



## Çelik Çerçevdeki Geometrik Ön Kusurların Performansa Etkisi

Mustafa Berker ALICIOĞLU<sup>a1\*</sup>

<sup>a</sup>Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Yunusemre, Manisa, Türkiye

Istanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2021) 3 (3) 197-203

<https://doi.org/10.47769/izufbed.1004776>

ORCID<sup>1</sup> 0000-0003-3735-8201

### YAYIN BİLGİSİ

Yayın geçmişi:

Gönderilen tarih: 05 Ekim 2021

Kabul tarihi: 25 Ekim 2021

### Anahtar kelimeler:

Çelik yapı

Tolerans

Hasar performans düzeyi

Geometrik ön kusur

### ÖZET

Çelik yapılar, eleman ya da sistem bazında kusurlu olabilmektedirler. Yapısal stabilite ve imalat açısından kusurların geometrik tolerans aralığında kalması gerekir. Çalışmada düzlem çelik çerçeve için üç farklı geometrik ön kusur durumu incelenmiştir. Doğrusal olmayan dinamik analiz yapılarak çerçevelerin performans eğrileri oluşturulmuştur. Çerçeveler, maksimum çatı deplasmanına ulaşıncaya kadar analiz edilmiştir. Plastik mafsallardaki hasar performans düzeyleri ve performans eğrileri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Senaryo 1 ve 2' deki göçme durumu, kiriş mekanizması şeklinde gerçekleşmiştir. Senaryo 3 ve 4' deki göçme durumu, çerçeve mekanizması şeklinde gerçekleşmiştir. Senaryo 1 ve 2 çerçevelerindeki hasar performans düzeylerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Senaryo 3 ve 4 çerçevelerindeki hasar performans düzeylerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Kusurların, çerçeve performansını minör olarak olumsuz etkilediği ve tolere edilebilir olduğu tespit edilmiştir.

## The Effect of Initial Geometric Imperfections in Steel Frame on Performance

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 05 October 2021

Accepted: 25 October 2021

### Keywords:

Steel structure

Tolerance

Damage Performance level

Initial geometric imperfection

### ABSTRACT

Steel structures can be imperfect that the basis of members or systems. In terms of structural stability and construction, imperfections must remain within the geometric tolerance range. In this study, three different initial geometric imperfection cases have been investigated for steel plane frame. By solving nonlinear dynamic analysis, performance curves of frames were occurred. The frames were analyzed until maximum roof displacement was reached. The comparison has been made via damage performance levels at plastic hinge joints and performance curves. Collapse status in Senario 1 and 2 has been realized in the form of beam mechanism. Collapse status in Senario 3 and 4 has been realized in the form of frame mechanism. Damage performance levels in frames of Senario 1 and 2 were determined to be the same. Damage performance levels in frames of Senario 3 and 4 were determined to be the same. Imperfections have been found to have a minor negative effect on frame performance and to be tolerable.

### 1. Giriş

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYDE, 2018), yapısal çelik ve çelik – betonarme kompozit yapı elemanlarının ve yapı sistemlerinin, kullanım amaçlarına uygun olarak, yeterli bir güvenlikle tasarımına ve yapımına ilişkin yöntem, kural ve koşulları içermektedir. Karakteristik et kalınlıkları 2,5 mm'den az olmayan boru ve kutu profiller ile elemanların karakteristik kalınlıkları en az 4,0 mm olan çelik yapı sistemlerini kapsamaktadır. Çelik yapıların imalat ve montaj işleri, kalite kontrolünden geçmektedir. Kalite kontrolü, imalatçı ve yüklenici tarafından TS EN 1090-2 standardına uygun olarak yapılmaktadır. İmalat aşaması bitmiş çelik yapı elemanlarının şantiye sahasına taşınması ancak söz konusu standarttaki tolerans aralıklarının karşılanması ile mümkün olmaktadır (ÇYTHYDE, 2018).

Avrupa Birliği Ülkelerinde, EN 1090-2 standardına göre kontrol ve imalat yapılmaktadır. TS EN 1090-2, EN 1090-2 standardının Türkçeye çevrilmiş hali olup, çelik yapıların üretilmesi için gerekli olan koşulları belirlemektedir. Bununla birlikte, Türk Yapısal Çelik

Derneği tarafından Yapı Çeliği İşleri Teknik Şartnamesi (YÇİTŞ-2007) hazırlanmıştır. YÇİTŞ-2007 tasarım, esaslar ve belgelendirme, malzeme, imalat, kaynak, mekanik birleşim elemanları, saha montajı, yüzey hazırlığı, korozyondan korunma, geometrik toleranslar, muayene, deney ve düzeltme işlemleri ve işçi sağlığı ve iş güvenliği konularını ihtiva etmektedir. Yorulmaya duyarlı kreynler, demiryolu ve karayolu köprüleri ile açık deniz yapıları gibi çelik yapılar haricindeki çelik yapılar, çelik beton karma yapıların çelik kısımları ve hafif çelik yapılar bu şartnamenin kapsamında bulunmaktadır. YÇİTŞ-2007 ile geometrik toleranslar, TS EN 1090-2 esas alınarak tanımlanmış olup, imalatçılar ve yükleniciler, yorulmaya duyarlı kreynler, demiryolu ve karayolu köprüleri ile açık deniz yapıları dışındaki çelik yapıların imalatında YÇİTŞ-2007'yi yardımcı kaynak olarak kullanmaktadırlar. YÇİTŞ-2007' nin dışında farklı ülkeler tarafından kullanılan çeşitli şartnameler de bulunmaktadır.

Birleşik Krallık ve İrlanda Yapısal Çelik sektörünü temsil eden The

\* Sorumlu yazar.

E-posta adresi: [berker.alicioglu@gmail.com](mailto:berker.alicioglu@gmail.com)

British Constructional Steelwork Association (BCSA), bina inşaatındaki toleranslar açısından National Structural Steelwork Specification for Building Construction (NSSS, 2020) şartnamesinin kullanımını önermektedir. (NSSS, 2020) geometrik toleranslara ilişkin bina türü çelik yapılar ve yorulmaya duyarlı çelik yapılar için kullanılabilir niteliktedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde American National Standards Institute (ANSI) ve American Institute of Steel Construction (AISC), çelik binalar ve köprüler için Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges (COSP), şartnamesinin kullanımını önermektedir. Şartname, ANSI/AISC 303-16 olarak bilinmektedir. ANSI/AISC 303-16 ile yapısal çelik çerçeve toleranslarına değinilmiştir.

Çerçeve tolerans aralıkları dışındaki çerçeveler, geometrik ön kusurlu çerçeve bir başka deyişle sistem kusurlu çerçeve olarak karşımıza çıkmaktadır. ÇYTHYDE-2018 de geometrik ön kusurlar, yapı sistemlerinin stabilitesini etkileyen başlıca faktörler arasında gösterilmiştir. ÇYTHYDE-2018 ile yapı stabilitesi açısından geometrik ön kusurların doğrudan doğruya modellenmesi veya geometrik ön kusurlar için fiktif yüklerin kullanılması önerilmiştir. Öte yandan çelik yapılar, iki boyutlu ve üç boyutlu yapısal analizler ile tasarlanırlar. Tasarımda arsanın geometrik özellikleri ve imar durumu dikkate alınır ve toplam yapı alanına karşılık gelecek şekilde milimetrik hesaplamalar ve çizimler yapılır. İmalatta TS EN 1090-2 standardındaki tolerans aralıklarına uyulmaz ise proje üzerindeki imalat detaylarının şantiyede montajının yapılması zorlaşır ve yapı hesaplanan geometriden uzaklaşır.



Şekil 1. Kusurlu bir ankastre kolon birleşiminin farklı açılardan görünümü

Şekil 1 ile çelik bir yangın merdivenine ait kusurlu bir ankastre mesnet birleşiminin gösterimi sunulmuştur. Birleşim incelendiğinde projesinde simetrik olan bayrak levhalarının uygulamada asimetrik olduğu, iki adet bayrak levhasının taban levhasına tam temas etmediği, iki adet ankrajın bayrak levhalarına ve kolona temas ettiği, bu yüzden somun montajının yapılamadığı görülmektedir. Literatür incelendiğinde kusurlu yapılara ve elemanlara ilişkin çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. (Coleman vd., 1992) Silo duvarlarındaki küçük kusurların burkulma mukavemetini etkileyebileceği belirterek tam ölçekli olan çelik silolardaki kusurların ölçümü üzerine çalışmışlardır. (Gu ve Chan, 2005) eleman ve çerçeve kusurları olabilen çelik yapıların ikinci mertebe analizine ve tasarımına ilişkin sayısal örnekler çözümlenmiştir. Çalışmada üç boyutlu çelik bir kubbe ve üç katlı düzlem çelik çerçeve ele alınmıştır.

(Shayan vd., 2014) geometrik kusurların ve şekillerinin yapıların davranışında önemli bir etkiye sahip oldukları ve bu nedenle ileri yapısal analiz ile bir çelik çerçevenin yük taşıma kapasitesinin belirlenirken doğru bir şekilde modellenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Çalışma ile çelik çerçeve dayanımlarının mod sayısı ve büyüklüğü ile nasıl değiştiği gösterilmiştir.

(Altekin ve Yükseler, 2007) sabit kalınlıklı dairesel plağı, doğrusal olarak değişen dönel simetrik yük etkisi altında ele almışlardır. Plak kenarı ankastre ve sabit mesnet durumları için ayrı ayrı araştırılmış, plak yer değiştirmelerinin ve kesit tesirlerinin plak üzerindeki dağılımını ilkel kusur (geometrik ön kusur) parametresinin ve poisson oranının etkisinde incelemiştir. (Yaman vd., 2009) U kesitli çelik eğilme elemanlarında geometrik kusurların tanımlanmasına yönelik deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır.

(Aydın ve Aktaş, 2011) narin çelik plaklardaki geometrik kusurun artmasıyla plakların taşıdığı burkulma yükünün azaldığını tespit etmişlerdir. (Kala, 2012) ön kusurlu düzlem çelik çerçevelerin geometri açısından doğrusal olmayan sonlu eleman güvenilirlik analizini yapmıştır. Çalışma ile yük taşıma kapasitesinin kusurlara duyarlılığının göstergesi olarak birinci ve ikinci burkulma kuvvetlerinin önemi tartışılmıştır.

(Şmak ve Straka, 2012) mevcut bir enerji üretim tesisindeki çelik çatı elemanlarının geometrik ve yapısal kusurlarını incelemiştir. Uzun yıllar düzenli bakım yapılmayan bu tip yapılarda kusurların oluştuğunu belirterek bu kusurların yapı güvenliğini etkilediğini bildirmişlerdir. (Kala, 2015) kalıcı ve uzun süreli yüklere maruz sıcak haddelenmiş IPE kirişlerindeki rastgele kusurlu durumlar için yapısal stabilite açısından güvenilirlik analizi yapmıştır. Monte Carlo yöntemine dayanan olasılık analizini kullanmıştır. Özellikle yüksek narinliğe sahip kirişler için nispeten yüksek kısmi güvenlik faktörü değerlerini elde etmiştir.

(Chen vd., 2016) ağısı kabuk yapıların ve kabuk benzeri uzay çerçevelerin yük taşıma kapasitelerinin geometrik ön kusurlara karşı hassas olabileceğini belirtmişlerdir. Çalışma ile düğüm noktaları arasındaki korelasyon dikkate alınarak mevcut bir ağısı kabuk yapının geometrik ön kusurları yerinde ölçülmüş ve kabuk yapıların geometrik ön kusurları için rastgele bir alan modeli önerilmiştir. (Zabojszcza ve Radoń, 2019) tek katmanlı çelik kubbeleri oluşturan düğüm noktalarındaki konum kusurlarının kubbe güvenilirliğine olan etkisini araştırmışlardır.

(Wang vd., 2021) iletim kulelerinin nihai kapasitelerinin azalmasında geometrik kusurlara yeterince değinilmediği belirtilerek çalışmalarında öz mod birleştirme yöntemi (eigenmode assembly method) isimli yeni bir yöntem önermişlerdir. Yöntem doğrusal burkulma analizine dayanmakta olup, iki tam ölçekli test kulesi üzerinde inceleme yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmasıyla geometrik ön kusurların, yapısal davranışa etkisine ilişkin bilginin kapsamlı düzeyde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada düzenli çelik çerçevede Senaryo 1 ve Senaryo 2 olarak adlandırılmış iki farklı geometrik ön kusur ile düzensiz çelik çerçevede Senaryo 3 ve Senaryo 4 olarak adlandırılmış iki farklı geometrik ön kusur ele alınmıştır.

Geometrik ön kusurlar doğrudan modellenmiştir. Çerçevesel, doğrusal olmayan analiz yöntemi ile analiz edilerek performans eğrileri çizilmiştir. Doğrusal olmayan analiz, hem geometri değişimlerini hem de malzemenin doğrusal olmayan özelliğini dikkate almaktadır. Çalışma kapsamında dört farklı senaryo dikkate alınmış olmasına karşın Senaryo 1 ve 3' deki kusur aynı olduğundan üç farklı geometrik ön kusur ele alınmıştır. Kusursuz çerçeve performansları referans alınarak üç farklı geometrik ön kusur durumu araştırılmıştır. Çalışma, performans yaklaşımını ihtiva ettiğinden önceki çalışmalardan ayrılmaktadır.

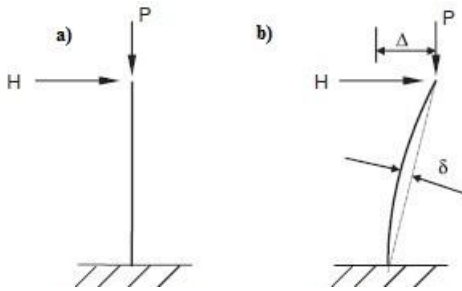
## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada iki adet kusursuz ve dört adet geometrik ön kusurlu düzlem çelik çerçevenin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Dinamik bir yük etkisi altındaki bir yapının yükün etkime süresi boyunca her saniyedeki yapı tepkisinin analizine Zaman Tanım Alanında Analiz (ZTAA) denmektedir. Bir başka deyişle yapının yük etkisi altındaki dinamik tepkisinin adım adım analizidir. Denklem (1) ile verilen eşitliğin çözümünü gerektirir (Reference Manual, 2021).

$$K u(t) + C \dot{u}(t) + M \ddot{u}(t) = r(t) \quad (1)$$

Denklem (1)' deki  $K$ , rijitlik matrisi,  $C$  sönüm matrisi,  $M$  diyagonal kütle matrisi,  $u$  deplasman,  $\dot{u}$  hız,  $\ddot{u}$  ivme ve  $r$  uygulanan yük olarak nitelendirilmektedir. Yük, dinamik ivmeyi içeriyorsa deplasman, hız ve ivme bu dinamik harekete göreler.

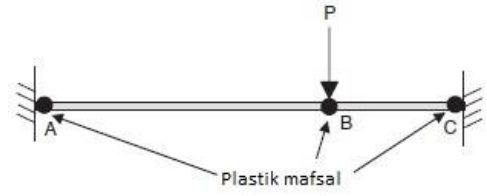
Öte yandan yapısal çelik elastoplastik bir malzemedir. Bu özelliğinden dolayı yapısal çelik ile inşa edilen yapılar, dinamik yükler altında sünek davranış sergilerler (Wong, 2009). Dinamik yük etkisindeki sünek yapının gerçek yapı davranışına yakınsak bir çözümünü yapabilmek için geometri değişimleri ve malzeme davranışı dikkate alınmalıdır (Chan ve Chui, 2000). Geometri değişimleri,  $P-\Delta$  ve  $P-\delta$  etkisi olarak yapı sisteminin denge denklemlerinde göz önüne alınır.  $P-\Delta$ , yapıda kritik bir yanal yer değiştirmeye maruz kaldığında devrilme momenti ve/veya aksel kuvvet dağılımındaki ani değişiklikleri ifade ederken  $P-\delta$ , yapıyı oluşturan elemanlarda meydana gelen ani değişikliklerdir (Lindeburg ve Baradar, 2001).



Şekil 2.  $P-\Delta$  ve  $P-\delta$  etkisi (Wong, 2009).

Şekil 2 ile  $P-\Delta$  ve  $P-\delta$  etkisi, tekil bir kolon üzerinde gösterilmiştir.  $P$ , aksel yükü,  $H$ , yanal yükü,  $\Delta$ , sistemin yanal öteleme miktarını ve  $\delta$ , kolondaki şekil değişimini ifade etmektedir.

Yapının çözümünde malzeme davranışının dikkate alınabilmesi için plastik mafsal varsayımının yapılması gerekmektedir. Plastik mafsal, doğrusal elastik olmayan şekil değiştirmelerin yığıldığı bölge olarak tanımlanmıştır (ÇYTHYDE-2018). Plastik moment kapasitesine ulaşan bir kesit, eğilme momentinde daha fazla bir artış olmadan serbestçe döner. Böylece kesit, gerçek bir menteşe gibi davranır (Wong, 2009).



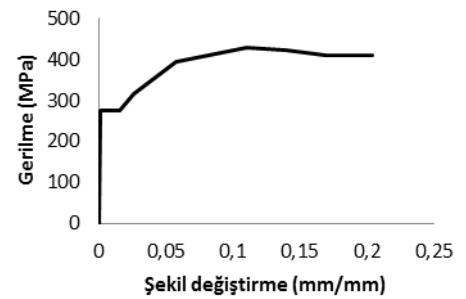
Şekil 3. Plastik mafsal gösterimi

Şekil 3 ile iki ucu ankastre mesnet olan bir kiriş üzerinde plastik mafsal oluşması muhtemel noktaların gösterimi yapılmıştır.  $P$ , kiriş üzerindeki yükü, A-B-C kesitleri plastik mafsal oluşum noktalarını simgelemektedir. Plastik mafsal tanımında kullanılan denklemler ve modelleme parametreleri, çeşitli standartlar ile tanımlanmıştır. Bu standartların başında FEMA 356, ASCE 41-06, ASCE 41-13 ve ASCE 41-17 gelmektedir.

## 3. Yapısal Analiz

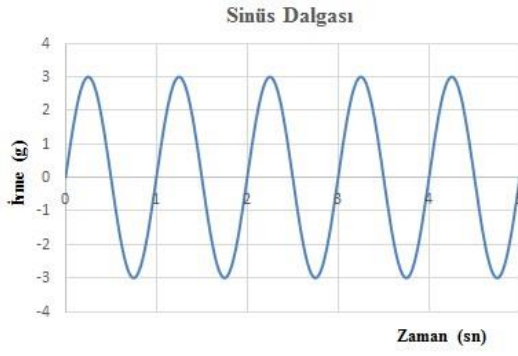
Yapısal analiz, Sap2000 yapı analiz ve tasarım programı ile yapılmıştır (Sap2000, 2021). Çalışmada beş katlı üç açıklıklı hem düzenli hem de düzensiz düzlem çelik çerçevesel yapılar kullanılmıştır. Kat yüksekliği 3 metre olup, her katta aynıdır. Tüm açıklıklar, 5 metredir.

Kirişlerin üzerinde (-Z) yönlü 2,0 kN/m çizgisel yük bulunmaktadır. Senaryo 1 ve Senaryo 2 için kullanılan çerçevesel yapıların zemine mafsalı bağlandığı, Senaryo 3 ve Senaryo 4 için kullanılan çerçevesel yapıların zemine ankastre bağlandığı kabul edilmiştir. Malzeme, EN 1993-1-1'e göre EN 10025-2 standardındaki S275 yapısal çelik olup, programın ön tanımlı malzeme listesinden seçilmiştir. Çerçevesel yapıların zati ağırlık ve kirişlere tanımlanmış çizgisel yük dikkate alınarak tek bir yük kombinasyonunda ÇYTHYDE-2018' deki Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) yaklaşımına göre tasarlanmıştır. Kombinasyon "dusey yukler" olarak adlandırılmış olup kolonlar, HE300A ve kirişler, IPE300 olarak boyutlandırılmıştır. Kolon ve kiriş elemanları kuvvetli eksenlerinde boyutlandırılmış ve analiz edilmiştir.



Şekil 4. Çelik malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Sap2000, 2021)

ZTAA' de kullanılan dinamik yük için sinüs dalgası grafiğinden yararlanılmıştır. Grafikte 101 adet ivme-zaman değer çiftinden oluşan veri bulunmaktadır. Şekil 5' deki  $g$ , yer çekimi ivmesini simgelemektedir olup, zaman saniye ( $s$ ) cinsindedir. Grafikteki en büyük veriyi  $3g$  oluşturmaktadır.



Şekil 5. Sinüs dalga grafiği

Sap2000 programındaki ZTAA tanımında kullanılan parametre verileri, Çizelge 1 ile gösterilmiştir. Çizelge 1’ deki veriler ile oluşturulan dinamik yük, çerçevelere 5 sn süre için etkilmiştir.

Çizelge 1. ZTAA tanımında kullanılan parametre verileri

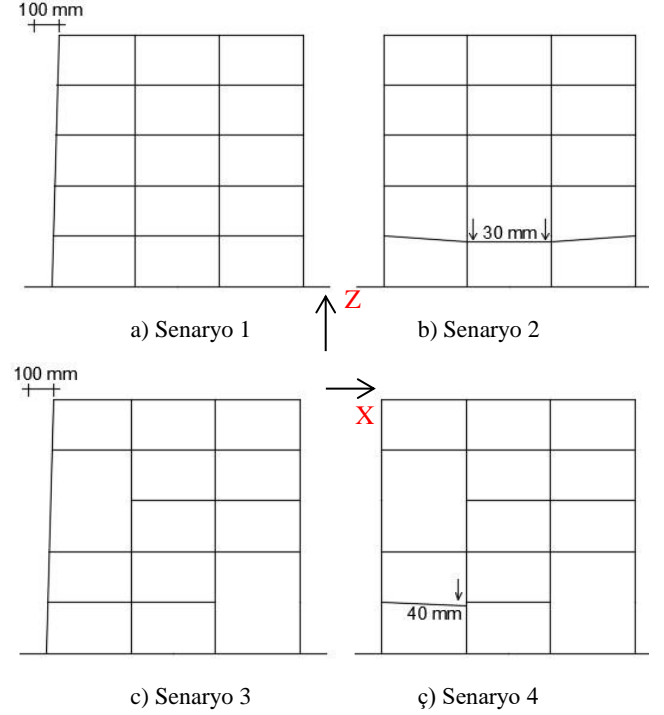
Parametre	Veri
Analysis type	Nonlinear
Time history type	Direct Integration, Transient
Geometric nonlinearity parameters	P-Delta plus Large Displacements
Initial conditions	Continue from State at End of Nonlinear Case: "dusey yukler"
Scale Factor	9,81 m/sn <sup>2</sup>

Malzemenin doğrusal olmayan davranışının analizde göz önüne alınabilmesi için plastik mafsalları varsayımı yapılmıştır. Maksimum moment, kolon ve kiriş uç noktalarında meydana geleceğinden bu noktalara plastik mafsalları tanımlanmıştır. Kolon elemanları için plastik mafsalları etkileşim tesirleri  $P-M$ , kiriş elemanları için plastik mafsalları etkileşim tesirleri  $M$  olarak ele alınmıştır.  $P$  eksenel yükü,  $M$  momenti simgelemektedir. Senaryo 1 ve Senaryo 2 için kullanılan çerçevelerde plastik mafsalları tanımında ve kesitteki hasar performans düzeyinde FEMA 356-2000’ de yer alan doğrusal olmayan prosedür için hazırlanmış Tablo 5-6’ daki plastik mafsalları modelleme ve kabul kriterlerinden yararlanılmıştır. Senaryo 3 ve Senaryo 4 için kullanılan çerçevelerde plastik mafsalları tanımında ve kesitteki hasar performans düzeyinde ASCE 41-13’ de yer alan doğrusal olmayan prosedür için hazırlanmış Tablo 9-6’ daki plastik mafsalları modelleme ve kabul kriterlerinden yararlanılmıştır.

### 3.1 Geometrik Ön Kusurlu Çerçeveler

Çalışmada üç adet düzenli ve üç adet düzensiz çerçeve ele alınmıştır. Kusursuz çerçevede herhangi bir geometrik ön kusur bulunmamaktadır. Yapılan literatür araştırmasıyla kusurların milimetre mertebesinde olduğu incelenmiş olduğundan tüm senaryolardaki kusurlar, milimetre mertebesinde ele alınmıştır. Kusurlar, giriş bölümünde bahsedilen standartların, şartnamenin ve yönetmeliğin tolerans sınırları dışında kalmaktadır. Senaryo 1’ de çerçevenin en sol aksında zemin ile çatı katı arasında (+X) yönünde 100 mm kaçıklık bulunmaktadır. Senaryo 2’ deki kusur, zemin kat kirişlerinde olup, sol açıklıktaki kirişin sağ ucu ve sağ açıklıktaki kirişin sol ucu (-Z) yönünde 30 mm kaçıktır. Buna bağlı olarak orta açıklıktaki kiriş, zemin kat seviyesinden (-Z) yönünde 30 mm

aşağıda kalmıştır. Senaryo 3’ de çerçevenin en sol aksında zemin ile çatı katı arasında (+X) yönünde 100 mm kaçıklık bulunmaktadır. Senaryo 4’ de zemin katın sol açıklığında kirişin sağ ucu (-Z) yönünde 40 mm kaçıktır. Orta açıklıktaki kirişte kusur bulunmamaktadır. Senaryo 1 ve 3’ deki kusur, aynı olduğundan üç farklı geometrik ön kusur incelenmiştir.



Şekil 6. Çerçevelerdeki kaçıklıklar

### 3.2 Performans Eğrileri ve Hasar Performans Düzeyleri

Çerçeveler, ZTAA yöntemi ile analiz edilerek tepe deplasmanı – taban kesme kuvveti değer çiftlerinden oluşan performans eğrileri çizilmiştir. Çerçevelere uygulanan dinamik yük, döngüsel karakterde olduğundan performans eğrileri çizilirken sadece pozitif yöndeki artış değerleri dikkate alınmıştır. Artan kesit tesirleri altında plastik mafsalları oluşumu ve tepe deplasmanı artışı izlenmiştir.

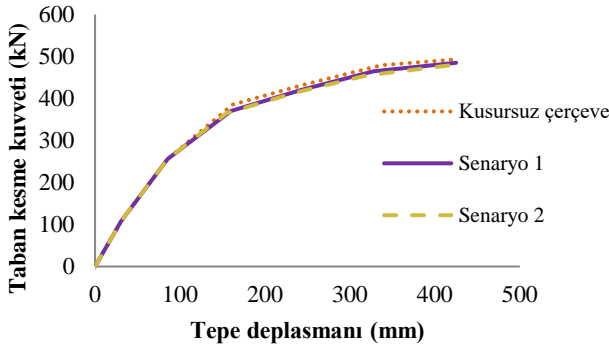
Çizelge 2. Düzenli çerçevelerin tepe deplasman değerleri

Adım sayısı	Kusursuz çerçeve	Tepe deplasmanı (mm)	
		Senaryo 1	Senaryo 2
0	0	0	0
1	30	30	30
2	85	85	85
3	162	160	155
4	247	242	238
5	337	328	320
6	427	425	422

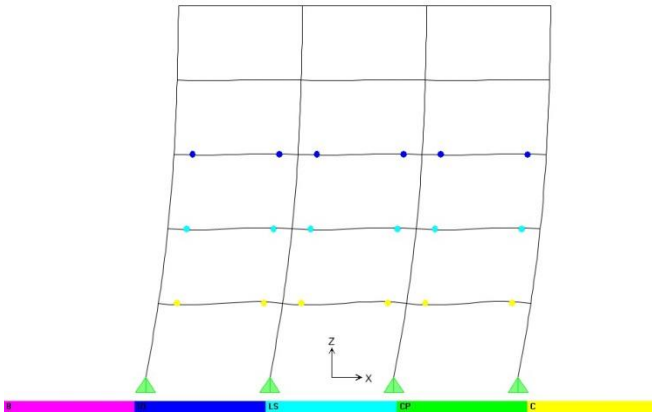


**Çizelge 3.** Düzenli çerçevelerin taban kesme kuvveti değerleri

Adım sayısı	Taban kesme kuvveti (kN)		
	Kusursuz çerçeve	Senaryo 1	Senaryo 2
0	0	0	0
1	107	107	107
2	256	256	256
3	385	370	365
4	434	420	415
5	479	465	455
6	494	485	480

**Şekil 7.** Düzenli çerçevelerin performans eğrileri

Çizelge 2 ile düzenli çerçevelerin analiz adımlarındaki tepe deplasman değerleri, Çizelge 3 ile düzenli çerçevelerin analiz adımlarındaki taban kesme kuvvet değerleri verilmiştir. Şekil 7 ile kusursuz çerçeve, Senaryo 1 ve Senaryo 2' ye ait düzenli çerçevelerin performans eğrileri çizilmiştir.

**Şekil 8.** Analiz sonrası düzenli çerçeve hasar performans düzeyleri

Analiz sonucuna göre tüm çerçevelerdeki hasar performans düzeyleri aynıdır. Şekil 8 ile FEMA 356-2000 uyarınca tüm çerçevelerde hasar performans düzeylerinin gösterimi yapılmıştır. İkinci kat kirişlerinde hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life

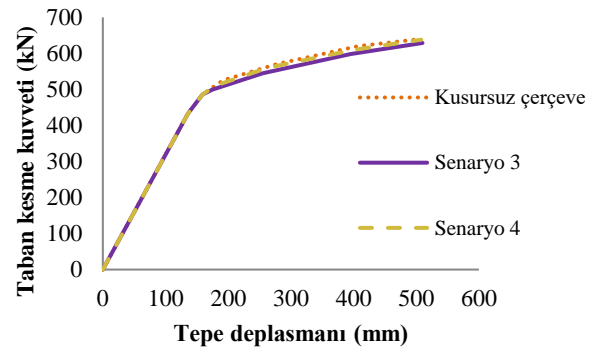
Safety) düzeyinde, birinci kat kirişlerinde hasar LS – CP (Collapse Prevention) düzeyinde ve zemin kat kirişlerinde hasar CP düzeyinden ileridedir.

**Çizelge 4.** Düzensiz çerçevelerin tepe deplasman değerleri

Adım sayısı	Tepe deplasmanı (mm)		
	Kusursuz çerçeve	Senaryo 3	Senaryo 4
0	0	0	0
1	136	136	136
2	159	159	159
3	192	175	179
4	276	255	263
5	408	395	400
6	507	510	508

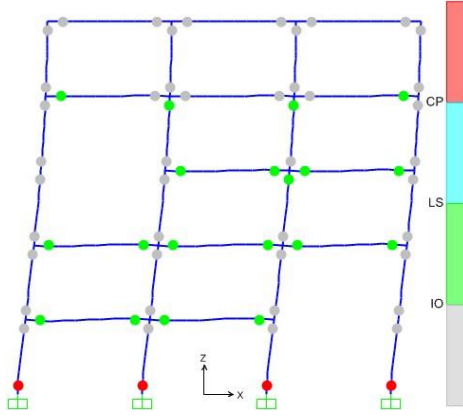
**Çizelge 5.** Düzensiz çerçevelerin taban kesme kuvveti değerleri

Adım sayısı	Taban kesme kuvveti (kN)		
	Kusursuz çerçeve	Senaryo 3	Senaryo 4
0	0	0	0
1	434	434	434
2	486	486	486
3	525	500	510
4	570	545	560
5	620	598	610
6	640	629	638

**Şekil 9.** Düzensiz çerçevelerin performans eğrileri

Çizelge 4 ile düzensiz çerçevelerin analiz adımlarındaki tepe deplasman değerleri, Çizelge 5 ile düzensiz çerçevelerin analiz adımlarındaki taban kesme kuvvet değerleri verilmiştir. Şekil 9 ile

kusursuz çerçeve, Senaryo 3 ve Senaryo 4' e ait düzensiz çerçevelerin performans eğrileri çizilmiştir.



**Şekil 10.** Analiz sonrası düzensiz çerçeve hasar performans düzeyleri

Analiz sonucuna göre tüm çerçevelerdeki hasar performans düzeyleri aynıdır. Şekil 10 ile ACSE 41-13 uyarınca tüm çerçevelerde hasar performans düzeylerinin gösterimi yapılmıştır. Üçüncü katta sol açıklıktaki kirişin sol ucunda ve sağ açıklıktaki kirişin sağ ucunda hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, zemin-birinci ve ikinci kat kirişlerinde hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, ikinci kattan orta açıklığındaki sağ kolonun üst ucunda hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, üçüncü kattan orta açıklığındaki her iki kolonun üst uçlarında hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde ve zemin kat kolon alt uçlarında hasar CP düzeyinden ileridedir.

#### 4. Sonuç

Çelik yapılar, eleman ya da sistem bazında geometrik ön kusurlu olabilmektedirler. Kusurların tolerans aralıklarında kalması çerçevelerin şantiyede montajının yapılabilmesi için önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında incelenen kusurlar, giriş bölümünde bahsedilen standartların, şartnamenin ve yönetmeliğin tolerans sınırları dışında kalmaktadır. Çalışma ile geometrik ön kusur durumlarının performans yaklaşımı kullanılarak incelenebilmesi ve performans eğrileri arasında bir fark oluşması için tolerans aralığında olmayan kusurlar ele alınmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasıyla geometrik ön kusurların, yapısal davranışa etkisine ilişkin bilginin kapsamlı düzeyde olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile hem düzenli çelik bir çerçevede Senaryo 1 ve Senaryo 2 olarak adlandırılmış hem de düzensiz çelik bir çerçevede Senaryo 3 ve Senaryo 4 olarak adlandırılmış iki farklı geometrik ön kusur ele alınmıştır. Senaryo 1 ve 3' deki kusur, aynı olduğundan üç farklı geometrik ön kusur incelenmiştir. Geometrik ön kusurlar doğrudan modellenmiştir. Çerçeveler, doğrusal olmayan analiz yöntemi ile analiz edilerek performans eğrileri çizilmiştir. Doğrusal olmayan analiz, hem geometri değişimlerini hem de malzemenin doğrusal olmayan özelliğini dikkate almaktadır. Kusursuz çerçeve performansları referans alınarak üç farklı geometrik ön kusur durumu araştırılmıştır.

Çizelge 2 ve 3 incelendiğinde 1. ve 2. Analiz adımlarında tüm çerçeveler için tepe deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Çizelge 4 ve 5 incelendiğinde 1. ve 2. Analiz adımlarında tüm çerçeveler için tepe deplasmanı ve taban kesme kuvveti değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Bu bağlamda düzenli ve düzensiz çerçevelerde elastik davranışın aynı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2' deki veriler doğrultusunda tepe deplasman değerleri arasında kusursuz çerçeve ile Senaryo 1 için ortalama % 2, kusursuz çerçeve ile Senaryo 2 için ortalama % 3 fark olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 3' deki veriler doğrultusunda taban kesme kuvveti değerleri arasında kusursuz çerçeve ile Senaryo 1 için ortalama % 3, kusursuz çerçeve ile Senaryo 2 için ortalama % 5 fark olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde tüm çerçevelerin performans eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu ve en iyi performansı kusursuz çerçevenin en kötü performansı ise Senaryo 2' nin sergilediği görülmüştür.

Şekil 8 incelendiğinde kolonlarda plastik mafsallı oluşmadığı, tüm plastik mafsallı oluşumunun kirişlerde meydana geldiği incelenmiştir. Zemin kat kolon ayaklarında plastik mafsallı oluşmamasının nedeni mafsallı mesnet tanımının yapılmasıdır. Tüm düzenli çerçevelerdeki hasar performans düzeylerinin aynı olduğu tespit edilmiştir. İkinci kat kirişlerinde hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, birinci kat kirişlerinde hasar LS – CP (Collapse Prevention) düzeyinde ve zemin kat kirişlerinde hasar CP düzeyinden ileridedir. Tüm düzenli çerçevelerde kırış mekanizması gerçekleşmiştir.

Çizelge 4' deki veriler doğrultusunda tepe deplasman değerleri arasında kusursuz çerçeve ile Senaryo 3 için ortalama % 5, kusursuz çerçeve ile Senaryo 4 için ortalama % 3 fark olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5' deki veriler doğrultusunda taban kesme kuvveti değerleri arasında kusursuz çerçeve ile Senaryo 3 için ortalama % 4, kusursuz çerçeve ile Senaryo 4 için ortalama % 2 fark olduğu tespit edilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde tüm çerçevelerin performans eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu ve en iyi performansı kusursuz çerçevenin en kötü performansı ise Senaryo 3' ün sergilediği görülmüştür.

Şekil 10 incelendiğinde zemin, ikinci, üçüncü kat kolonlarında ve zemin, birinci, ikinci, üçüncü kat kirişlerinde plastik mafsallı oluşumu incelenmiştir. Zemin kat kolon ayaklarında plastik mafsallı oluşumu, hasar düzeyi açısından en ileri seviyededir. Tüm düzensiz çerçevelerdeki hasar performans düzeylerinin aynı olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü katta sol açıklıktaki kirişin sol ucunda ve sağ açıklıktaki kirişin sağ ucunda hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, zemin-birinci ve ikinci kat kirişlerinde hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, ikinci kattan orta açıklığındaki sağ kolonun üst ucunda hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde, üçüncü kattan orta açıklığındaki her iki kolonun üst uçlarında hasar IO (Immediate Occupancy) – LS (Life Safety) düzeyinde ve zemin kat kolon alt uçlarında hasar CP düzeyinden ileridedir. Tüm düzensiz çerçevelerde zemin kat kolon ayaklarında plastik mafsallı oluştuğundan dolayı çerçeve mekanizması gerçekleşmiştir.

Yapılan performans ve hasar performans düzeyi karşılaştırmaları neticesinde milimetre mertebesindeki geometrik ön kusurların çerçeve performansına olumsuz olarak minör düzeyde etkisi olduğu ve çelik çerçevelerin geometrik ön kusurları tolere ettiği tespit edilmiştir.

#### Kaynaklar

- TS EN 1090-2. (2018). Çelik ve alüminyum yapı uygulamaları- bölüm 2: Çelik yapılar için teknik gerekler. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 207 s.
- ÇYTHYDE. (2018). Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 246 s.
- EN 1090-2. (2018). Execution of steel structures and aluminium structures - part 2: Technical requirements for steel structures. European Standards, Brussels. 208 s.
- YÇİTŞ. (2007). Yapı çeliği işleri teknik şartnamesi. Türk Yapısal Çelik Derneği. Teknik Yayınlar Serisi – 3, İstanbul, Türkiye, 92 s.

- NSSS. (2020). National structural steelwork specification for building construction. 7th Edition. British Constructional Steelwork Association, London, United Kingdom. 131 s. ISBN 13: 978-1-85073-072-9.
- ANSI 303-16. (2016). Code of standard practice for steel buildings and bridges. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 82 s.
- Coleman, R., Ding, X., Rotter, J. M. (1992). Measurement of imperfections in full-scale steel silos. National Conference Publication - Institution of Engineers, Australia, 2(92 pt 7), 467-472.
- Gu, J., Chan, Siu-Lai. (2005). Second-order analysis and design of steel structures allowing for member and frame imperfections. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 62. 601 - 615, doi: 10.1002/nme.1182.
- Shayan, S., Rasmussen, K., Zhang, Hao. (2014). On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis. Journal of Constructional Steel Research. 98. 167-177, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.02.016.
- Altekin, M., Yükseler, R.F., (2007). İlk kusurlu dairesel plakları geometrik doğrusal olmayan analizi, 15. Ulusal Mekanik Kongresi, 3-7 Eylül 2007, Isparta, Türkiye, 77-86.
- Yaman, Z.D., Eryılmaz, D.M., Aktaş, M., Elmas M. (2009). Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde çelik eğilme elemanlarının geometrik kusurlarının tanımlanması, Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu, 1-2 Ekim 2009, Sakarya, 565-575.
- Aydın, E., Aktaş, M. (2011). İnce plakların burkulmasında geometrik kusurların etkisi. Engineering Science, 6(4), 1371- 1378, doi: 10.12739/nwsaes.v6i4.5000066949.
- Kala, Z. (2012). Geometrically non-linear finite element reliability analysis of steelplane frames with initial imperfections. Journal of Civil Engineering and Management, 18(1), 81-90, doi: 10.3846/13923730.2012.655306.
- Šmak, M., Straka, B. (2012). Geometrical and structural imperfections of steel member systems. Procedia Engineering. 40. 434 - 439, doi:10.1016/j.proeng.2012.07.121.
- Kala, Z. (2015) Reliability analysis of the lateral torsional buckling resistance and the ultimate limit state of steel beams with random imperfections, Journal of Civil Engineering and Management, 21(7), 902-911, doi: 10.3846/13923730.2014.971130.
- Chen, G., Zhang, H., Rasmussen, K., Fan, F. (2016). Modeling geometric imperfections for reticulated shell structures using random field theory. Engineering Structures. 126, 481-489, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.08.008.
- Zabojszcza, P., Radoń, U. (2019). The Impact of node location imperfections on the reliability of single-layer steel domes. Applied Sciences. 9, 2742, doi:10.3390/app9132742.
- Wang, J., Li, H., Fu, X., Li, Q. (2021). Geometric imperfections and ultimate capacity analysis of a steel lattice transmission tower. Journal of Constructional Steel Research. 183, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106734.
- Reference Manual. (2021). For SAP2000®, Etabs®, and Safe® Berkeley, California, USA.
- Wong, B.W. (2009). Plastic Analysis and Design of Steel Structures (1 st ed.), Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- Chan, S.L. and Chui, P.P.T. (2000) Non-Linear Static And Cyclic Analysis of Steel Frames With Semi-Rigid Connections, Elsevier Science.
- Lindeburg, M.R. and Baradar, M. (2001). Seismic Design of Building Structures : A Professional's Introduction to Earthquake Forces and Design Details (8th ed.), Professional Publications, Inc. Belmont.
- FEMA 356., 2000, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Reston, Virginia, USA.
- ASCE 41-06., 2007, Seismic Evaluation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- ASCE 41-13., 2014, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Building, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- ASCE 41-17., 2017, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Building, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- Sap2000., 2021, Structural Analysis and Design Program. Educational Version, V23, Computers & Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- EN 1993-1-1., 2014, Eurocode 3: Design of structures – Part 1-1: General rules and rules for building. European Committee for Standardization, Brussel.
- EN 10025-2., 2019, Hot rolled products of structural steels- Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. European Committee for Standardization, Brussel.