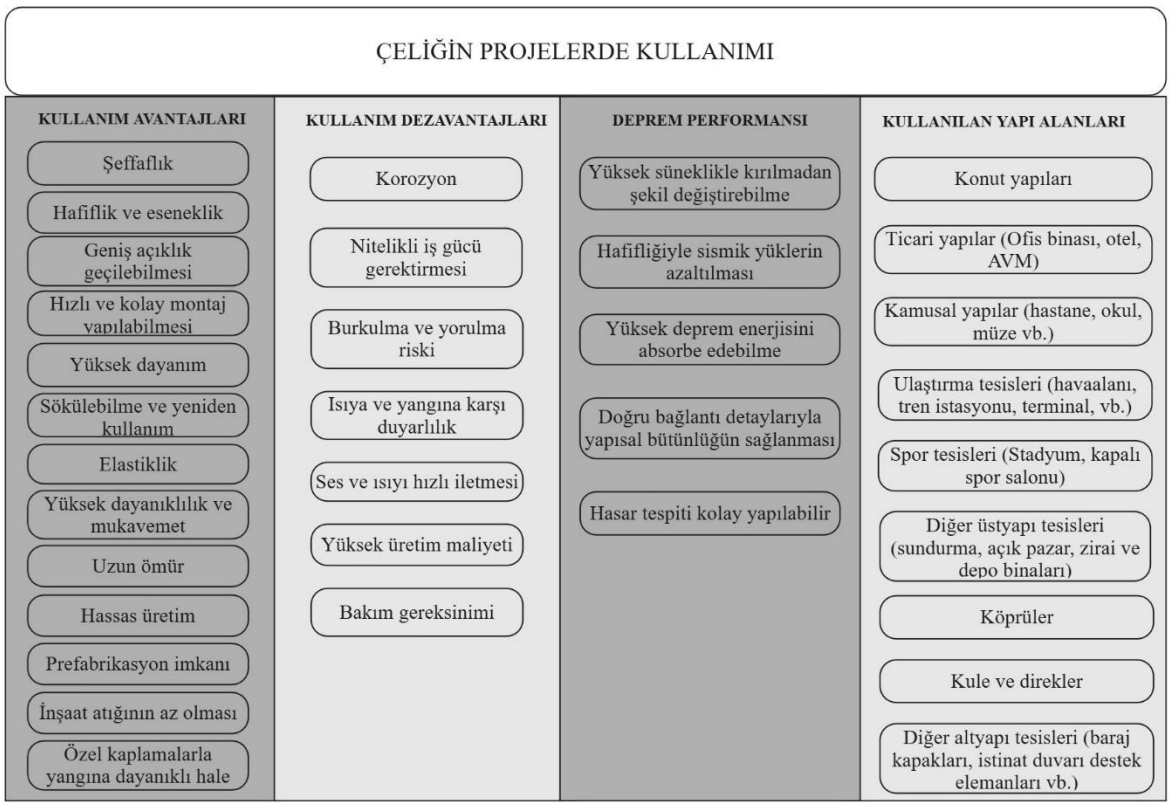
değildir. İkincil çellik için altyapının yeteri kadar sağlanamaması sebebiyle ikincil çelik için literatürde fazla örneğe rastlanmamıştır. Örnek olarak İzmir Sürdürülebilirlik Merkezi Proje Yarışmasından S-Hub Projesi örnek olarak verilebilir. Proje ofisi FREA, ECO.laud ve Studio İm'dir. Yarışmada 2. Olan bu projede döngüsel yapım modeli ele alınmıştır. Döngüsel yapım modeli kapsamında, yapıların ömrünü tamamladığında yıkılarak atığa dönüşmesi yerine, sökülerek bileşenlerine ayrılması ve bu bileşenlerin yeniden kullanılması hedeflenmektedir. Bu yaklaşımla hazırlanan projede, Aliağa'daki gemi söküm tesislerinden elde edilen geri dönüştürülmüş çeliklerin sertifikalı haddehanelerde işlenerek yapısal çelik olarak kullanılması planlanmıştır. Ayrıca, proje alanındaki mevcut yapı bileşenleri ve yerinde sökülen malzemeler ileri dönüşüm ilkesiyle değerlendirilmiş, beton parçaları gabion duvarlara, metal elemanlar ise yeni cephe ve iç mekân bileşenlerine dönüştürülmüştür. Böylece hem kaynak tüketimi azaltılmış hem de atık sorunu yapım sürecine entegre edilerek yeni bir mimari üretim modeline dönüştürülmüştür [77]. Bu yaklaşım, Türkiye'de ikincil çelik kullanımının mümkün ve uygulanabilir olduğunu gösteren örneklerden biridir.

İkincil çelik için Türkiye'den araştırma yapıldığında bir başka örnek olarak da Arkim ile Nurol İnşaat arasında gerçekleşen alışveriş örnek olarak verilebilir. Arkim yeni tesisinde kullanmak üzere Nurol'un kapalı şantiyesinden ikinci el çelik konstrüksiyon satın almıştır. Nurol İnşaat, kapanan şantiyelerindeki ikinci el malzemeler için TMM(Türkiye Materials Marketplace) Platformu ile iletişime geçmiş ve platform aracılığıyla tesis inşa etmekte olan Arkim'e ulaşmıştır [78].

4. MATERYAL VE METOT

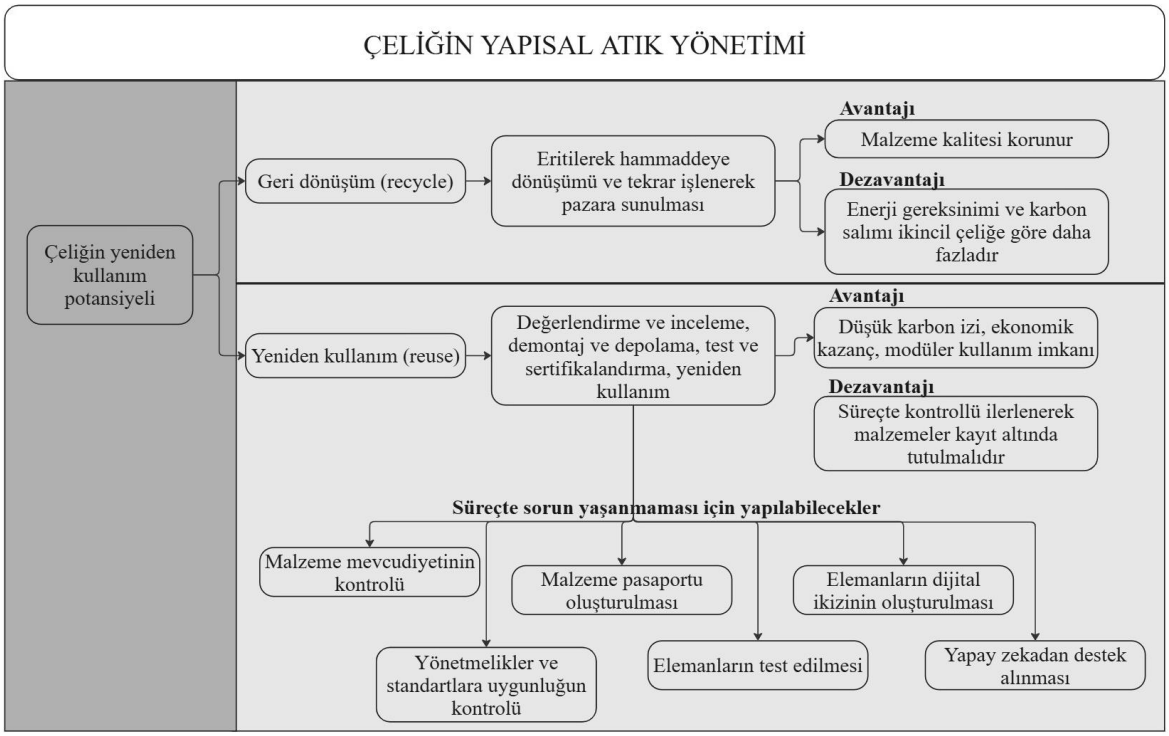
Bu çalışma, çeliğin sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve yeniden kullanım potansiyelini döngüsel ekonomi bağlamında incelemektedir. Araştırmada literatür taraması, örnek proje analizleri, yönetmelik karşılaştırmaları ve sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır. Çelik elemanların yapısal performansı, sökülebilirliği ve mimari tasarıma etkisi değerlendirilerek yeniden kullanım stratejileri ortaya konmuştur.

Araştırma sürecinde yapılan analizler sonucunda, çelik malzemenin hem birincil hem de ikincil kullanım senaryolarında diğer yapı malzemelerine kıyasla çeşitli açılardan avantaj sağladığı belirlenmiştir. Özellikle deprem anındaki performansı ile öne çıkan çeliğin, yapının sökümü sonrasında doğrudan yeniden kullanılabilir olması, sürdürülebilirlik açısından dikkat çekici bir potansiyel ortaya koymaktadır. Şekil 4.1, literatür taramasındaki Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.6 incelenmiş olup; bu çizelgeler sonucunda hazırlanmış ve çeliğin avantaj, dezavantaj, kullanım alanlarından bahsedilmiştir.



Şekil 4.1. Çeliğin projelerde kullanımı (Yazar tarafından düzenlenmiştir)

Geri dönüşüm senaryosu, çeliğin eritilerek yeniden hammadde formuna dönüştürülmesi ve üretim sürecine yeniden dahil edilmesini kapsamaktadır. Bu yöntemin temel avantajı malzeme kalitesinin korunmasıdır; ancak yüksek enerji gereksinimi ciddi bir çevresel dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca, yeniden kullanım senaryosu çeliğin fiziksel bütünlüğü korunarak demontaj, test, sertifikalandırma ve yeniden değerlendirme yoluyla başka bir projede doğrudan kullanılmasını içerir. Bu yöntem, düşük karbon salımı, maliyet tasarrufu ve modüler sistem kullanımına olanak sağlaması açısından oldukça avantajlıdır. Ancak sürecin kontrolsüz ilerlemesi durumunda malzeme geçmişi ve güvenilirliği ile ilgili problemler oluşabilmektedir. Bu tür sorunların önlenmesi amacıyla; malzeme mevcudiyetinin takibi, malzeme pasaportu oluşturulması, yönetmelik ve standartlara uygunluk kontrolleri, elemanların test edilmesi, dijital kimliklendirme ve yapay zekâ destekli karar sistemlerinden yararlanılması gibi çözüm önerileri sunulmuştur. Bu çok katmanlı yaklaşım, çeliğin yapı ömrü boyunca çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır. Çeliğin yapısal atık yönetimiyle ilgili geri dönüşüm ve yeniden kullanım senaryoları Çizelge 3.7, 3.9, 3.10, 3.13 ve 3.15'ten hareketle Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

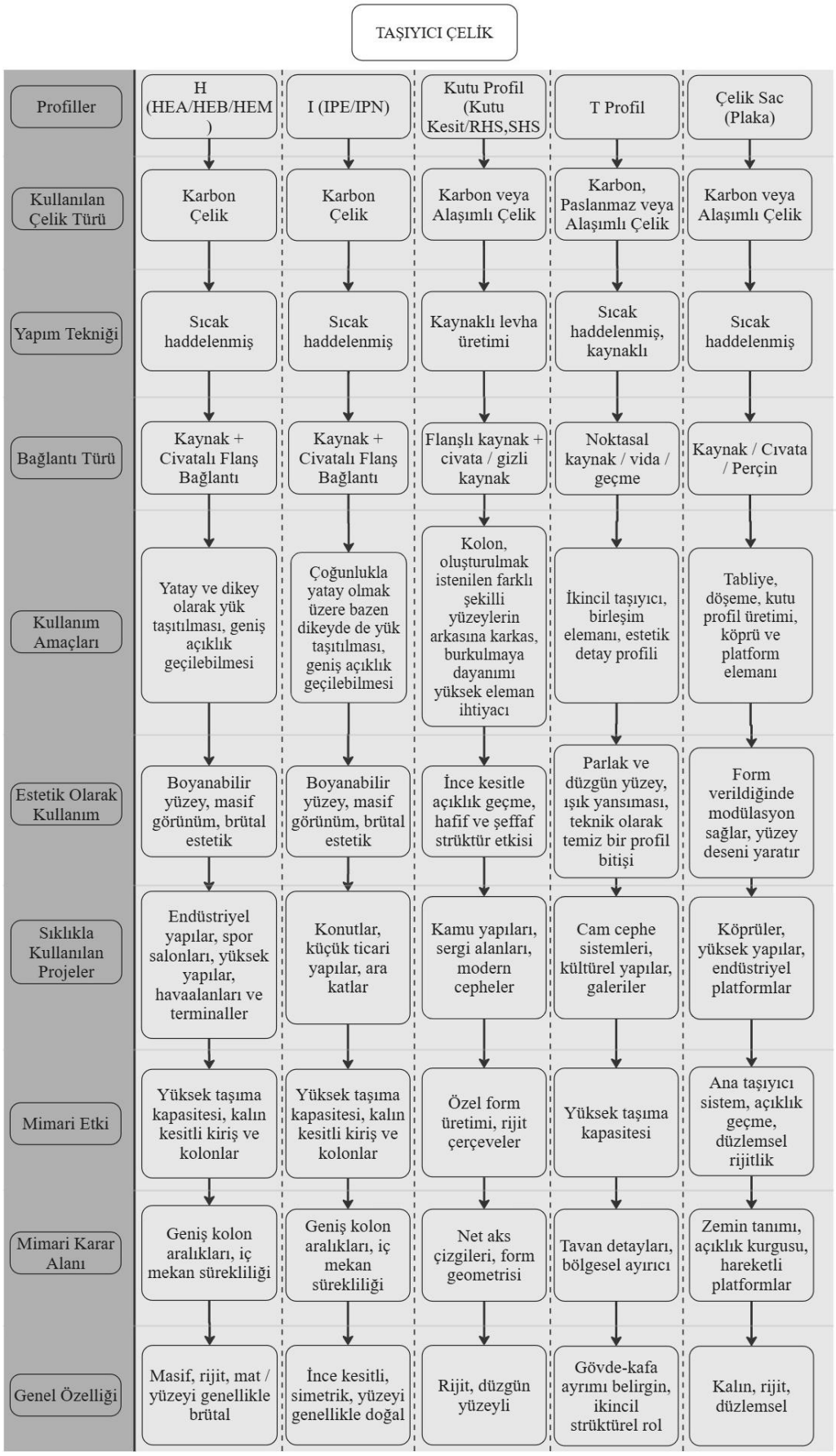


Şekil 4.2. Çeliğin yapısal atık yönetimi (Yazar tarafından düzenlenmiştir)

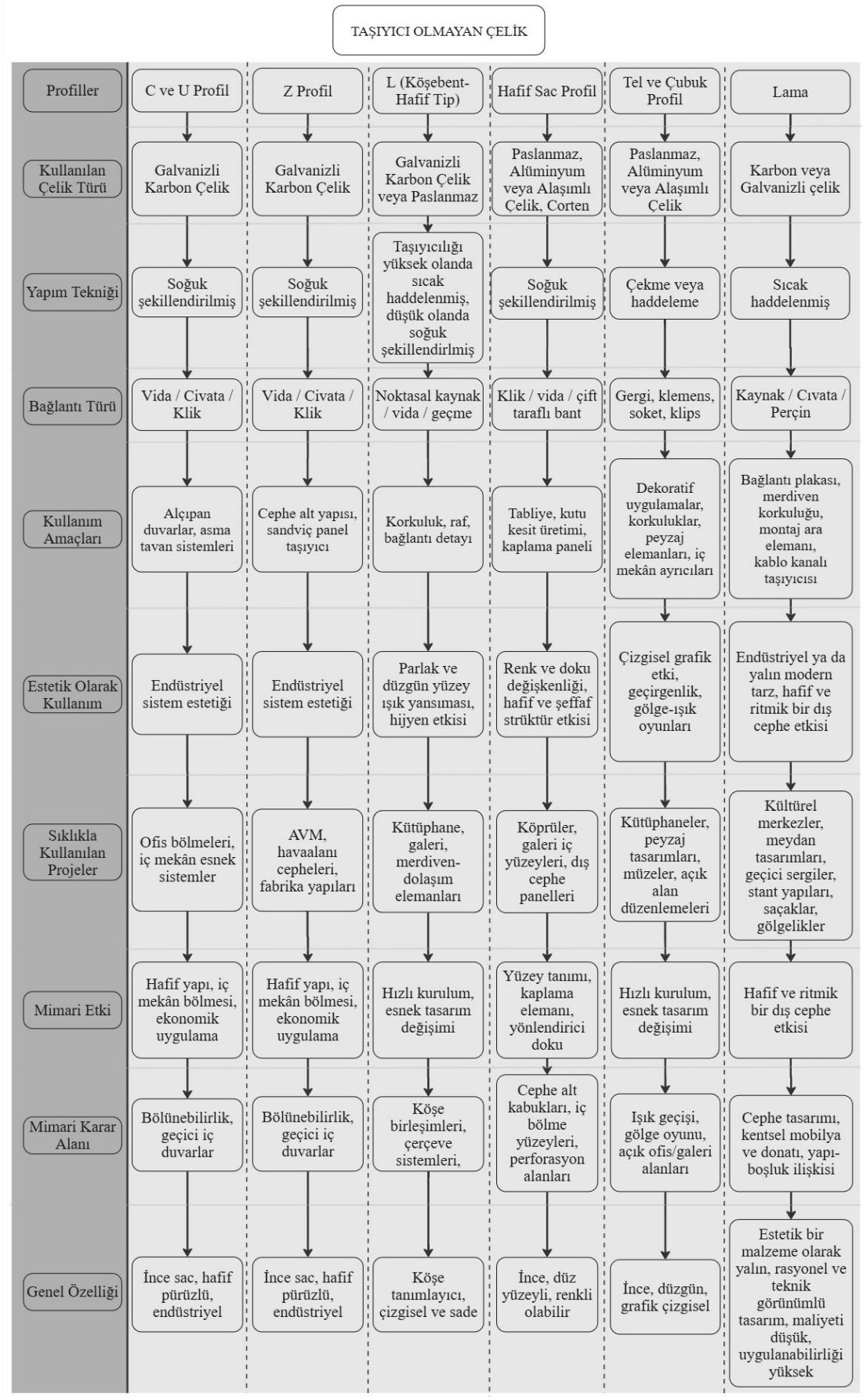
Çeliğin potansiyelinden en verimli şekilde yararlanılabilmesi için yalnızca malzemenin mekanik özelliklerinin değil, aynı zamanda yapının kullanım amacı, işlevsel gereksinimleri, çevresel koşulları ve yaşam döngüsü içindeki yeri de dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, çelik türünün ve profil tipinin proje tipine ve kullanım amacına uygun olarak belirlenmesi kritik bir karar alanıdır. Çelik, sahip olduğu modülerlik, dayanıklılık, sökülebilirlik ve dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde hem taşıyıcı hem de taşıyıcı olmayan sistemlerde esnek bir çözüm aracı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda yapılan sınıflandırmalar ve incelenen yerli ve yabancı vaka analizleri aracılığıyla, farklı çelik türlerinin hangi yapılarda, hangi aşamalarda, nasıl bir rol üstlendiği ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler, çeliğin yaşam döngüsü boyunca yeniden kullanılabilirliğini mümkün kılacak kararların, yalnızca yapım aşamasında değil, sürecin en erken aşaması olan tasarım safhasında alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu durum, mimarın yalnızca biçimsel ve işlevsel kararlar veren bir aktör değil; aynı zamanda çevresel ve yapım temelli süreçlerin yöneticisi ve kurgulayıcısı olarak konumlandırılmasını gerektirmektedir. Malzeme seçimi, birleşim detaylarının tanımlanması, montaj ve demontaj olanaklarının göz önünde bulundurulması gibi kararlar, çeliğin ikinci bir yaşam döngüsüne hazırlanması açısından belirleyicidir.

Bu doğrultuda geliştirilen analizler, çelik yapı bileşenlerinin söküm sonrasında yeniden kullanımını olanaklı kılacak şekilde tasarımın nasıl yönlendirilmesi gerektiğine dair bir yol haritası sunmaktadır. Dolayısıyla, söz konusu analizler yalnızca mevcut yapım süreçlerinin değerlendirilmesi değil; aynı zamanda gelecekteki dönüşüm, adaptasyon ve yeniden üretim potansiyelinin tasarım aşamasından itibaren hesaba katılmasını sağlayan stratejik bir karar kılavuzu niteliği taşımaktadır. Literatür taramaları ve güncel uygulama örneklerinden elde edilen bulgular ışığında, çelik profiller işlevlerine göre taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan olarak iki temel grupta incelenmiş; bu ayrım, malzemenin üretim süreçlerinden başlayarak yaşam döngüsüne etkisi bakımından literatür incelemelerinden hareketle Çizelge 3.3, 3.4 ve 3.5 baz alınarak çelik taşıyıcı olan profiller üretimlerinden itibaren Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te incelenmiştir.



Şekil 4.3. Taşıyıcı çeliğin üretimi ve ürüne dönüşmesi (Yazar tarafından düzenlenmiştir)



Şekil 4.4. Taşıyıcı olmayan üretimi ve ürüne dönüşmesi (Yazar tarafından düzenlenmiştir)

Civatalı ve klikli bağlantılar yeniden kullanım için en uygun olanlardır. Kaynaklı ve kalıcı bağlantılar söküm sırasında zarar riski taşımaktadır. Galvanizli ve paslanmaz çelikler, malzeme bozulmadan yeniden kullanımda yüksek performans göstermektedir. Hafif profiller geçici yapılar ve modüler sistemlerde sök-tak mantığına çok daha yatkındır. Bağlantı türü olarak civatalı/vidalı/klikli sistemlerin, malzeme olarak paslanmaz veya galvanizli çeliklerin, yapım tekniği olarak da soğuk şekillendirme yönteminin tercih edilmesinin, çeliğin ömrünü uzattığını ve döngüsel kullanımda artıları olduğu görülmektedir.

Üretim olarak farklı olmaları farklı amaçlar için kullanılmalarını sağlamıştır. Kullanım amaçları, estetik olarak kullanımları ve bunlar sonucunda sık kullanıldıkları projeler de farklılık göstermiştir. Çelik profil türlerinin yalnızca yapısal gereksinimler doğrultusunda değil; estetik kaygılar, yapım teknikleri ve yeniden kullanım potansiyeli göz önünde bulundurularak seçildiği ortaya konmuştur.

Çelik yapı elemanlarının kullanım amacı ile estetik etkileri arasındaki ilişki, malzeme seçimini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olarak belirlenmiştir. Örneğin, H ve I profilleri gibi taşıyıcı elemanlar, yapısal ağırlıkları ve masif görünümleri ile brütalist estetik anlayışını desteklerken; kutu profiller ve hafif sac elemanlar, daha hafif ve geçirgen mekânsal kurgulara olanak sağlamaktadır.

Sürdürülebilir mimari bağlamda, taşıyıcı olmayan hafif çelik profillerin (C, U, Z, L profilleri gibi) modüler montaj ve kolay söküm avantajları sayesinde yeniden kullanım potansiyellerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle klikli, vidalı ve civatalı bağlantı teknikleri, çelik elemanların ikincil kullanım döngüsüne zarar vermeden geçiş yapabilmesini mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmada yapılan analizler, çelik profil türlerinin yalnızca taşıyıcılık kapasiteleriyle değil, aynı zamanda oluşturdukları mimari mekân etkileri ve genel estetik karakteristikleriyle de tasarım kararlarını doğrudan etkilediğini göstermektedir. H ve I profilleri gibi yüksek taşıma kapasiteli, kalın kesitli profiller, geniş açıklık geçilmesi ve iç mekân sürekliliği sağlaması açısından avantaj sunarken; bu elemanlar aynı zamanda masif, mat ve brütal yüzey karakteristikleriyle endüstriyel estetik anlayışını desteklemektedir. Bu tür profiller, doğru bağlantı teknikleri kullanıldığında (örneğin civatalı flanş bağlantılar),

sökülebilirlik ve yeniden kullanım potansiyellerini de artırmaktadır. Öte yandan, kutu profiller, form geometrisi ve net aks çizgileri ile hem yapısal hem de estetik bir düzen kurmakta, rijit çerçeve sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Yüksek mukavemet özellikleri sayesinde uzun ömürlü ve dayanıklı bir çözüm sunmakta, yaşam döngüsü boyunca defalarca kullanılabilmektedir.

Taşıyıcı olmayan profiller (C, U, Z, L, hafif sac ve tel/çubuk profiller), daha esnek kullanım alanlarına sahiptir. Bölünebilir iç mekânlar, geçici duvar sistemleri ve hareketli platformlar gibi uygulamalarda kullanılan bu profiller, hafiflikleri, modüler yapıları ve kolay montaj-söküm özellikleri sayesinde sürdürülebilir tasarım ilkeleriyle doğrudan örtüşmektedir. Özellikle hafif sac profiller ve tel/çubuk profiller, geçirgenlik, gölge oyunları ve hafif yapı etkisi yaratarak, hem estetik hem de işlevsel esneklik sunmakta; yapıların farklı kullanım senaryolarına adaptasyonunu kolaylaştırmaktadır. Bu bağlamda, çelik profil türlerinin seçimi, sadece taşıyıcılık performansı açısından değil, aynı zamanda mekânsal esneklik, estetik süreklilik ve yapı yaşam döngüsü içerisinde yeniden değerlendirme olanakları bakımından da kritik bir tasarım stratejisi oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda, estetik kararlar ile malzeme teknik özellikleri arasında doğrudan bir bağ kurulması, yapıların yaşam döngüsü sürecinde yeniden kullanım, geri dönüşüm ve çevresel etkiyi azaltma hedeflerine ulaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Mimarın çelik malzeme seçiminde; hem yapısal hem de görsel etkileri dikkate alarak, sürdürülebilir yaşam döngüsü senaryolarını destekleyecek çözümleri tercih etmesi kritik bir tasarım stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Grafiklerdeki bütüncül yaklaşım, çeliğin sadece bugünkü işlevine değil, gelecekteki potansiyeline de odaklanan sürdürülebilir bir tasarım ve yapım anlayışını teşvik etmektedir. Böylece çelik, döngüsel ekonomi prensipleri çerçevesinde yalnızca dayanıklı ve estetik bir malzeme olarak değil; aynı zamanda çevresel sorumluluğu destekleyen stratejik bir yapı bileşeni olarak değerlendirilmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler ve kuramsal araştırmalar doğrultusunda, çelik yapı elemanlarının geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerine ilişkin önemli bulgulara ulaşılmıştır. Araştırma; yapı sektörünün döngüsel ekonomiye geçişindeki mevcut durumu, çelik malzemenin bu süreçteki rolünü ve mimarlık disiplininin katkı potansiyelini çok yönlü olarak değerlendirmeyi hedeflemiştir. Çeliğin yapı yaşam döngüsü çerçevesinde sürdürülebilirliğini etkileyen geri dönüşüm ve yeniden kullanım uygulamaları üzerine yapılan incelemeler doğrultusunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

- Deprem ülkelerinde çelik kullanılmasının faydalı olduğu gözlemlenmiştir.
- Çelik elemanların eritilerek yeniden hammaddeye dönüştürülmesini içerdiğinden, hurda çeliğin enerji tüketimi ve karbon salımı ikincil çeliğe kıyasla daha maliyetli ve çevresel olarak daha zararlıdır.
- Yeniden kullanım süreci; çelik elemanların taşıyıcılık özellikleri korunarak, test edilip ikinci bir yapıda doğrudan değerlendirilmesini kapsamakta ve çok daha düşük çevresel etkiyle sonuçlanmaktadır.
- Yeniden kullanım, aynı zamanda ekonomik olarak daha az maliyetli, daha az enerji gerektiren ve zaman açısından daha kısa uygulama süreleriyle öne çıkmaktadır.
- Çeliğin maruz kaldığı yükler, korozyon, darbe, yangın veya benzeri dış etkenler malzemenin performansını düşürebilmektedir. Özellikle kaynaklı birleşim yerleri, aşırı gerilmeye uğradıysa dikkatli incelenmelidir.
- Mevcut yapı stoğunun büyük bir kısmı, sökülebilir ve yeniden kullanılabilir detaylara sahip olmayıp, yeniden kullanım için tasarlanmamıştır.
- Türkiye'de ikinci el çelik piyasası yeterli seviyede değildir; bu da tedarik sürecinde belirsizlik ve lojistik sorunlara neden olmaktadır.
- Yeniden kullanım öncesinde yapılması gereken test süreçleri (taşıma kapasitesi, deformasyon, korozyon durumu gibi) maliyetli ve zaman alıcıdır.
- Yeniden kullanım için en uygun elemanların genellikle modüler ve cıvatalı birleşim detaylarına sahip taşıyıcı çelik profiller olduğu tespit edilmiştir.
- Sahada sökülen çelik elemanların mekanik dayanımlarının büyük ölçüde korunabildiği, ancak yüzey korozyonu ve deformasyonun yeniden kullanım öncesi kontrol gerektirdiği gözlemlenmiştir.

- Standardizasyon eksikliği, malzeme geçmişine dair veri yetersizliği ve test protokollerinin maliyeti, yeniden kullanımın önündeki başlıca engeller olarak tanımlanmıştır.
- Türkiye'de ikinci el çelik pazarının yeteri kadar oluşmadığı, Avrupa'daki sistemli yaklaşımların örnek alınabileceği değerlendirilmiştir.
- Tasarım sürecinde döngüsel ekonomi ilkeleri benimsenmediği sürece, yapıların gelecekte yeniden kullanılabilir olması zora girmektedir.
- Mimarın erken aşamada yeniden kullanılabilir elemanları öngörerek tasarımı şekillendirmesi, ikincil kullanıma uygunluk potansiyelini doğrudan artırmaktadır.
- Malzeme pasaportu, sökülebilirlik, estetik uyum gibi kararlar mimarın kontrolünde şekillenmektedir.
- Çelik elemanların ikinci el piyasadan temin edildiği projelerde, tasarım sürecinin bu duruma göre şekillendiği ve malzeme seçiminin yaratıcı biçimde değerlendirildiği görülmüştür.
- Mimarlar, çelik yapı tasarımında sökülebilirlik prensipleri, malzeme pasaportu uygulamaları ve modülerlik gibi stratejileri entegre ederek yeniden kullanım sürecini destekleyebilir.
- Örnek projelerde sıfır atık yaklaşımı, modülerlik, demontaj planlaması gibi sürdürülebilirlik ilkeleri temel alınmıştır.
- Avrupa'da yaygınlaşan "malzeme pasaportu" uygulamaları, çelik elemanların nerede, nasıl üretildiği, hangi yapıda kullanıldığı gibi bilgileri dijital olarak sunarak, yeniden kullanım kararlarını kolaylaştırmaktadır.
- Türkiye'de bu uygulama henüz gelişmemiştir; ancak bu tez çalışması, bu tür sistemlerin geliştirilmesinin döngüsel ekonomi açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
- İncelenen örnek projelerde (özellikle Avrupa merkezli kamu yapılarında), yeniden kullanımın yalnızca sürdürülebilirlik değil, aynı zamanda mimari estetik ve kavramsal tasarım açısından da yaratıcı biçimde değerlendirildiği görülmüştür.
- Başarılı projelerde mimar-mühendis iş birliği ve erken karar verme süreçleri, uygulamaların başarısını doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmanın temel hipotezi, "çelik yapı elemanlarının yeniden kullanım potansiyelini artırmak için, mimari tasarım sürecinden itibaren döngüsel ekonomi prensiplerine uygun

stratejiler geliştirilmesi gerektiği" önermesine dayanmaktadır. Bu doğrultuda, çeliğin yapı yaşam döngüsü içerisindeki çevresel ve yapısal etkileri, geri dönüşüm ve yeniden kullanım senaryoları, mevcut yönetmelik çerçevesi ve mimarın bu süreçteki rolü çok yönlü olarak incelenmiştir.

Araştırma süreci kapsamında öncelikle çeliğin fiziksel, yapısal ve çevresel özelliklerine dair detaylı bir literatür taraması yapılmış; ardından geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerinin teknik ve uygulamalı farkları ortaya konmuştur. Yeniden kullanımın çevresel etkiler, enerji tüketimi ve karbon salımı açısından çok daha avantajlı bir strateji olduğu; ancak bunun uygulanabilirliği için mimarlık disiplini başta olmak üzere tüm aktörlerin sürece bütüncül olarak dahil olması gerektiği tespit edilmiştir.

Bu süreçte;

- Geri dönüşüm sürecinin yüksek enerji ihtiyacına rağmen malzeme kalitesini büyük ölçüde koruyarak döngüye katkı sağladığı,
- Yeniden kullanımın ise çok daha düşük çevresel etkiyle, yapı elemanlarının doğrudan ikinci bir yaşam kazanmasını mümkün kıldığı,
- Ancak yeniden kullanım için gerekli olan test, belgeleme, malzeme pasaportu, standartlara uyum ve yönetmeliksel boşlukların, uygulamada ciddi engeller yarattığı görülmüştür.

Araştırma sonucunda, çelik yapı elemanlarının yeniden kullanım potansiyelinin ancak tasarım sürecinden itibaren döngüsel ilkelere göre planlanması ile tam anlamıyla değerlendirilebileceği sonucuna varılmıştır. Burada mimarın rolü yalnızca biçimsel tasarım değil, aynı zamanda malzeme seçiminden bağlantı detaylarına kadar yeniden kullanıma uygun sistemler geliştirmek şeklinde yeniden tanımlanmalıdır.

Bu tez, döngüsel ekonomiye geçişte yapı sektörüne yönelik aşağıdaki katkılarda bulunmuştur:

- Farkındalık: Türkiye'de sınırlı olan yeniden kullanım pratiklerinin nedenlerini ortaya koyarak bu konuda sektörel farkındalık oluşturur.

- Yönlendirici Bilgi: Geri dönüşüm ve yeniden kullanımın çevresel karşılaştırmalarını yaparak mimarlık ve mühendislik alanlarına yön gösterir.
- Politika Geliştirme Potansiyeli: Malzeme pasaportu, ikinci el çelik piyasası ve yönetmelik önerileriyle kamu politikalarının geliştirilmesine katkı sağlar.
- Disiplinlerarası Yaklaşım: Mimar, mühendis ve üretici rollerini yeniden tanımlayarak iş birliği temelli bir döngüsel tasarım süreci önerir.

Tez kapsamında önerilen başlıca stratejiler ise şöyle sıralanabilir:

- Yapı tasarımında yeniden kullanım odaklı düşünme, mimarlık eğitimine ve meslek pratiğine entegre edilmelidir.
- Malzeme pasaportu ve dijital kimlik sistemlerinin oluşturulması, yeniden kullanılabilir çelik elemanların izlenebilirliğini ve güvenliğini artıracaktır.
- Yönetmeliklerde yeniden kullanım için açık kriterler ve test protokolleri tanımlanmalı; sertifikalandırma süreçleri yerel koşullara uyarlanmalıdır.
- İkinci el çelik pazarı desteklenmeli, söküm planlaması tasarım sürecine entegre edilerek yapıların demontaj sonrası kullanılabilirliği artırılmalıdır.
- Mimarların süreçteki rolü, yalnızca estetik değil aynı zamanda çevresel sorumluluklar açısından da yeniden tanımlanmalı; tasarımcıların bu konuda donanımlı olması sağlanmalıdır.
- Yapay zekâ ve dijital veri sistemleri kullanılarak malzeme eşleştirme, test ve uygunluk değerlendirmeleri daha hızlı ve verimli biçimde gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak, çelik yapıların sürdürülebilir yapı üretimi için önemli bir potansiyel sunduğu, ancak bu potansiyelin etkili şekilde değerlendirilebilmesi için mimarlık, mühendislik ve politika düzeyinde bütüncül bir dönüşüme ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Asımgil, B. (2016). Kaynakların Korunumunda Sürdürülebilir Teknolojik Yaklaşımlar ve Mimari Forma Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3, 28-39.

2. Önder, H., (2018). Sürdürülebilir Kalkınma Anlayışında Yeni Bir Kavram: Döngüsel Ekonomi. *Dumlupinar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 57, 196-204.

3. İpekçi, C., Coşkun, N. ve Karadayı, T. (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanilmiş Malzeme Kullaniminin Sürdürülebilirlik Açisindan Önemi. *Türk Bilim Araştırma Vakfı Dergisi*, 2, 43-50.

4. İnternet: Deprem Araştırmaları da "Çelik Yapılar'ı İşaret Ediyor.(2023). *Çelik Yapılar Dergisi*, TUCSA. URL: https://www.tucsa.org/tr/haber_detay.aspx?haber=2347 Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

5. Kanyılmaz, A., Birhane, M., Fishwick, R. ve Castillo, C. (2023). Reuse of Steel in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *International Journal of Steel Structures*, 23, 1399-1416.

6. Aykanat, A. (2023). Sistem İlişkileri Açısından Sürdürülebilir Sağlıklı Yapı Üretimi Kuramsal Modeli. *Journal of Architecture*, 2, 62-81.

7. Çağnan, Ç. ve Özer, H. (2014). Yapı Üretiminde Sistem Yaklaşımı ile Yapı Ürünü Performanslarının Çevre-Ekoloji ve Yasal Zorunluklar Bağlamında Test Edilmesine Yönelik Bir Model Önerisi. *Megaron Dergisi*, 4, 255-270.

8. Köylüoğlu, Ö. (2021). Sürdürülebilirlik Kriterlerinin İnşaat Sektöründe Etkilediği Alanlar. *Çelik Yapılar Dergisi*, 71, 20-24.

9. Karakaş Ulusoy, C. (2019). Çevresel Etki Değerlendirme Sürecinde Çevre – Ekonomi İkilemi. *Kent ve Çevre Araştırmaları Dergisi*, 58-82.

10. İnternet: *ÇED(Çevresel Etki Değerlendirmesi)*. Çevreonline URL: , https://cevreonline.com/ced/ Son Erişim tarihi: 04.07.2025.

11. Karahan, G. (2010). *Yapı Ömrü Kavramına Bütüncül Bir Bakış*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

12. İnternet: *Geri Dönüştürülmesi En Kolay Malzemeler Nelerdir?*.(2019). Eko Yapı Dergisi. URL: https://www.ekoyapidergisi.org/geri-donusturulmesi-en-kolay-olan-malzemeler-nelerdir Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

13. Salgın, B., Aydın İpekçi, C., Coşgun, N., Tıkansak Karadayı, T. (2021). Enerji ve Ham Madde Korunumu Açısından Yapısal Atıkların Yeniden Kullanımına/Geri Dönüşümüne Yönelik Bir Değerlendirme. *Mimarlık Bilimleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6, 526-537.

14. Buzkan, C. ve Erman, O. (2020). Yapısal Atıkların Geri Dönüşüm Sorunu ve Türkiye'deki Durumun Mevzuat Bakımından Değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6, 76-89.

15. İnternet: *Atık Yönetim Hiyerarşisi*. Artuklu Üniversitesi Sıfır Atık ve Çevre Yönetimi Koordinatörlüğü. URL: https://www.artuklu.edu.tr/sifir-atik-cevre-yonetimi/atik-yonetim-hiyerarsisi Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

16. Gergin R.E. (2023). Geri Dönüşüm İşletmelerinin İnşaat Ve Yıkım Atıkları Açısından Performanslarının Bütünleştirilmiş Swara-Edas Yöntemiyle Değerlendirilmesi: Türkiye Örneği. *Hitit Sosyal Bilimler Dergisi*, 1, 1-29.

17. İnternet: *Atık Yönetim Yönetmeliği,* Bilecik Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü. URL: https://webdosya.csb.gov.tr/db/bilecik/webmenu/webmenu14879.pdf Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

18. Kaplan, E. ve Soyluk, A. (2023). "Deprem Sonrası Atık Yönetimi: Atık Betonun Geri Dönüşümü ve Mimaride Kullanımı için Öneriler". *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 9, 140-162.

19. İnternet: URL: https://www.steelconstruction.info/images/c/c8/B_Fig10_2013.png Son Erişim Tarihi: 04.05.2025.

20. Salgın, B. ve Coşgun, N. (2018). Kentsel Dönüşüm Uygulamalarında Yapısal Atık Sorunu Ve Çözüme Yönelik Öneriler: Kayseri Örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7, 465-476.

21. İnternet: *Architecture of Chile*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Architecture_of_Chile Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

22. İnternet: URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22698511 Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

23. Kalkan, M., Kaçar A. ve Alptekin O. (2020). Ülkelerin Deprem Sonrası Yeniden Yapılaşma Süreçlerinin Karşılaştırılması: Çin, Şili ve Türkiye Örnekleri. *Tasarım Kuram Dergisi*, 31, 1-18.

24. Cartes, I. A. (1998). Traditional Architecture, Building Materials And Appropriate Modernity In Chilean Cities. *Renewable Energy Journal*, 15, 283-286.

25. Wood, S. L. (1987). *The 1985 Chile Earthquake Observations on Earthquake-Resistant Construction in Vina Del Mar*. Civil Engineering Studies Rapor.

26. İnternet: URL: https://www.istockphoto.com/tr/foto%C4%9Fraf/downtown-putre-in-chile-gm172881326-6194200 Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

27. İnternet: URL: https://www.cartorange.com/viaggio/todo-cile Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

28. Of, N. ve Öztürk, S. (2022). Depremlerden Sonraki Yeniden Yapılanma Süreci Üzerine Küresel Bir Araştırma: Çelik Prefabrik Malzeme Kullanımının Gerekliliği. *Afet ve Risk Dergisi*, 1, 346-360.

29. Özcebe, G. ve Sucuoğlu, H. *Hyogo-Ken Nanbu Depremi (17 Ocak 1995) Mühendislik Raporu*. ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü.

30. İnternet: Akın, E., Peker, C. ve Semercioğlu, N. (2024). *Depreme Karşı Önlem ve Düzenlemelerde Örnek Ülke Uygulamaları*. Rekabet ve Regülasyon URL: https://www.rekabetregulasyon.com/depreme-karsi-onlem-ve-duzenlemelerde-ornek-ulke-uygulamalari/ Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

31. İnternet: URL: https://www.internetgeography.net/topics/laquila-earthquake-2009/#google_vignette Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

32. Kaplan, H., Bilgin, H., Yılmaz, S., Binici, H. Ve Öztaş, A. (2010). Structural Damages of L'Aquila (Italy) Earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 499-507.

33. Faleschini, F., Zanini, M., Hofer, L., Pellegrino, C. (2017). *Demolition Waste Management After Recent Italian Earthquakes*. 16th International Waste Management and Landfill Symposium, Italy.

34. İnternet: *Reconstruction İn Italy After Earthquakes: Build İt With Steel.(2017)*. URL-https://industry.arcelormittal.com/news/newsarchive/3945/06-2017/reconstructionwithsteel Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

35. Aksel, H., Eren, Ö. (2014). *Çelik Yapi Bileşenlerinin Yaşam Döngüsü İçinde Yeniden Kullanim Ve Geri Dönüşüm Olanaklarinin Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.

36. İnternet: *Çelik Yapılar* URL: https://www.munzur.edu.tr/birimler/akademik/fakulteler/muhendislik/bolumler/insaat/Pages/file/Celik-Yapilar-Hafta-1.pdf Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

37. İnternet: *Çelik Sektörel Bakış*. (2024). KPMG. URL: https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/tr/pdf/2024/07/%C3%87elik%20Sekt%C3%B6rel%20Bak%C4%B1%C5%9F%202024_F.pdf Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

38. İnternet: *Reconstruction İn Italy After Earthquakes: Build İt With Steel*. URL: https://www.steelradar.com/en/turk-celik-devleri-2023te-dunya-siralamasinda-yukseldi/ Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

39. İnternet: *Türkiye'nin En Değerli İhraç Ürünleri: En Çok İhracatı Yapılan Ürünler*. (2023), Baz Girişim. URL: https://www.linkedin.com/pulse/t%C3%BCrkiyenin-en-de%C4%9Ferli-ihra%C3%A7-%C3%BCr%C3%BCnleri-%C3%A7ok-ihracat%C4%B1-yap%C4%B1lan-%C3%BCr%C3%BCnler/ Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

40. İnternet: *Türkiye İhracatı Sektörler 2023*. Çelik İhracatçılar Birliği. URL: https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html Son Erişim Tarihi: 13.05.2025.

41. İnternet: *Mimari Uygulamarda Kullanılan Metaller.* URL: https://www.uslularhadde.com/mimari-uygulamalarda-kullanilan-metaller Son Erişim tarihi: 13.05.2025.

42. İnternet:URL: https://celikhaber.com/2020/09/celik-profil-tablosu/#google_vignette Son Erişim tarihi: 13.05.2025.

43. TUCSA(2021). Yapisal Çelik Sektörünün 2000-2020 Değerlendirmesi. *Çelik Yapılar Dergisi*, 71, 41-49.

44. Altay, G. ve Güneyisi, E., *Türkiye'de Yapisal Çelik Sektörü Ve Yeni Gelişimler*, Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

45. TUCSA(2024) İnşaatta Çeliğin Uzun Ömürlülüğü ve Dayanıklılığı. *Çelik Yapılar Dergisi*, 89, 48-51.

46. TUCSA(2023). Çelik Yeniden Kullanım ve Döngüsel Ekonomi. *Çelik Yapılar Dergisi*, 83, 60-62.

47. İpekçi, Aydın, C. ve Karakoç, A.F. (2021). Sürdürülebilir Mimarlık Bağlamında Metal Malzemenin Yeniden Kullanımı ve Geri Dönüşümünde Mimarın/ Tasarımcının Rolü. *Kocaeli Üniversitesi Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 6, 695-715.

48. Güreş, H.Y. (2011), *TS EN 1090-2 paralelinde Çelik Yapı Uygulaması (İmalat ve Montaj)*. Sakarya Üniversitesi, Çelik Yapılar 2011 Çalıştayı.

49. Puma, G.C.,Salles, A., Turk, J.,Ungureanu, V. ve Bragança, L. (2024). "Utilisation of Reused Steel and Slag: Analysing the Circular Economy Benefits through Three Case Studies", *Buildings Journal*, 14.

50. Vares, S., Hradil, P., Sansom, M. ve Ungureanu, V. (2020). Economic potential and environmental impacts of reused steel structures. *Structure and Infrastructure Engineering Journal*, 16, 750-761.

51. İnternet: *Taşıyıcı Yapılarda Çelik Geri Kullanım. (2021).* MVR URL: https://prodevelopment.se/wp-content/uploads/2021/05/AterbrukStal_MVRBS04_2021.pdf Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

52. İnternet: *European Recommendations For Reuse Of Steel Products In Single-Storey Buildings*. (2020). PROGRESS URL: https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/PROGRESS_Design_guide_final-version.pdf Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

53. İnternet: URL: https://hardhatengineer.com/what-is-the-difference-between-2-2-and-3-1-material-certificates/ Son Erişim tarihi: 14.05.2025.

54. Andisheh, K. (2024). Development of steel circularity passport: Literature review, research gaps, and program rules in New Zealand. *Waste Management Bulletin Journal*, 2, 11-27.

55. İnternet: *Ergitme Kaynağının Tahribatlı/Tahribatsız Testleri Muayene Standartları Tablosu*. Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi URL: https://www.kemm.org.tr/images/dokumanlar/1661895695_ergitmeconvert-son.pdf Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

56. İnternet: *Tahribatsız Muayene Yöntemleri*. URL: https://dokumhane.net/wp-content/uploads/2019/04/Tahribats%C4%B1z-Muayene-Yo%CC%88ntemleri.pdf Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

57. İnternet:URL:https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING_Rev02.pdf Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

58. İnternet: URL: https://www.ndtteknik.com/ndt-kutuphane/sivi-penetrant-testi-nasil-yapilir-63.html Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

59. İnternet: URL: https://www.sezerndt.com/manyetik-parcacik-muayenesi-mt/ Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

60. İnternet: URL: https://www.ndtteknik.com/ndt-kutuphane/ultrasonik-muayene-nedir-60.html Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

61. İnternet: URL: https://www.ndtteknik.com/ndt-kutuphane/radyografik-muayene-nedir-59.html Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

62. Kara, O., Erdal, H., Çelik, H. (2017). Bazı Tahribatsız Test Yöntemleri: Karşılaştırmalı Bir Derleme Çalışması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 3, 82-93.

63. İnternet: *Kemm Tarafindan Uygulanan Tahribatsiz Muayene Yöntemleri*, Kaynak Eğitim ve Muayene Merkezi. URL: https://www.kemm.org.tr/teknik-hizmetlerimiz-tahribatsiz-muayene-hizmetlerimiz.html Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

64. İnternet: Alsaran, A., *Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene*, URL: https://www.academia.edu/9601893/Tahribatl%C4%B1_ve_tahribats%C4%B1z_muayene Son Erişim Tarihi: 14.05.202.

65. İnternet:URL:https://www.uslularhadde.com/celik-cekme-testi-nedir#:~:text=%C3%87elik%20%C3%A7ekme%20testi%2C%20bir%20%C3%A7elik,uygulan%C4%B1r%20ve%20malzemenin%20tepkisi%20%C3%B6l%C3%A7%C3%BCl%C3%BCr. Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

66. İnternet: URL: https://labomak.com.tr/index.php/uygulamalara-gore-test-cihazlari/egilme-bukulme-sehim-testi-ve-test-aparatlari/ Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

67. İnternet: URL: https://www.kemm.org.tr/teknik-hizmetlerimiz-tahribatli-muayene-laboratuvar-hizmetlerimiz.html Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

68. Kaftan, M.A. (2006). *Çelik Yapilarda Korozyon Oluşumu Ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açisindan Karşilaştirilmasi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

69. İnternet: URL: https://www.uslularhadde.com/celik-korozyon-testi-nedir#:~:text=Tuz%20Sprey%20Testi%3A%20En%20yayg%C4%B1n,veya%20tuzlu%20su%20%C3%A7%C3%B6zeltilerine%20dald%C4%B1r%C4%B1l%C4%B1r. Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

70. İnternet: *Holbein Gardens Project*, Disrupt Delivering Innovative Steel Reuse Project. URL: https://asbp.org.uk/case-studies/holbein-gardens-disrupt Son Erişim tarihi: 14.05.2025.

71. İnternet: *Holbein Gardens*, Barr Gazetas. URL: https://barrgazetas.com/projects/holbein-gardens Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

72. İnternet: *Design to aid Brent Cross Town's net zero future*, ARUP. URL: https://www.arup.com/projects/brent-cross-town-substation/ Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

73. İnternet: *Brent Cross Town Project*, Disrupt Delivering Innovative Steel Reuse Project. URL: https://asbp.org.uk/case-studies/brent-cross-town-primary-substation Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

74. İnternet: URL: https://archinect.com/aruparchitects/project/the-circular-building Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

75. İnternet: URL: https://archinect.com/aruparchitects/project/the-circular-building Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

76. İnternet: URL:https://www.archdaily.com/868121/arup-designs-prototype-building-based-on-circular-economy-principles Son Erişim Tarihi: 14.05.2025.

77. İnternet:URL:https://www.arkitera.com/proje/2-odul-izmir-surdurulebilirlik-merkezi-s-hub-mimari-proje-yarismasi/ Son Erişim Tarihi: 04.07.2025.

78. İnternet: Çalkıvık, K. *Türkiye'nin Döngüsel Ekonomiye Geçiş Potansiyelinin Değerlendirilmesi için Teknik Destek Projesi*. URL: https://webdosya.csb.gov.tr/db/dongusel/icerikler/turk-yede-surduruleb-l-r-is-modeller--20241013180146.pdf Son Erişim Tarihi: 04.07.2025.



Gazili olmak ayrıcalıktır