



Tesisat boşluklu çelik kirişlerin çeşitli yöntemlerle güçlendirilmesinin yapısal performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

Evaluation of the effects of strengthening steel beams with service hole by various methods on structural performance

Emin Battal¹, Mehmet Fethi Ertenli^{2*}, Şenol Gürsoy³

¹ Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 78050, Karabük Türkiye

^{2,3} Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük Türkiye

Öz

Çelik yapılarda, kiriş gövdelerine büyük boşluklar açılması, özellikle tesisat geçişleri nedeniyle gerekli olabilmektedir. Ancak, bu tür boşluklar kirişlerin kesme ve moment taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltarak yapısal performansı olumsuz etkileyebilir. Literatürde gövde boşluklarının etkileri geniş çapta incelenmiş olsa da bu etkileri azaltmaya yönelik sistematik ve kapsamlı yaklaşımlar sınırlıdır.

Bu çalışmada, gövdesinde 400x700 mm boyutunda tesisat boşluğu açılmış IPE600 enkesitli 8 m uzunluğunda bir çelik kirişin yapısal performans kayıplarını en aza indirmek için farklı güçlendirme stratejilerinin etkinliği araştırılmıştır. Eurocode 3'e uygun şekilde modellenen basit mesnetli kiriş üzerinde lineer burkulma ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, göçme yükleri, moment kapasiteleri ve şekil değiştirme parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Bu analizler ışığında, referans modelin taşıma kapasitesine en yakın sonuçları sağlayan güçlendirme düzenlemesi belirlenmiştir. Çalışmanın bulguları, gövde boşluklu çelik kirişlerin güçlendirilmesi yoluyla yapısal performansın artırılabilirliğini ve bu tür optimum tasarım yaklaşımlarının çelik yapıların tasarım süreçlerinde daha yaygın bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Çelik kirişler, Tesisat boşluğu, Yapısal takviye, Yapısal stabilite, Doğrusal olmayan analiz

1 Giriş

Çelik yapıların tasarım ve kullanım süreçlerinde, özellikle mimari ve mekanik gereksinimlerden kaynaklanan yapısal düzenlemeler, kiriş gövdelerinde büyük boşlukların açılmasını gerekli kılabilir. Uygulamada, mimari kaygılar ile mekanik tesisat kanalları ve benzeri elemanların kirişlerin altından geçirilmesi durumunun net kat yüksekliğini azaltması nedeniyle kiriş gövdesinde boşluk açılması talebi oluşmaktadır. Kirişte açılan gövde boşlukları, net kat yüksekliğini korumak amacıyla, pratik bir çözüm olarak değerlendirilse de bu uygulama kirişlerin yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli azalmalara yol açmaktadır. Özellikle mevcut yapılarda sonradan yapılan kullanım amacı değişiklikleri gibi öngörülme durumları,

Abstract

In steel structures, it may be necessary to provide large openings in the beam webs, especially for plumbing transitions. However, such voids can significantly reduce the shear and moment carrying capacity of the beams and adversely affect the structural performance. Although the effects of web openings have been extensively studied in the literature, systematic and comprehensive approaches to mitigate these effects are limited.

In this study, the effectiveness of different strengthening strategies to minimize the structural performance losses of an 8 m long steel beam with IPE600 cross-section and 400x700 mm plumbing openings in its web is investigated. Linear buckling and nonlinear analyses were performed on the simply supported beam modeled in accordance with Eurocode 3. The results were evaluated in terms of failure loads, moment capacities and deformation parameters. Based on these analyses, the strengthening arrangement that provides the closest results to the bearing capacity of the reference model was determined. The findings of the study indicate that structural performance can be improved by strengthening steel beams with web openings and that such optimal design approaches can be more widely used in the design process of steel structures.

Keywords: Steel beams, Plumbing opening, Structural strengthening, Structural stability, Nonlinear analysis

tasarım aşamasında dikkate alınmayan yapısal kusurların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Maali ve Çınar [1] yaptıkları çalışmada gövde boşluklarının bulunduğu bölgelerde kesitin iç kuvvetlerine yalnızca boşluğun üst ve altındaki "T" enkesitleri karşı koyduğunu belirtmiştir. Bu bölgede kesme kuvvetlerinin etkisiyle "T" kesitlerin köşelerinde ek momentler oluşmakta ve bu momentler, mevcut momente eklenerek boşluk köşelerinde plastik mafsalların oluşumuna yol açtığını ifade etmiştir. Rodrigues vd. [2] özellikle kompakt kesitli, dikdörtgen gövde boşluklu kirişlerde, boşluk yüksekliği kiriş yüksekliğinin %50'sini aştığında, göçme mekanizması genellikle boşluk çevresinde oluşan plastik mafsallardan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: m.fethiartenli@karabuk.edu.tr (M. F. Ertenli)

Geliş / Received: 22.02.2025 Kabul / Accepted: 12.05.2025 Yayımlanma / Published: 15.07.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1645103

kaynaklanan Vierendeel mekanizması ile meydana geldiğini ifade etmiştir.

Literatürde, çelik kirişlerin gövdelerinde açılan farklı şekil ve boyutlardaki boşlukların yapısal performansa etkilerini inceleyen çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, bu çalışmaların büyük çoğunluğu, boşlukların olumsuz etkilerini tespit etmekle sınırlı kalmış ve bu etkileri azaltmaya yönelik kapsamlı bir yaklaşım geliştirilmemiştir. Mevcut çalışmalarda, gövde boşluklarının olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla yalnızca sınırlı sayıda düzenleme (örneğin, çevresel rijitlik levhalarının eklenmesi) incelenmiştir. Bu nedenle, çelik kirişlerde açılan gövde boşluklarının neden olduğu performans kayıplarını azaltmaya yönelik daha etkili ve çeşitli güçlendirme düzenlemelerinin araştırılması büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, çelik kirişlerde gövde boşluklarının yapısal performansa etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu etkileri en aza indirmeye yönelik farklı güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, IPE600 kesitli, 8 m uzunluğunda, basit mesnetli ve düzgün yayılı yük etkisindeki bir çelik kiriş referans model olarak ele alınmıştır. Referans kirişe dikdörtgen bir gövde boşluğu eklenerek bu boşluğun yapısal performansa olumsuz etkileri analiz edilmiştir. Daha sonra, boşluk çevresine uygulanan farklı güçlendirme düzenlemeleri ile bu olumsuz etkilerin azaltılma düzeyleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Literatürde deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir kısmı, gövde boşluklarının kirişlerin taşıma kapasitesi, rijitlik ve stabilite üzerindeki etkilerini belirlemeye odaklanmış, ancak bu etkileri minimize etmeye yönelik kapsamlı bir yaklaşım geliştirmemiştir. Gövde boşluklarının neden olduğu olumsuzlukların giderilmesi amacıyla yapılan çalışmaların kapsamı ise genellikle sınırlı kalmış ve çoğunlukla çevresel, yatay ve düşey rijitlik levhalarının eklenmesi gibi belirli takviye yöntemleriyle sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, literatürde doğrudan bu olumsuzlukları gidermeye yönelik daha sistematik ve geniş kapsamlı bir araştırmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, gövde boşluklu çelik kirişlerin yapısal performansını artırmaya yönelik güçlendirme tekniklerini ele alan önceki araştırmalar incelenmiş ve mevcut literatürdeki bulgular ışığında çalışma kapsamında izlenen metodoloji oluşturulmuştur. Bu bağlamda, literatürde yer alan belirli çalışmalar değerlendirilmiş ve ilgili bulgular, bu araştırmanın kapsamını genişletmek ve önerilen güçlendirme stratejilerinin etkinliğini tartışmak amacıyla kaynak olarak kullanılmıştır. Aşağıda, konu ile doğrudan ve dolaylı ilişkili bazı çalışmalar özetlenmektedir.

Rodrigues vd., [2] çalışmasında, gövde boşluklu çelik kirişlerin dış yükler altındaki yapısal davranışlarını incelemek amacıyla ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, farklı gövde boşluk geometrileri, boyutları ve konumlarının kiriş açıklıkları üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve toplamda iki farklı kiriş yüksekliği için 52 model oluşturulmuştur. Her model için göçme yükü, yer değiştirme, moment kapasitesi ve göçme modu açısından kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında,

eğilme momenti-yer değiştirme ilişkisi üç farklı boşluk geometrisi için incelenmiş; dairesel ve kare boşlukların eğilme momenti taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı, dikdörtgen boşlukların ise taşıma kapasitesinde yaklaşık %30 oranında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, boşluk yüksekliğinin kiriş yüksekliğinin yarısından fazla olması durumunda da göçme mekanizmasının Vierendeel göçme mekanizmasına dönüştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte, araştırmacılar boşluk çevresine yatay rijitlik levhaları ekleyerek bunun yapısal performans üzerindeki etkisini incelemiş ve güçlendirilmiş kirişlerin taşıma kapasitesinin önemli ölçüde arttığını belirtmiştir. Sonuç olarak rijitlik levhaları ile güçlendirilmiş kirişlerde göçme yükünün, güçlendirme yapılmayan kirişlere kıyasla 2~3 kat artırılabilceği belirlenmiştir.

Mata vd., [3] çalışmasında, çelik kirişlerin gövdelerinde açılan boşlukların yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, boşlukların şekli, boyutu, konumu ve aralarındaki mesafe parametreleri dikkate alınarak ANSYS yazılımı kullanımıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, boşlukların yaklaşık olarak açıklığın %15'i konumunda (yaklaşık 0.15L) yerleştirilmesi durumunda kirişte daha yüksek Von Mises gerilme yığılmaları ve diğer konumlara kıyasla daha fazla sehimi oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca, dairesel boşlukların gerilme dağılımını daha homojen sağladığı, kare boşlukların görece olarak daha az olumsuz etki oluşturduğu, ancak büyük boyutlu dikdörtgen boşlukların kirişin yük taşıma kapasitesini belirgin biçimde azalttığı ifade edilmiştir. Yazarlar, gövde boşluklarının mesnet bölgelerine yakın konumlandırılması halinde hem gerilme hem de deformasyonların daha yüksek değerlere ulaştığını vurgulamış; özellikle dikdörtgen boşlukların, diğer geometrik türlere kıyasla gerilme yığılması ve sehimi artışı daha fazla tetikleyerek yapısal performansı olumsuz etkilediği sonucuna ulaşmışlardır.

Abdel-Ghaffar vd. [4] çalışmasında, dairesel gövde boşluklarının çevresine uygulanan beş farklı güçlendirme düzenlemesinin göçme yüküne etkisini araştırmıştır. Çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, geometrik ve malzeme bakımından doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları önceki deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Araştırmacılar, beş farklı güçlendirme stratejisini iki farklı yükleme senaryosu altında karşılaştırmıştır. Elde edilen bulgular hem yatay hem de düşey rijitlik levhaları ile güçlendirilmiş kirişlerin göçme yükünü %15 oranında artırdığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca, kiriş uzunluğu boyunca boşluğun konumunun taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Noktasal yük etkisindeki kirişlerle karşılaştırıldığında, düzgün yayılı yük etkisindeki kirişlerin daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, düzgün yayılı yükleme altındaki kirişlerde kesme kuvvetinin doğrusal değişim göstermesi nedeniyle Vierendeel göçme mekanizmasının engellendiği şeklinde açıklanmıştır.

Doğan [5] tarafından yapılan tez çalışmasında, petek kirişlerin optimum boyutlandırılması, yük altındaki taşıma kapasiteleri ve farklı güçlendirme yöntemlerinin yapısal

performansa etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, ABAQUS yazılımı kullanılarak harmoni arama ve parçacık sürü algoritmaları yardımıyla optimizasyon yapılmış, ardından deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, farklı güçlendirme stratejileri (yatay, düşey ve dairesel rijitlik levhaları) kullanılarak, kirişlerin nihai yük taşıma kapasitesi değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre: Deneyde kullanılan IPN200 kesitli kirişler için; yatay rijitlik levhaları ile %7.49, dairesel rijitlik levhaları ile %17.17, düşey rijitlik levhaları ile %19.63 oranında kapasite artışı sağlandığı görülmüştür. Başka bir kesit türü (IPN240) için de deneysel çalışmalar yapan araştırmacı bu kesit için; yatay rijitlik levhaları ile %14.12, dairesel rijitlik levhaları ile %18.78, düşey rijitlik levhaları ile %22.35 oranında kapasite artışı sağlandığını göstermiştir. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; boşluklar arasına düşey rijitlik levhaları yerleştirilmesinin, diğer takviye yöntemlerine kıyasla en yüksek taşıma kapasitesi artışını sağladığı ortaya konulmuştur. Bu bağlamda boşluk çevresi takviye edilmiş kirişlerin pratik uygulamalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Al-Rifaie vd. [6] çalışmasında, dikdörtgen gövde boşluklu çelik I-kirişlerinin eğilme etkisindeki yapısal davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında, gövde boşluklarının toplam alanı, yükseklikleri, sayısı ve farklı yükleme hızları (2.214, 5 ve 7 m/s) dikkate alınarak ABAQUS yazılımı ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, yükleme hızının 2.214 m/s'den 7 m/s'ye çıkarılmasıyla, göçme yükünün %152, yer değiştirmenin %357 ve moment taşıma kapasitesinin %38 oranında arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, kiriş gövdelerinde düzenli aralıklarla açılan küçük boşlukların sayısının artırılmasının, nihai göçme yükü üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir. Ancak, boşluk sayısını azaltıp boyutlarını büyütmenin, toplam boşluk oranı sabit tutulsa dahi, kirişin eğilme momenti taşıma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını tespit etmiştir. Bununla birlikte, özellikle geniş gövde boşluklarına sahip kirişlerde, yatay çelik takviye levhaları ile güçlendirme yapılmasının yapısal performans önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Yatay takviye levhalarıyla güçlendirilmiş kirişlerin, takviye levhası bulunmayan kirişlere kıyasla %20 daha yüksek eğilme momenti taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, boşluklu çelik kirişlerin taşıma kapasitesinin artırılmasında takviye levhalarının etkin bir mühendislik çözümü sunduğunu göstermektedir (Al-Rifaie vd., 2021).

Ertenli ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada, düzenli dairesel boşluklara sahip çelik kirişlerde yanal burulmalı burkulma (YBB) davranışı incelenmiştir. Çalışmada geleneksel YBB denklemlerinin, gövde açıklıklarından kaynaklanan lokal buruşmaları göz ardı ettiği ve bu nedenle burkulma momentlerini olduğundan daha düşük tahmin ettiği belirtilmiştir. Bu bağlamda gövde açıklıklarının burulma ve burkulma rijitliklerine etkileri analitik olarak modellenmiş ve geliştirilen yöntemlerin doğruluğunu test etmek amacıyla 114 farklı sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, AISC 360-16

ve AS4100:2020 kodlarının elastik sınırlar içinde söz konusu kirişler için burkulma yüklerini olduğundan yüksek tahmin ettiğini, buna karşın Eurocode 3'ün daha güvenli tahminler sunduğunu göstermiştir. Yapılan çalışma, dairesel kirişlerin YBB davranışını daha doğru tahmin edebilmek için mevcut tasarım formüllerinin revize edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Abbas [8] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çelik I kesitli kirişlerin gövdelerine düzenli aralıklarla açılan boşlukların taşıma kapasitesine etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Bu kapsamda, araştırmacı kiriş kesitini sabit tutarak, farklı boşluk geometrilerine (dairesel, dikdörtgen ve altıgen) ve iki farklı boşluk oranına sahip toplam altı farklı kiriş modeli oluşturmuştur. Çalışmada, oluşturulan kiriş modelleri deneysel olarak test edilmiş ve elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla ABAQUS programı kullanılarak üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, gövde boşluğu oranının 1.71'den 2.5'e artırılması, nihai göçme yükünde %3.72 oranında bir azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, dairesel boşluklu kirişlerin altıgen boşluklu kirişlere, altıgen boşluklu kirişlerin ise dikdörtgen boşluklu kirişlere kıyasla daha iyi bir yapısal performans sergilediği belirlenmiştir. Aynı boşluk oranına sahip kirişler arasında yapılan karşılaştırmada, dairesel boşluklu kirişlerin, dikdörtgen boşluklu kirişlere göre %12.39 daha yüksek göçme yüküne sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada deneysel olarak test edilen ve ABAQUS modeli ile doğrulanan dairesel boşluklu kirişlerin, eşkenar dörtgen, sekizgen, yamuk, yatay ve dikey elips geometrili gövde boşluklarına sahip kirişlere kıyasla daha yüksek göçme yüküne sahip olduğu ve genel olarak daha iyi bir yapısal performans sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, boşluk geometrisinin çelik kirişlerin taşıma kapasitesini doğrudan etkilediğini ve dairesel boşluklu kirişlerin daha avantajlı bir yapısal davranış sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ertenli ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada kiriş gövde kesiti narinliğinin gövdede buruşmalara neden olduğunu ve bunun elemanın yanal buruşmalı burkulma modu ile göçmesine neden olduğunu belirtmiştir. Yaptıkları sonlu elemanlar analizlerinde, yönetmelik tahminlerinden daha yüksek burkulma sınır uzunluğu değerleri elde edilmiş ve bu durumun yönetmeliklerin gövde buruşmalarını dikkate almamasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışmanın bulgularına göre gövde narinliği arttıkça inelastik burkulma sınır uzunluğunun da yükseldiği sonucuna ulaşılmıştır.

Aydın ve arkadaşları [10], ince cidarlı sinüzoidal gövdeli çelik I-kesitli kirişlerin kolonlara bağlantılarındaki düzlem içi davranışını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada tam ölçekli dört adet kiriş-kolon bağlantısının, çevrimsel yükleme altında test edilerek panel bölgesinin davranışı analiz edilmiştir. Ardından ABAQUS sonlu elemanlar modeli ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçların deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu gösterilmiştir. Çalışma, düz panel bölgesi bağlantılarının, dalgalı panel bölgesi bağlantılara göre daha yüksek stabilite sağladığını ortaya koymuştur.

Chung ve arkadaşları [11], dairesel gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerde Vierendeel mekanizmasını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, düşük moment bölgesinde plastik mafsalların oluşmasının her zaman kesit taşıma kapasitesini sınırlandırmadığı ve kirişlerin dört plastik mafsala gelişene kadar ek yük taşıyabildiği belirtilmiştir. Sonlu eleman analizleri, mevcut tasarım yöntemlerinin eksikliklerini ortaya koymuş ve dairesel açıklıklara sahip çelik kirişler için ampirik bir moment-kesme etkileşim eğrisi önerilmiştir. Çalışma, plastik mafsala oluşumunun yük kapasitesine olan etkilerini vurgulamaktadır.

Chung ve arkadaşları [12] tarafından yapılan başka bir çalışmada, farklı şekil ve boyutlardaki büyük gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin taşıma kapasitesini incelemiştir. Çalışma, Vierendeel mekanizmasının kritik bir faktör olduğunu ve açıklık derinliğinin hem kesme hem de eğilme kapasitesini belirlediğini göstermektedir. Sonlu eleman analizleriyle elde edilen veriler kullanılarak, farklı açıklık türlerine sahip çelik kirişler için genelleştirilmiş bir moment-kesme etkileşim eğrisi geliştirilmiştir. Önerilen ampirik tasarım yöntemi, gövde boşluklu kirişlerin taşıma kapasitesini daha doğru tahmin etmek için küresel kesme kapasitesi konseptini içermektedir.

Tsavidaris ve D'Mello [13], farklı şekillerdeki gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin gövde burkulma davranışını deneysel ve sonlu eleman yöntemi ile analiz etmiştir. Çalışma, geleneksel dairesel ve altıgen açıklıklara ek olarak farklı açıklık şekillerinin de incelenmesini içermektedir. Bulgular, açıklık geometrisinin ve açıklıklar arasındaki mesafenin, gövde kesiti burkulmasını ve kesme dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, yeni tasarlanan açıklık şekillerinin geleneksel dairesel açıklıklara kıyasla daha iyi yapısal performans sunduğu belirlenmiştir.

Abidin ve Izzuddin [14], düzensiz gövde boşluklarına sahip çelik kirişlerin yerel burkulma analizini ele almıştır. Çalışmada, düzensiz açıklıkların kesit stabilitesi üzerindeki etkisini incelemek için Eleman Serbest Galerkin (Element Free Galerkin - EFG) yöntemi ve Döner Yay Analjisi (Rotational Spring Analogy - RSA) kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın geleneksel sonlu eleman analizlerine kıyasla daha hızlı ve hesaplama açısından verimli olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, düzensiz açıklıklara sahip kirişlerin burkulma dayanımını doğru bir şekilde değerlendirmek için mevcut tasarım yöntemlerinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

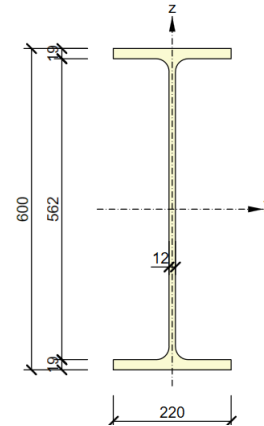
Maali ve Çınar [1] tarafından yapılan çalışma, çevrimsel yüke maruz kalan gövde açıklıklı kirişlerin yük taşıma ve yer değiştirme kapasitelerini artırmayı, rijitlik kayıplarını azaltmayı ve BS5950 standardına uygun yüksek mukavemetli kirişler tasarlamayı amaçlamaktadır. Deneysel ve sayısal analizler sonucunda, gövde yüksekliği ile açıklık çapı oranı 1.618 (Altın Oran) olan kirişlerin taşıma kapasitesi, enerji sönümleme kapasitesi ve moment dayanımı açısından daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Altın Oran ile optimize edilen kirişlerin, ideal modele en yakın mekanik davranışı sergilediği ve rijitlik kayıplarını minimize ettiği ortaya konmuştur.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, çelik kirişlerin gövdesinde tesisat geçirilmesi amacıyla açılan boşlukların yapısal performansa etkileri ve bu etkilerin farklı güçlendirme düzenlemeleriyle minimize edilme potansiyeli incelenmiştir. Çalışma, referans kiriş modellemesi, gövde boşluğu bulunan kiriş modellemesi ve güçlendirme düzenlemelerinin bulunduğu modellerin analiz edilmesi olmak üzere üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir.

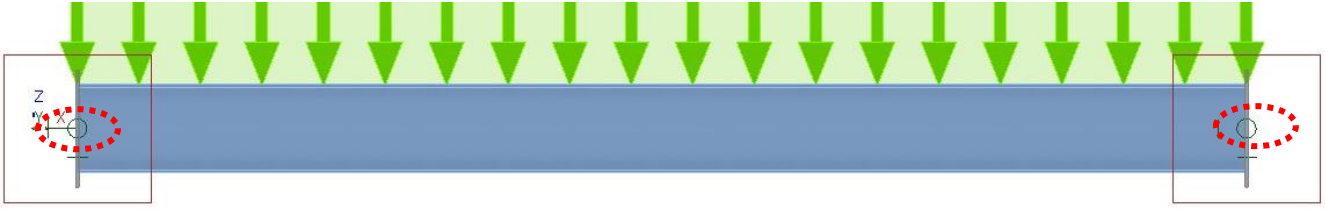
2.1 Malzeme ve geometri özellikleri

Analizlerde, IPE600 kesitli, 8 m uzunluğunda, sabit mesnetli ve düzgün yayılı yük etkisindeki bir çelik kiriş modeli kullanılmıştır (Şekil 1). Çelik malzemenin mekanik özellikleri; elastisite modülü (E) 200 GPa, Poisson oranı (ν) 0.3 ve akma dayanımı (F_y) 355 MPa olacak şekilde tanımlanmıştır. Referans model, gövde boşluğu içermeyen dolu gövdeli bir kiriş olarak tasarlanmış ve analiz edilmiştir (Şekil 2). Kiriş, her iki ucu sabit mesnetli olacak şekilde modellenmiştir. Bu kapsamda, mesnet bölgelerinde x, y ve z yönlerindeki yer değiştirmeler sınırlandırılmış; eğilme düzlemindeki dönme ise serbest bırakılmıştır. Ancak, sistemin genel stabilitesini sağlamak amacıyla yanal burkulma ve burulma eksenlerindeki dönme serbestlikleri mesnetlerde sınırlandırılmıştır. Diğer bir ifade ile kullanılan programın (IDEA StatiCa [15]) sağladığı olanaklar doğrultusunda, mesnetlerde yatay doğrultudaki hareketler kısıtlanmış, ancak güçlü eksen etrafındaki dönme hareketlerine izin verilmiştir. Bunun yanı sıra, kesme etkili birleşim olarak modellenen bu bağlantılar, kirişin göçme mekanizmasını etkilemeyecek şekilde düzenlenmiştir. Söz konusu düzenlemeler ile birleşimlerin kirişin genel stabilitesine olumsuz bir etkide bulunmaksızın, yapısal davranışın gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi sağlamıştır.



Şekil 1. Analizlerde dikkate alınan IPE600 profili (ölçüler mm olarak verilmiştir)

Kiriş üzerine uygulanan yükleme, düzgün yayılı yük olarak tanımlanmış ve analizler statik olarak artan yükleme esasına dayalı iteratif bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, her bir kiriş modeli için belirli bir servis yükü tanımlanmak yerine, kademeli yük artışı ile taşıma kapasitesinin ötesine geçilerek yapısal tepkilerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. Referans kiriş modeli



Şekil 3. Gövdesinde boşluk bulunan IPE600 kesitli kirişin yandan görünüşü (Model 1)

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, her modelin taşıyabildiği maksimum düzgün yayılı yük değerleri belirlenmiş ve bu değerler esas alınarak modeller arasında karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılmıştır.

2.2 Boşluğun geometrisi ve konumu

Kirişin gövdesinde oluşturulan boşluk, Vierendeel göçme mekanizmasını tetikleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Vierendeel göçme mekanizması, gövdesinde büyük açıklıklar bulunan kirişlerde, açıklık köşelerinde plastik mafsalların oluşması sonucu meydana gelen bir göçme türüdür. Kesme kuvvetlerinin etkisiyle boşluk çevresinde ilave momentler oluşmakta ve bu momentler, kirişin taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Bu çalışmada, gövdesinde boşluk açılmış çelik kirişlerde sıklıkla karşılaşılan Vierendeel (ikincil eğilme) göçme mekanizmasının yapısal davranış üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, boşluk geometrisi ve konumu dikkatli bir şekilde belirlenmiştir. Boşluk, kirişin net açıklığının %15–20'si ($0.15L-0.20L$) aralığında ve gövde yüksekliğinin yaklaşık %71'i oranında olacak şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3). Boşluk boyutları, uygulamada tesisat borularının geçişi için yaygın olarak tercih edilen geometrik oranlar dikkate alınarak 400×700 mm olarak belirlenmiştir. Bu tasarım yaklaşımı, yapısal sistemin Vierendeel mekanizması etkisiyle ortaya çıkabilecek ikincil eğilme momentlerini barındıran temsili bir durumu yansıtmakta ve uygulamada karşılaşılan yaygın mühendislik çözümleriyle uyumlu bir modelleme ortamı sağlamaktadır. Böylece, boşluk çevresinde gelişen ikincil moment etkilerinin kirişin taşıma kapasitesi, rijitliği ve stabilitesi üzerindeki olumsuz etkileri detaylı biçimde analiz edilerek, bu tür göçme mekanizmalarının yapısal performans üzerindeki etkileri ve tasarım açısından ortaya koyduğu sınırlamalar sistematik biçimde değerlendirilmiştir.

2.3 Boşluk çevresinin takviyesi ve alternatif güçlendirme yöntemleri

Çelik kirişlerin gövdesinde açılan boşluklar, elemanların yapısal performansını olumsuz etkileyerek kesme rijitliğinin azalmasına, yerel gerilme yoğunluklarının artmasına ve

nihayetinde taşıma kapasitesinde belirgin düşüşlere neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek ve kirişin bütüncül stabilitesini korumak amacıyla, boşluk çevresinde çeşitli güçlendirme stratejileri uygulanmaktadır. Literatürde, bu tür boşlukların neden olduğu kapasite kayıplarını telafi etmek amacıyla çevresel rijitlik levhaları, yatay ve düşey destek elemanları gibi farklı takviye yöntemleri önerilmektedir. Bu çalışmada, gövde boşluğu çevresinde uygulanan dokuz farklı güçlendirme tekniğinin etkinliği incelenmiş ve yapısal performansa olan katkıları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada güçlendirme elemanı olarak kullanılan plakaların boyutlarına ilişkin bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de yer alan uzunluk değerleri yatay ve/veya düşey doğrultuda uzanan elemanların boylarını ifade etmektedir. Uygulanan alternatif çözümler, boşluk çevresindeki gerilme dağılımını optimize ederek plastik mafsall oluşumunu geciktirmek ve göçme mekanizmasını kontrol altına almak amacıyla tasarlanmıştır. Böylece farklı güçlendirme yöntemlerinin etkinliği sayısal analizler ışığında detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Güçlendirme elemanları, ana kirişin malzemesiyle aynı malzemeden imal edildiği kabul edilmiş ve kaynakla kirişe entegre edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde, kiriş eleman ile güçlendirme elemanları arasındaki kaynaklı bağlantı "weld" komutu kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda kaynak bağlantısının yapıldığı noktada güçlendirme elemanı ile esas kiriş arası tam yapışık şekilde modellenmiştir. Kullanılan kaynak malzemesinin mekanik özellikleri, ana kirişin malzeme özellikleri ile uyumlu olacak şekilde yine S355 çeliği olarak tanımlanmıştır.

Kaynak dikiş kalınlığı ise ilgili ulusal çelik yapı tasarım yönetmeliğinde izin verilen maksimum değer esas alınarak belirlenmiştir. Bu tercih, birleşim bölgesindeki en zayıf halkayı ortadan kaldırmak ve yapısal göçmenin kaynak bölgesinden kaynaklanmamasını sağlamak amacıyla yapılmıştır.

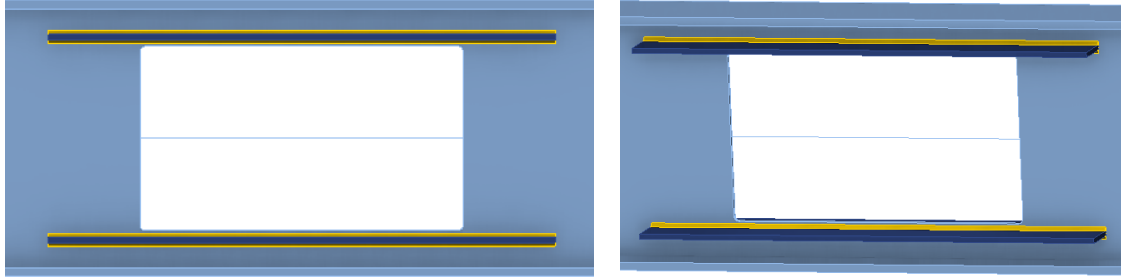
Çalışma kapsamında düzenlenen güçlendirmeler Şekil 4-12'de verilmektedir.

Tablo 1. Güçlendirmede kullanılan elemanların boyutları (mm)

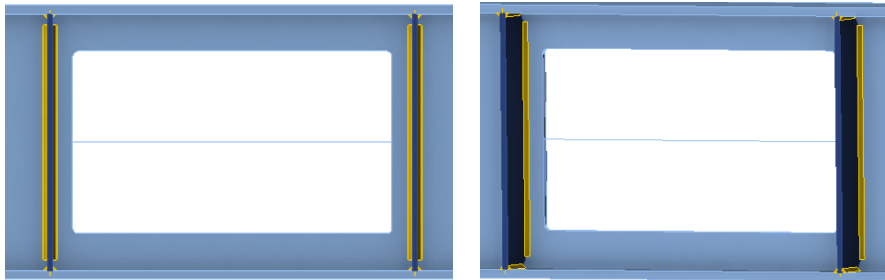
Model	Güçlendirme Düzeni	Kalınlık	Genişlik	Uzunluk	
				Yatayda	Düşeyde
Ref. Model	Gövde boşluksuz	-	-	-	-
Model 1	Gövde boşluklu - güçlendirmesiz	-	-	-	-
Model 2	Çevresel rijitlik levhalı	12	125	688	388
Model 3	Yatay rijitlik levhalı	12	104	1100	-
Model 4	Düşey rijitlik levhalı	12	104	-	562
Model 5	Hem yatay hem de düşey rijitlik levhalı	12	104	1100	562
Model 6	Yatay gövde çiftleme levhalı	12	60	1100	-
Model 7	Hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhalı	12	60	1100	390
Model 8	Yatay olarak "L" profillerle takviyeli	-	L100/63/8	1100	-
Model 9	Yatay olarak "U" profili zayıf	-	UE100	1100	-
Model 10	Yatayda çapraz formda yerleştirilen levhalı	12	110	1100	-



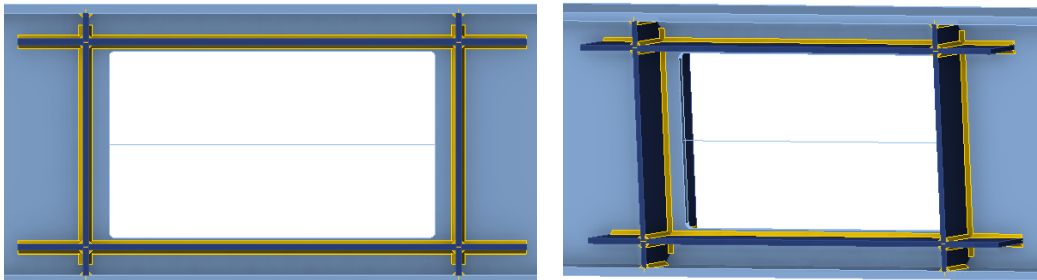
Şekil 4. Tesisat boşluğu çevresel rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 2)



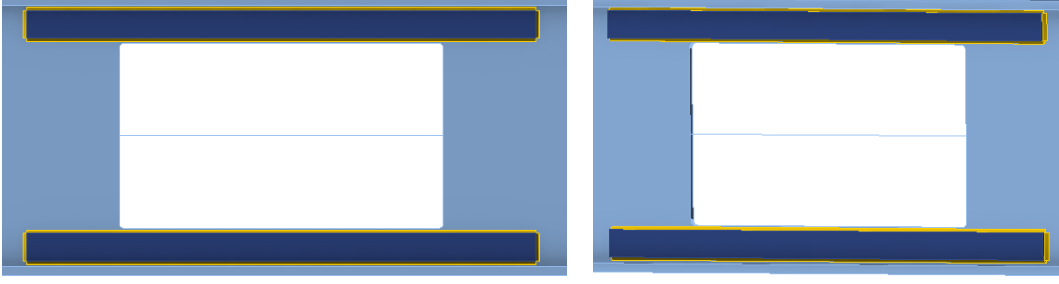
Şekil 5. Tesisat boşluğu yatay rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 3)



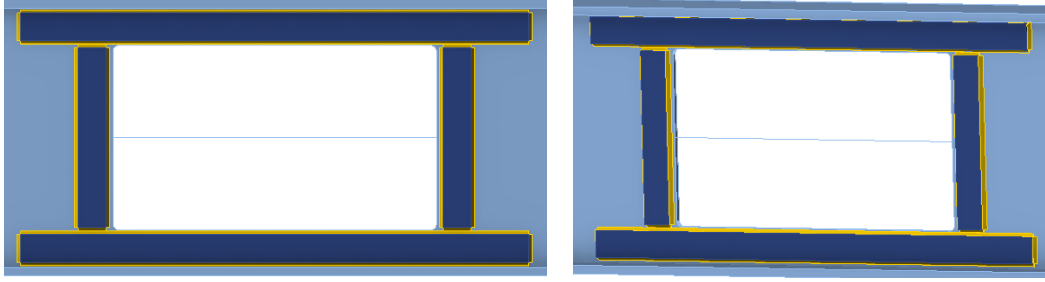
Şekil 6. Tesisat boşluğu düşey rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş kiriş (Model 4)



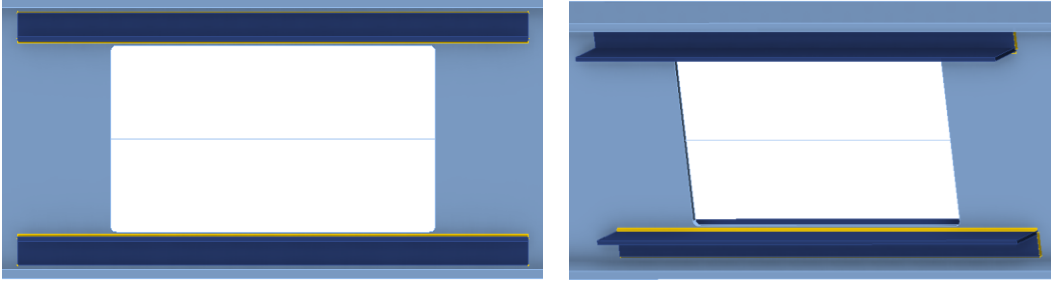
Şekil 7. Tesisat boşluğu yatay ve düşey rijitlik levhalarıyla takviye edilmiş kiriş (Model 5)



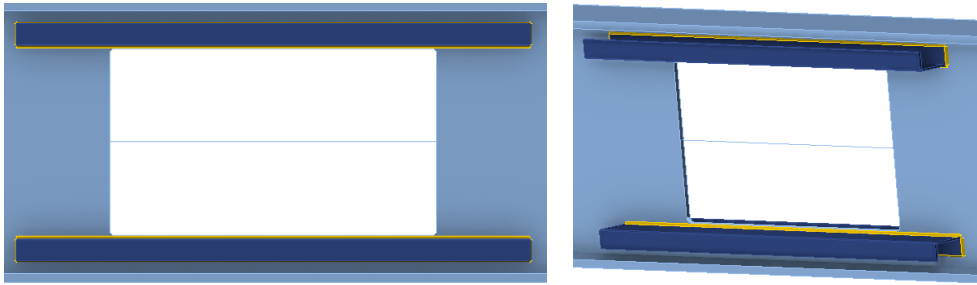
Şekil 8. Tesisat boşluğunun yatay gövde çiftleme levhalı şekilde takviye edilmiş kiriş (Model 6)



Şekil 9. Tesisat boşluğunun hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhalı şekilde takviye edilmiş kiriş (Model 7)



Şekil 10. Tesisat boşluğunun yatay olarak "L" profillerle takviye edilmiş kiriş (Model 8)



Şekil 11. Tesisat boşluğunun yatay olarak "U" profili zayıf ekseninde kaynaklanarak takviye edilen kiriş (Model 9)



Şekil 12. Tesisat boşluğunun yatayda çapraz formda yerleştirilen levhalarla takviye edilmiş kiriş (Model 10)

Bu çalışmada, farklı gövde boşluğu takviye biçimlerine sahip çelik kiriş modelleri oluşturularak, boşlukların ve uygulanan güçlendirme düzenlemelerinin yapısal performansa etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, analizlerde karşılaştırma amacıyla üç temel model kategorisi ele alınmıştır. Bunlar; referans kiriş, takviye uygulanmamış gövde boşluğu bulunan kiriş ve boşluk çevresine çeşitli güçlendirme stratejileri uygulanmış kirişler şeklindedir. Toplamda 11 farklı model oluşturularak, her bir modelin taşıma kapasitesi, göçme davranışı ve yapısal performans üzerindeki etkileri doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir.

2.4 Yapısal çözümlemeler

Çalışma kapsamında, çelik kirişlerde gövde boşluklarının yapısal performansa etkilerini incelemek ve bu etkileri en aza indirmeyi amaçlayan güçlendirme stratejilerini değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanan IDEA StatiCa [15] programı yardımıyla doğrusal ve doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Modelleme sürecinde, gövde boşluklarının neden olduğu yerel gerilme yoğunluklarını (yığılmaları), plastik mafsalları ve taşıma kapasitesindeki değişimleri doğru bir şekilde tespit etmek amacıyla doğrusal olmayan malzeme ve geometrik analizler yapılmıştır. Bunun yanı sıra, boşluğun bulunduğu bölgedeki stabilite kayıplarını belirlemek için lineer burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar göçme mekanizmalarının detaylı bir şekilde irdelenmesine katkı sağlamıştır.

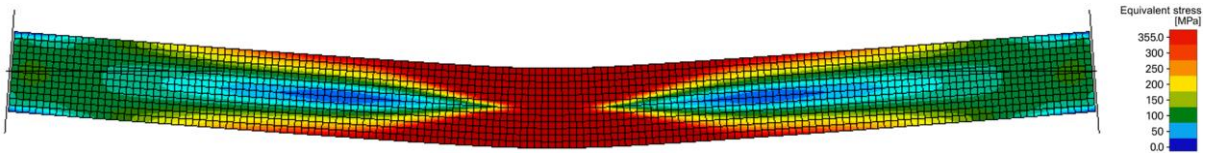
Kullanılan IDEA StatiCa [15] programı, Eurocode (EN) [16] standartlarına uygun analizler gerçekleştirebilme özelliğine sahip olup, modelde tanımlanan malzeme özellikleri ve sınır koşulları ile birlikte gövde boşluklarının etkilerini doğru bir şekilde temsil edebilmektedir. Çelik malzemenin daha önce belirtilen özellikleri ($E=200$ GPa, $\nu=0,3$, $F_y=355$ MPa) tanımlanmış; boşluk çevresindeki yapısal davranış hassas bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, boşluk çevresine eklenen güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği, taşıma kapasitesi, maksimum gerilme dağılımları ve plastik şekil değiştirme değerleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında her bir model için yapılan analizler; malzeme bakımından doğrusal olmayan analiz (MNA), lineer burkulma analizi (LBA), geometrik ve malzeme bakımından doğrusal olmayan, geometrik ve malzeme kusurlarını etkisini dikkate alan

analizler (GMNIA) şeklinde sıralanmaktadır. Tüm modeller için yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar referans model olarak dikkate alınan boşluksuz kirişin analiz sonuçları baz alınarak karşılaştırılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, çalışma kapsamında oluşturulan kiriş modelleri üzerinde gerçekleştirilen doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Önceki bölümde detaylandırılan farklı güçlendirme yöntemlerinin kirişin yapısal davranışı üzerindeki etkileri, doğrusal olmayan analizler ile değerlendirilmiştir. Gövde boşluklarının yapısal performans üzerindeki etkilerini ve farklı güçlendirme yöntemlerinin bu etkileri nasıl minimize ettiğini ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilen analizler doğrultusunda, elde edilen sonuçlar göçme yükü, göçme momenti, göçme mekanizması, maksimum yer değiştirme, gerilme dağılımları ve plastik mafsalları oluşum bölgeleri açısından detaylı bir şekilde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Öncelikle, referans model ile gövde boşluğu içeren ve herhangi bir güçlendirme uygulanmamış model karşılaştırılarak boşluk kaynaklı taşıma kapasitesi kayıpları belirlenmiştir. Ardından, boşluk çevresine farklı güçlendirme düzenlemeleri uygulanarak bu yöntemlerin kirişin yapısal performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Güçlendirme yöntemlerinin etkinliği, taşıma kapasitesindeki artış, göçme mekanizması ve gerilme dağılımı gibi parametreler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen malzeme ve geometrik doğrusal olmayan analizler (GMNIA) kapsamında, tüm kiriş modellerinin göçme anındaki kritik yükleri belirlenmiş ve bu durumdaki gerilme dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına ilişkin gerilme dağılımları, aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır. (Şekil 13-23).

Şekil 13'te gövdesinde boşluk bulunmayan dolu kesitli çelik kirişten oluşan referans modelin, gerilme dağılımı görülmektedir. Şekil 13 incelendiğinde, gerilme dağılımının kiriş boyunca nispeten homojen bir şekilde yayılmış olduğu, maksimum gerilmelerin kirişin açıklık ortasında olduğu görülmektedir. Plastikleşme, ağırlıklı olarak orta bölgede yoğunlaşmış ve bu bölgedeki plastik mafsalları oluşumu göçme mekanizmasını belirlemiştir. Bu dağılım, klasik eğilme teorisine uygun olarak moment etkisinin en fazla olduğu bölgede göçme oluştuğunu göstermektedir.

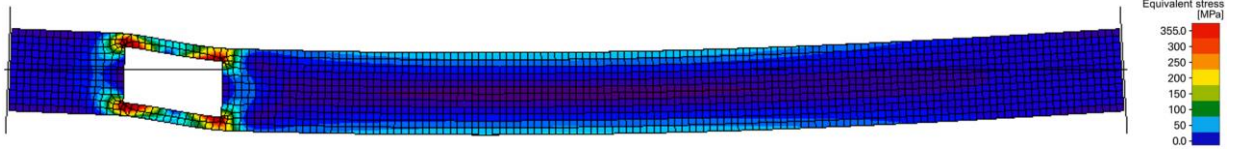


Şekil 13. Referans model için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Model 1 olarak isimlendirilen gövdesinde tesisat boşluğu açılmış olan kirişe ait gerilme dağılımı Şekil 14'te görülmektedir. Güçlendirme amacıyla herhangi bir takviyenin uygulanmadığı söz konusu Model 1'de gerilme dağılımının, boşluğun köşelerinde yoğun gerilme yığılmaları

şeklinde olduğu görülmüştür. Kirişin taşıma kapasitesi, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması nedeniyle önemli ölçüde azalmış ve plastik mafsallar, özellikle boşluk köşelerinde oluşmuştur. Gerilmelerin büyük kısmı boşluğun

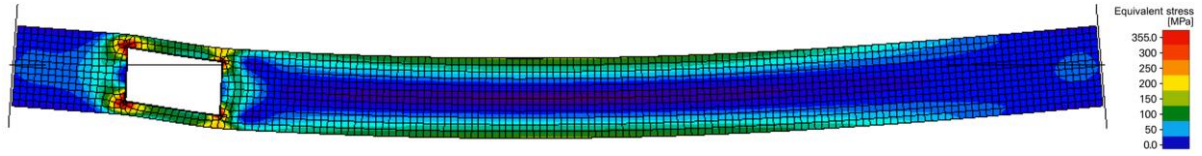
alt ve üst kenarlarındaki "T" kesitlerinde yoğunlaşarak, bu bölgelerde ani taşıma kapasitesi kaybına neden olmuştur.



Şekil 14. Model 1 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 15'te sunulan Model 2'de boşluğun etrafı çevresel rijitlik levhaları ile güçlendirilmiştir. Bu takviye sayesinde gerilme yığılmalarının bir miktar azaldığı gözlemlenmektedir. Ancak, rijitlik levhaları dikdörtgen kesitli boşluk çevresine yayıldığı için, boşluk köşelerinde

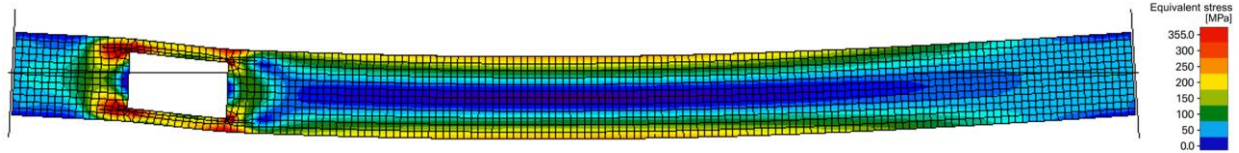
gerilme yığılmaları nedeniyle yüksek gerilmeler mevcuttur. Plastik mafsalların dağılımı referans modele kıyasla farklılık göstermekte olup, rijitlik levhaları gerilmelerin belirli noktalarda yoğunlaşmasını önlemiştir.



Şekil 15. Model 2 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 16'da yatay rijitlik levhası kullanılarak tesisat boşluğu bölgesi takviye edilmiş (Model 3) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Uygulanan yatay rijitlik levhaları sayesinde bu modelde gerilme yığılmaları yatay doğrultuda genişlemiş, ancak düşey yönde halen belirgin bir şekilde gerilme aktarımı sağlanmadığı

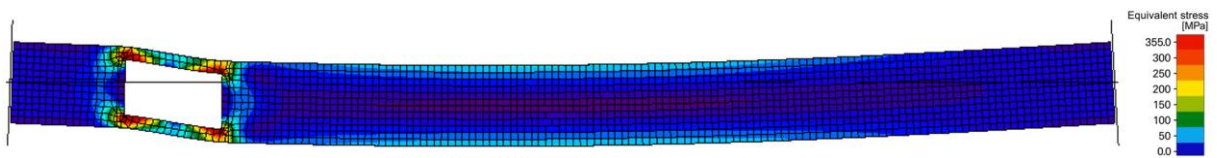
görülmüştür. Yatay rijitlik levhaları, boşluk üst ve alt kenarlarındaki "T" kesitlerini daha rijit hale getirmiş ve göçme mekanizmasını kısmen değiştirmiştir. Model 1'e göre kapasite artışı sağlanmış ancak göçme mekanizması büyük ölçüde ikincil eğilme etkisiyle oluşmaktadır.



Şekil 16. Model 3 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 17'de sadece düşey rijitlik levhaları ile takviye edilmiş (Model 4) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Bu modelin gerilme dağılımı büyük ölçüde Model 1'e benzemektedir, ancak düşey rijitlik elemanları ikincil eğilme mekanizmasını doğrudan engellememektedir.

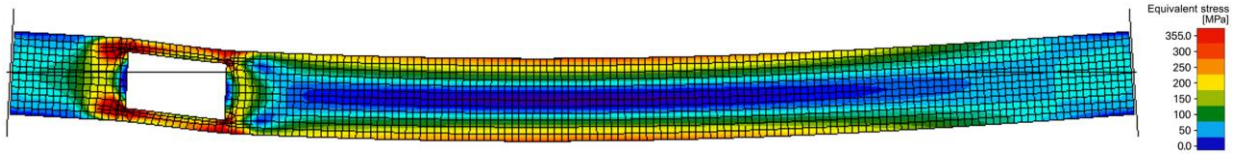
Taşıma kapasitesinde belirgin bir artış gözlemlenmemiştir. Düşey rijitlik levhalarının burulma stabilitesine katkı sağladığı ancak ikincil eğilme göçmesini engelleyemediği görülmüştür.



Şekil 17. Model 4 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Şekil 18'de hem yatay hem de düşey rijitlik levhası kullanılarak takviye edilmiş (Model 5) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı görülmektedir. Bu modelde uygulanan takviye yöntemi sayesinde gerilme dağılımı daha homojen hale gelmiş ve boşluk köşelerindeki gerilme yığılmaları önemli ölçüde azalmıştır. Göçme mekanizması

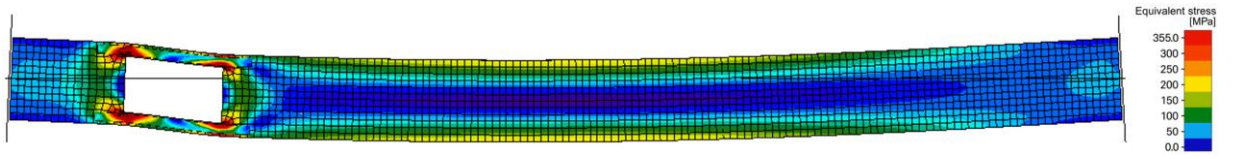
ikincil eğilmeden yanal burulmalı burkulmaya dönüşmüştür, bu da kirişin kapasitesini artırarak daha dengeli bir taşıma sağladığını göstermektedir. Bu model, analizlerde referans kirişe yakın taşıma kapasitesine yaklaşan en başarılı sonuçlardan birini vermiştir.



Şekil 18. Model 5 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Yatay gövde çiftleme levhali kirişin (Model 6) göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 19'da sunulmuştur. Bu modelde gövde boşluğunun üst ve alt kenarlarına eklenen çiftleme levhaları sayesinde gerilme dağılımı, Model 3'e

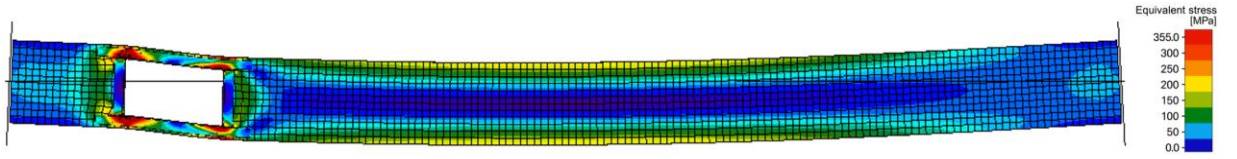
benzer bir şekilde yatay doğrultuda iyileşmiş ancak düşey doğrultuda sınırlı kalmıştır. Bu takviye yöntemi rijitlik artışı sağlasa da boşluk çevresinde belirgin bir gerilme yığılmasının olduğu görülmüştür.



Şekil 19. Model 6 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Hem yatay hem de düşey gövde çiftleme levhali (Model 7) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 20'de verilmiştir. Söz konusu modelde uygulanan takviye yöntemi sayesinde boşluk çevresinde oluşan gerilme yığılmaları büyük ölçüde azaltılmış ve elemanın yük taşıma kapasitesi

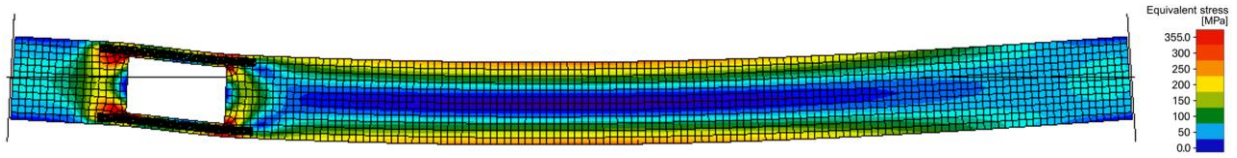
artırılmıştır. Plastikleşme, boşluğun köşe noktalarından daha geniş bir alana yayılmıştır. Buna göre söz konusu modelin sonuçları da Model 5'e benzer şekilde başarılı bir sonuç vermiştir.



Şekil 20. Model 7 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Tesisat boşluğu çevresi "L" profiller ile güçlendirilmiş (Model 8) kirişin göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 21'de görülmektedir. Bu modelde boşluğun çevresinin L profilleri ile güçlendirilmesiyle gerilme dağılımı daha

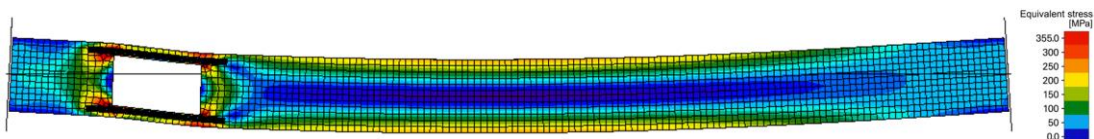
denge hâle gelmiş, ancak boşluk köşelerinde hala belirli miktarda gerilme yığılması oluşmuştur. L profillerin burulma stabilitesine katkıda bulunduğu ancak plastikleşme bölgesini genişletmediği görülmektedir.



Şekil 21. Model 8 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Tesisat boşluğu çevresi "U" profil kullanılarak takviye edilmiş kirişin (Model 9) göçme anındaki gerilme dağılımı Şekil 22'de sunulmaktadır. U enkesitli profillerin boşluğun alt ve üst kenarlarına kaynaklanması ile uygulanan takviye yöntemi kirişin burulma rijitliğini artırmış olsa da eğilme

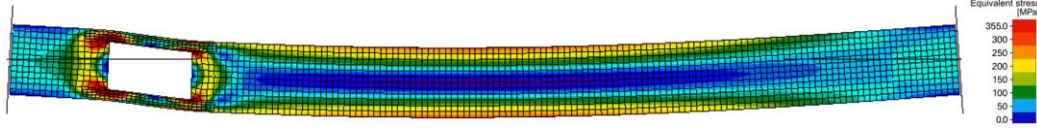
kapasitesindeki iyileşme nispeten sınırlı kalmıştır. Bu takviye yöntemi sayesinde boşluk köşelerindeki gerilme yığılmaları azalmıştır, ancak homojen bir dağılım tam anlamıyla sağlanamadığı görülmüştür.



Şekil 22. Model 9 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Son olarak tesisat boşluğu çevresi çapraz şekilde konumlandırılmış levhalar ile takviye edilmiş kirişe (Model 10) ait göçme anındaki gerilme dağılımını gösteren görsel Şekil 23'te sunulmuştur. Bu modelde boşluk üst ve alt kenarından kesitin üst ve alt flanşına uzanacak şekilde çapraz pozisyonda yerleştirilen levhalar sayesinde elemandaki

gerilme dağılımı nispeten dengeli bir hale gelmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde çapraz şekilde yerleştirilen levhaların boşluk çevresindeki rijitliği artırarak taşıma kapasitesini arttırdığı görülmektedir. Söz konusu modelin sonuçları Model 5 ile birlikte referans kirişin taşıma kapasitesine iyi yaklaşan modellerden olduğu görülmüştür.



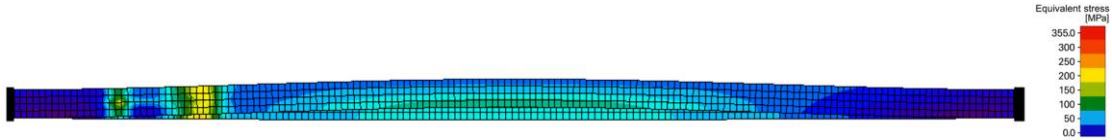
Şekil 23. Model 10 için analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Genel olarak Şekil 13-23 incelendiğinde, referans modelde kirişin açıklık ortasında plastikleşme gerilmesine ulaşan geniş bir bölgenin oluştuğu ve bu bölgedeki plastik mafsalları sonucu kirişin göçme mekanizmasına geçtiği gözlemlenmektedir. Model 1'de, gövdeye açılan boşluğun etkisiyle ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizmasının tetiklendiği ve plastik mafsalların özellikle boşluk köşelerinde oluştuğu görülmektedir. Boşluk çevresinde yüksek gerilme yığılmalarına rağmen, kirişin diğer bölgelerinde taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı ve boşluk çevresi dışındaki alanların gerilme aktarımında neredeyse pasif kaldığı görülmüştür.

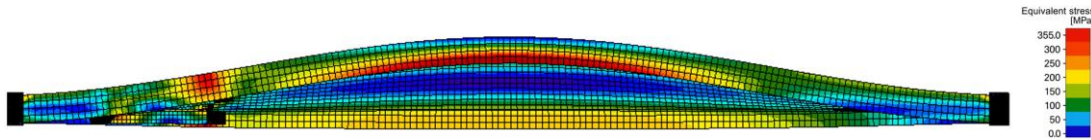
Güçlendirme uygulanan modellerde, özellikle Model 3, 5, 8, 9 ve 10'da, boşluk çevresindeki gerilme dağılımlarının daha dengeli olduğu ve kirişin nispeten daha yüksek taşıma kapasitesiyle çalıştığı belirlenmiştir. Bu durum, söz konusu güçlendirme stratejilerinin yapısal performans üzerindeki

olumlu etkisini kanıtlamakta ve diğer güçlendirme türlerine kıyasla daha verimli sonuçlar sunduğunu göstermektedir.

Model 1 ve Model 5'te, ikincil eğilme mekanizması ile yanal burulmalı burkulma mekanizmasının karşılaştırıldığı GMNIA/LBA analizleri sonucunda, bu iki model arasındaki gerilme dağılımı ve yanal şekil değiştirme farklılıkları Şekil 24 ve 25'te verilmektedir. Güçlendirme uygulanmayan Model 1'de, kiriş herhangi bir geometrik kusur içermeden ikincil eğilme etkisiyle göçmeye ulaştığından, yanal yer değiştirme değerleri ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Buna karşın, Model 5'te uygulanan güçlendirme sayesinde ikincil eğilme mekanizmasının önlenildiği ve kirişin göçmeye yanal burulmalı burkulma mekanizmasıyla ulaştığı belirlenmiştir. Bu analizler, uygun güçlendirme düzenlemelerinin kirişin göçme mekanizmasını değiştirerek taşıma kapasitesini artırabileceğini açıkça ortaya koymaktadır.



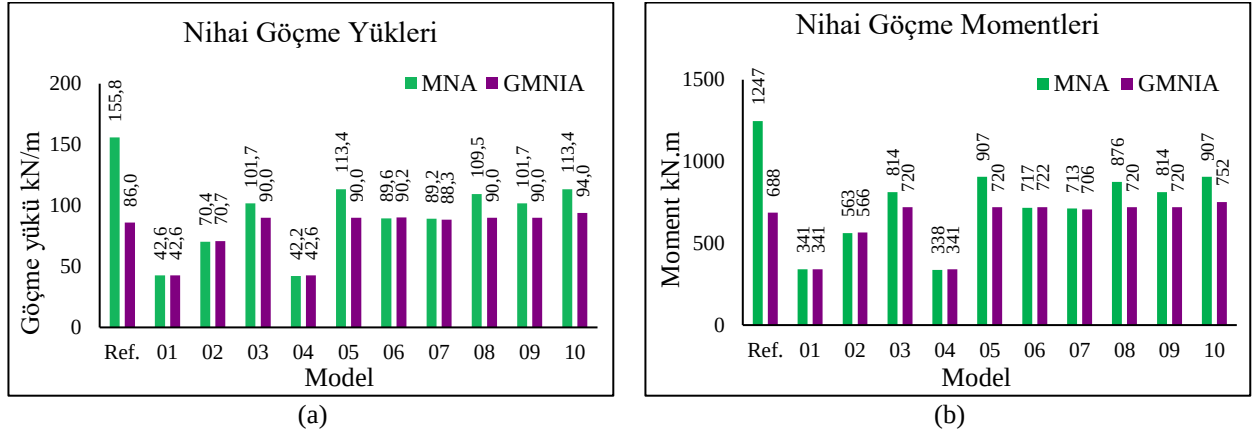
Şekil 24. Model 1 için GMNIA analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı



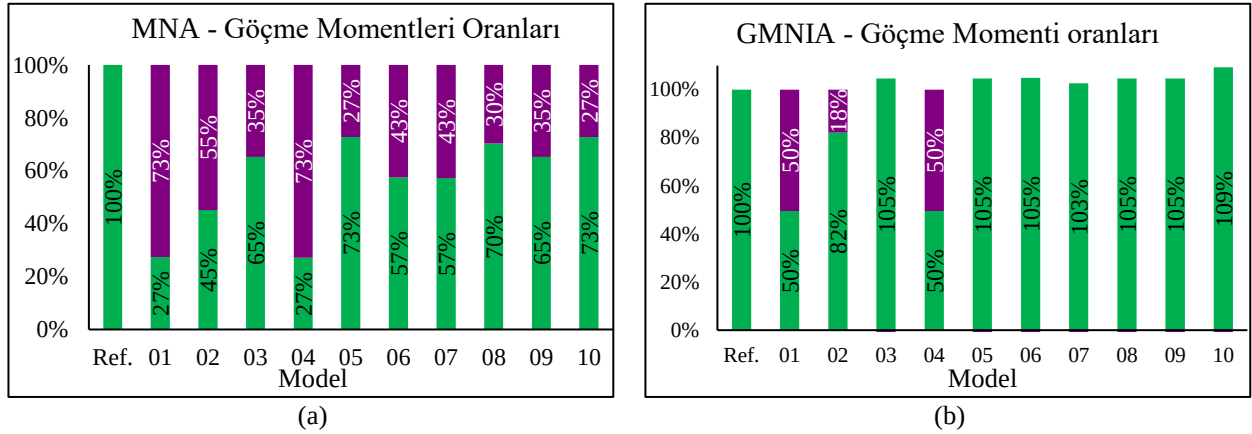
Şekil 25. Model 5 için GMNIA analiz sonucunda elde edilen göçme anındaki gerilme dağılımı

Yapılan MNA ve GMNIA analizleri sonucunda tüm kiriş modelleri için elde edilen göçme yükleri, göçme momentleri, düşey ve yatay yer değiştirme değerleri Şekil 26-28'de verilmiştir. Plastisite teorisine uygun gerçekleştirilen analizler sonucunda kirişin gövdesinde açılan tesisat boşluğu kirişin taşıma kapasitesinin %73 oranda azalmasına neden olmuştur (Şekil 27-a). Uygulanan bazı güçlendirme yöntemleri kirişin taşıma kapasitesinde %73 oranına kadar (Model 5, 10) geri kazanım sağlamışken Model 4'te yapılan takviye düzenlemesinin (sadece düşey rijitlik levhalarıyla güçlendirme) kirişin taşıma kapasitesi üzerinde hiçbir etkisi

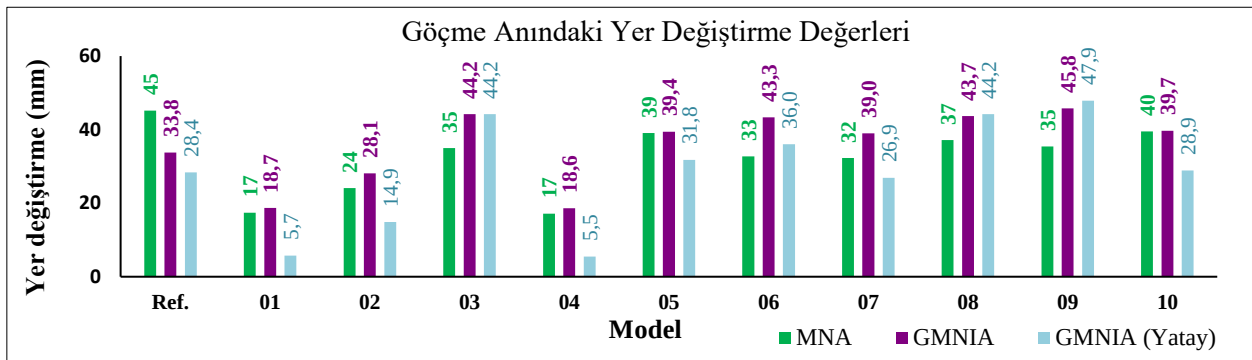
olmadığı görülmüştür. Ancak söz konusu düşey rijitlik levhaların yatay rijitlik levhalarıyla birlikte kullanıldığı zaman kirişin taşıma kapasitesinin %65'ten %73'e kadar çıkmasında katkıda bulunduğu görülmektedir. Bu durumun söz konusu düşey levhaların yatay rijitlik levhalarının burkulma boyunun kısaltmasından kaynaklı olduğu söylenebilir.



Şekil 26. Tüm modellerin analiz sonuçlarına göre nihai kapasitelerinin karşılaştırılması



Şekil 27. Analizler sonucunda referans modele göre hesaplanan göçme momenti oranları



Şekil 28. Analizler sonucunda tüm modeller için elde edilen göçme anındaki yatay ve düşey yer değiştirmeler

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen, geometrik önkusurları da dikkate alan analizler, bazı modellerin gövde boşluklu olmasına rağmen referans modele kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 27-b). Bu durum özellikle Model 3, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10'un yatay güçlendirme elemanları içermesiyle ilişkilidir. Buna göre başlıklara paralel olarak yerleştirilen bu yatay rijitlik elemanları, betonarme kirişlerdeki gövde donatısı gibi çalışarak kesitin burulma rijitliğini artırmış ve burkulma dayanımını önemli ölçüde de iyileştirmiştir. Gövde boşluğunun kirişin kesme kapasitesi ve yanal

burulmalı burkulma davranışı üzerindeki olumsuz etkisine rağmen, bu bölgedeki rijitlik artırıcı elemanların etkili bir stabilite sağladığı görülmüştür.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tüm modellerde yatay ve düşey yer değiştirmeler incelendiğinde, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması ile göçmeye ulaşan modellerin göçme öncesinde nispeten küçük yer değiştirmelerle sınırlı kaldığı görülmüştür (Şekil 28). Bu modellerde gerilme yığılmalarının belirli noktalarda yoğunlaştığı ve bu bölgelerde malzemenin sınır kopma şekli değişmesine ulaştığı tespit edilmiştir. Özellikle Model 1 ve

Model 4'te, gövde boşluğu nedeniyle kirişin ikincil eğilme mekanizmasıyla göçmeye geçtiği belirlenirken, Model 3, 5, 8, 9 ve 10'da uygulanan güçlendirme yöntemlerinin katkısıyla yanal burulmalı burkulma mekanizmasının baskın hale geldiği görülmüştür. Model 2'de ise ikincil eğilme ve yanal burulmalı burkulmanın ortak etkisi altında göçme gerçekleşmiştir.

Elde edilen bulgular, gövdesinde boşluk açılmış çelik kirişlerin uygun güçlendirme yöntemleriyle taşıma kapasitesi kayıplarının belirli oranlarda telafi edilebileceğini ve bazı güçlendirme stratejilerinin diğerlerine kıyasla daha etkin sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada çelik kirişlerin gövdelerinde açılan dikdörtgen kesitli tesisat boşluklarının yapısal performansa etkileri karşılaştırmalı olarak incelemiş ve çeşitli güçlendirme düzenlemelerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler, boşlukların kirişlerin taşıma kapasitesinde ve göçme davranışında önemli değişimlere yol açtığını göstermiştir. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

i-) Gövde boşluklarının yapısal performansa etkisi

Kiriş gövdesinde açılan boşluklar, taşıma kapasitesinde belirgin bir azalmaya neden olmuş ve kirişin göçme mekanizmasını değiştirmiştir. Boşluk içeren kirişlerin, ikincil eğilme (Vierendeel) mekanizması ile göçmeye geçtiği ve özellikle boşluk köşelerinde gerilme yığılmalarının olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler, boşluk nedeniyle kirişin taşıma kapasitesinin %73 oranında azaldığını ortaya koymuştur.

ii-) Güçlendirme yöntemlerinin etkinliği

Boşluk çevresine uygulanan farklı güçlendirme düzenlemeleri, taşıma kapasitesinde ve göçme mekanizmasında birtakım iyileştirmeler ve kapasitede nispeten geri kazanımlar sağlamıştır. Özellikle hem yatay hem de düşey rijitlik levhalarıyla güçlendirilmiş modeller (Model 5 ve Model 10) en yüksek performans artışını sergileyerek kapasite kaybını büyük ölçüde telafi etmiştir. Yalnızca düşey rijitlik levhaları (Model 4) kullanılan güçlendirme düzenlemesinin ise taşıma kapasitesine belirgin bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Bununla birlikte, düşey rijitlik levhalarının yatay rijitlik levhaları ile birlikte kullanılması, taşıma kapasitesindeki artışta etkili olmuştur. Yatay rijitlik elemanlarının, gövde boşluklu kirişlerde burulma rijitliğini artırdığı ve kesitin stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu durum, kirişin ikincil eğilme göçme mekanizmasından çıkarak yanal burulmalı burkulma ile göçmeye uğramasını sağlamıştır.

iii-) Gerilme Dağılımı ve Göçme Mekanizmaları

Referans modelde, plastikleşme gerilmesine ulaşan geniş bir bölge oluşurken, boşluklu modelde ise gerilme yığılmalarının sadece boşluğun köşe noktalarında yoğunlaştığı görülmüştür. Güçlendirme elemanlarının eklenmesi ile gerilme dağılımı nispeten daha homojen hale gelmiş ve lokal buruşmaların ve plastik mafsalların

oluşumunu geciktirmiştir. Model 5 ve Model 10 gibi etkili güçlendirme düzenlemeleriyle göçme mekanizmasının değiştirildiği ve söz konusu kirişlerin güçlendirilen modeller içerisinde daha yüksek taşıma kapasitesi ile çalıştığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak kiriş gövdesinde tesisat vb. amaçlarla açılması düşünülen boşluk, yukarıda bahsedilen sakıncalarından dolayı önerilmemekle beraber açılma ihtiyacı durumunda mutlaka takviye edilmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle tesisat vb. nedenlerle kiriş gövdesine açılan boşluğun söz konusu kirişin taşıma kapasitesi başta olmak üzere davranışını önemli ölçüde değiştirdiğinden farklı nedenlerle kiriş gövdesine boşluk açılması durumunda boşluk çevresinin etkin bir şekilde güçlendirilmesi gerektiği önerilmektedir. Ayrıca gövdede açılan boşluk çevresini güçlendirmek amacıyla uygulanan güçlendirme yöntemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi için gerçekleştirilen analizlerden özellikle Model 5 ve Model 10'un diğer güçlendirme yöntemlerine göre daha uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] M. Maali and N. Çınar, Experimental and numerical tests on beams with web openings under cyclic loading, International Journal of Civil Engineering, 2024. <https://doi.org/10.1007/s40999-024-01025-5>.
- [2] F. Rodrigues, P. C. G. S. Da Vellasco, L. R. O. De Lima, S. A. L. De Andrade, and J. G. S. Da Silva, Finite element modelling of steel beams with web openings, Scientific Research Publishing Inc., vol. 6, pp. 886–913, 2014. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.613082>.
- [3] A. K. Mata, B. S. Bhagat, and N. D. Gami, Parametric study of steel beam with web opening of different shape, size and position using finite element method, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 5, no. 4, pp. 3404–3408, 2018. <https://www.irjet.net/archives/V5/i4/IRJET-V5I4767.pdf>.
- [4] M. M. Abdel-Ghaffar, K. G. Metwally, and B. M. Allam, Effect of stiffening types on steel I-beams with web openings, Journal of Engineering and Applied Science, vol. 65, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/325314433>.
- [5] G. Doğan, Berkitme levhalarının dairesel boşluklu çelik kirişlerin yük taşıma kapasitelerine etkilerinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [6] A. Al-Rifaie, A. S. Al-Husainy, T. Al-Mansoori, and A. Shubbar, Flexural impact resistance of steel beams with rectangular web openings, Case Studies in Construction Materials, vol. 14, pp. 1–6, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00509>.
- [7] M. F. Ertenli, I. Kalkan ve A. Büyükkaragoz, Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanal burkulma sınır

- uzunluğuna etkisi. Politeknik Dergisi, 24(1), 347-354, 2021. <https://doi.org/10.2339/politeknik.821093>.
- [8] J. L. Abbas, Behavior of steel I beams with web openings, Civil Engineering Journal (Iran), vol. 9, no. 3, pp. 596–617, 2023. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-03-08>.
- [9] M. F. Ertenli, E. Erdal, A. Buyukkaragoz, I. Kalkan, C. Aksoylu, and Y. O. Özkılıç, Lateral torsional buckling of doubly-symmetric steel cellular I-beams, Steel and Composite Structures, vol. 46, no. 5, pp. 709–718, 2023. <https://doi.org/10.12989/scs.2023.46.5.709>.
- [10] R. Aydın, E. Yuksel, N. Yardımcı, M. H. Kısa and T. Gokce, In-plane behaviour of beam-to-column connections of corrugated web I-sections. Journal of Constructional Steel Research, 100, 183-196, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.013>.
- [11] K. F. Chung, T. C. H. Liu and A. C. H. Ko, Investigation on vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings. Journal of Constructional steel research, 57(5), 467-490, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00035-3).
- [12] K. F. Chung, C. H. Liu and A. C. H. Ko, Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment-shear interaction curve, Journal of Constructional Steel Research, 59(9), 1177-1200, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00029-4).
- [13] K. D. Tsavdaridis and C. D'Mello, Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. Journal of Constructional Steel Research, 67(10), 1605-1620, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.004>.
- [14] A. Z., Abidin and B. A. Izzuddin, Meshless local buckling analysis of steel beams with irregular web openings, Engineering Structures, 50, 197-206, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.10.006>.
- [15] IDEA StatiCa, Structural Design Software for Steel and Concrete (24.1.1.1474), 2025. www.ideastatica.com.
- [16] Eurocode 3, Design of Steel Structures, 2005. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-3-design-steel-structures>.

