

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

Semih Konceli²

Gökhan Güçlü³

Uğur Kafkas⁴

Özet

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

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

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

1. Giriş

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

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

2. Yapı Malzemelerine Göre Yapı Sistemleri

2.1. Ahşap Yapı Sistemleri

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dezavantajları [3, 8]:

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

2.2. Yığma Yapı Sistemleri

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

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

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

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

Bu yapı sınıfının avantajları arasında [10]:

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

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

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

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

2.3. Betonarme Yapı Sistemleri

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

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

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

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

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

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

Avantajları [18]:

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

Dezavantajları [19]:

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

2.4. Prefabrik Yapı Sistemleri

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

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

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

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

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

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

Avantajları [23]:

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

Dezavantajları [24]:

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

2.5. Yapı Çeliği Yapı Sistemleri

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

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

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

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

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

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

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

Avantajları [32]:

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

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

Dezavantajları [33, 34]:

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

2.6. Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Yapı Sistemleri

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

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

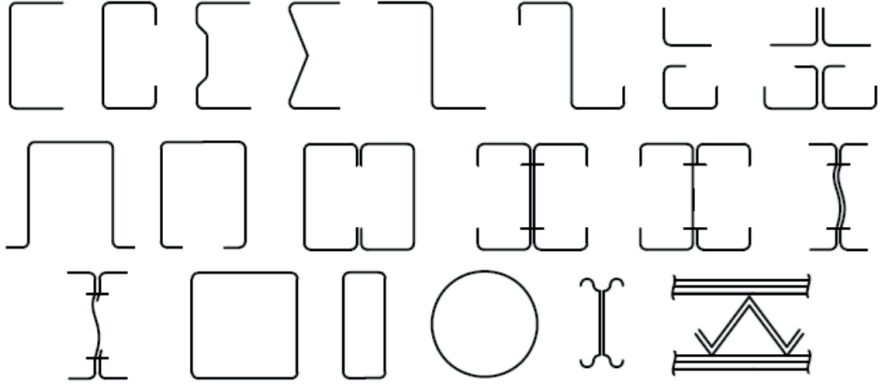
II. Dünya Savaşı sonrası ABD'de prefabrik soğukta şekil verilmiş çelik konutların inşası, maliyetlerin düşürülmesi ve hızlı bir şekilde konut ihtiyacını karşılaması açısından büyük önem arz etmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik sistemlerin montaj kolaylığı, bu tür projelerde büyük avantaj sağlamıştır.

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

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

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

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



Şekil 1: Soğukta şekil verilmiş çelik enkesitleri [35]

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



Şekil 2: Rulo form yöntemi ile soğuk şekil verme işlemi

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

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

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

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

Dezavantajları [46-49]:

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

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

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

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

3. Soğukta Şekil Verilmiş Çeliğin Kullanım Alanları

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

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

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

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

4. Soğukta Şekil Verilmiş Çelikte Birleşim Elemanları

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

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

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

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

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

Kaynaklar

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

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

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

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

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