KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(2), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(2), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 29.12.2025
Kabul Tarihi :04.04.2026

Received Date : 29.12.2025
Accepted Date : 04.04.2026

DEPO RAFLARININ FARKLI DEPREM İVMELERİ ALTINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF WAREHOUSE RACKS UNDER DIFFERENT EARTHQUAKE ACCELERATIONS

Ali ÇELİK [1] (ORCID: 0009-0000-5202-0829)
Ahmad Reshad NOORI [1] (ORCID: 0000-0001-6232-6303)
Ahmed Mohammad Wasfi ALHASAN [*1] (ORCID: 0000-0002-8239-8299)

[1]İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Istanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmed Mohammad Wasfi ALHASAN, ahmetalhasan4@gmail.com

ÖZET

Depo raf sistemleri, ağır yük ve paletlerin depolanmasında kullanılan soğukta şekillendirilmiş ince cidarlı çelik profillerden üretilen taşıyıcı sistemlerdir. Deprem etkileri, sınırlı sünekliğe sahip bu sistemlerde performans analizi ve güvenli tasarımı kritik hâle getirmektedir. Bu çalışmada, örnek bir raf modülünde farklı sismik talep düzeylerinin ayak profili kapasitelerine etkisi incelenmiştir. AutoCAD'de hazırlanan ön model SAP2000'e aktarılmış; sistem davranışı lineer statik, modal ve modal davranış spektrum analizleriyle değerlendirilmiştir. Ayak profillerindeki kritik iç kuvvetler CFS yazılımına aktarılmış ve AISI S100-16/S1-18'e göre kesit dayanımı ile burkulma kontrolleri yapılmıştır. TBDY 2018 deprem parametreleri için; ANSI MH16.1, FEMA 460, BS EN 16681 ve BS EN 15512 ise raf sistemlerinin sismik değerlendirmesi ve genel tasarımı için esas alınmıştır. Sonuçlar, merkezi çaprazların yatay deplasmanları sınırlandırmasına rağmen, deprem tehlike düzeyi arttıkça ayak profillerindeki eksenel kuvvetlerin ve kapasite kullanım oranlarının belirgin biçimde yükseldiğini; özellikle yüksek sismisite bölgelerinde mevcut kesitin yetersiz kalabildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğukta şekillendirilmiş ince cidarlı kesitler, depo rafları, raf ayak profilleri, basınç çubukları

ABSTRACT

Storage rack systems are load-bearing systems used for storing heavy loads and pallets and manufactured from cold-formed thin-walled steel profiles. Earthquake effects make performance analysis and safe design critical in these limited-ductility systems. This study examines the effect of different seismic demand levels on the capacities of upright profiles in a representative rack module. The preliminary model prepared in AutoCAD was transferred to SAP2000, and the system behavior was evaluated through linear static, modal, and modal response spectrum analyses. The critical internal forces in the upright profiles were transferred to CFS software, and section strength and buckling checks were performed according to AISI S100-16/S1-18. TBDY 2018 was used for earthquake parameters, while ANSI MH16.1, FEMA 460, BS EN 16681, and BS EN 15512 were adopted for seismic evaluation and general design of rack systems. The results show that although concentrically braced members limit lateral displacements, axial forces and capacity utilization ratios in the upright profiles increase significantly as the earthquake hazard level increases, and the existing section may become insufficient especially in high-seismicity regions.

Keywords: Cold-formed thin-walled sections, storage rack systems, rack upright profiles, compression members

GİRİŞ

Depo raf sistemleri, ağır yüklerin ve paletlerin düzenli ve güvenli biçimde istiflenmesi amacıyla kullanılan; çoğunlukla soğukta şekillendirilmiş ince cidarlı çelik elemanlardan oluşan endüstriyel taşıyıcı sistemlerdir. Lojistik

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

hacmindeki artış ve depolama alanlarının daha etkin kullanılma gereksinimi, raf sistemlerinin yaygınlığını ve tasarım güvenliğini daha da önemli hâle getirmiştir (Allen, 2006; Yu, 1999). Bu bağlamda üretim/imalat süreçleri ve roll-form teknolojileri, kesit geometrisinin performans üzerindeki belirleyici rolünü vurgulayan temel unsurlar arasında yer almaktadır (Halmos, 2005; Livatyalı, 2006; Todd, Allen ve Alting, 1994).

Türkiye'nin deprem tehlikesinin bölgesel dağılımı AFAD (2023) tarafından haritalandırılmış olup, deprem etkileri altında raf sistemlerinin güvenliğinin değerlendirilmesi özellikle yanal deplasman kontrolü, rijitlik ve stabilite açısından kritik hâle gelmiştir. Deprem etkisi altındaki güvenli tasarımın ulusal çerçevesi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile tanımlanmakta; bu çerçeve, farklı deprem bölgelerinde oluşabilecek taleplerin dikkate alınmasını zorunlu kılmaktadır (TBDY, 2018). Sınırlı süneklik seviyesine sahip raf sistemlerinde stabilitenin sağlanması çoğunlukla merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle mümkün olmakla birlikte, yetersiz tasarım durumunda ayak profillerinde burkulma/yerel göçme mekanizmaları tetiklenerek devrilme veya çökme riskleri artabilmektedir (FEMA, 2005b).

Raf sistemlerinin tasarımında endüstriyel depolama raflarına özgü kurallar ANSI MH16.1 (2012) ve uygulama esasları SEMA (2010) gibi kaynaklarla tanımlanırken, ayarlanabilir paletli raf sistemleri için yapısal tasarım ilkeleri BS EN 15512 (2009) ve sismik tasarım gereklilikleri BS EN 16681 (2016) ile belirlenmiştir. Tolerans–deformasyon kriterleri EN 15620 (2008a), ekipman tanımları EN 15629 (2008b) ve kullanım–bakım esasları EN 15635 (2008c) ile standartlaştırılmıştır. Soğukta şekillendirilmiş çelik taşıyıcı elemanların tasarımında AISI S100-07 (2007) ve AISI S100-16 (2016) temel başvuru dokümanlarıdır. Çelik yapıların sismik hükümleri ANSI/AISC 341-16 (2016a) ve genel tasarım hükümleri ANSI/AISC 360-16 (2016b) kapsamında düzenlenirken, yükler ve yük kombinasyonları ASCE 7-10 (2013) ile netleştirilmiştir. Ulusal tasarım ve yapım esasları ÇYTHYE (2018) kapsamında da çelik yapı uygulamalarına ilişkin hükümler sunulmaktadır. Eurocode 3 çelik yapı tasarım hükümleri TS EN 1993-1-1 (2005) ve soğuk şekillendirilmiş elemanlara özgü TS EN 1993-1-3 (2006) ile tamamlayıcı bir standart çerçevesi oluşturmaktadır.

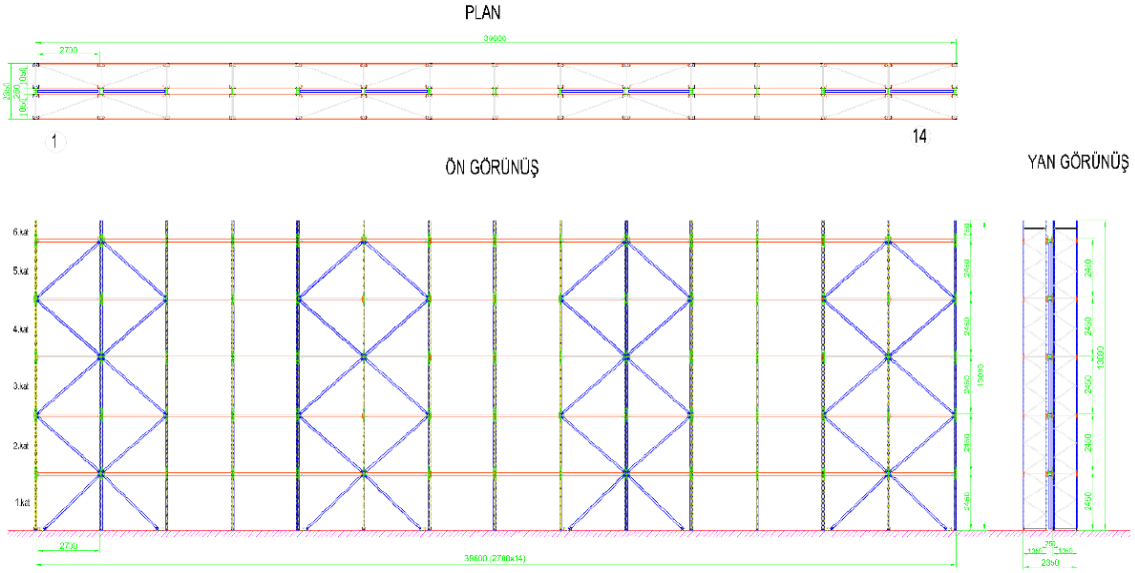
Literatürde deprem mühendisliğinin temel ilkeleri ve çelik yapı davranışı Celep ve Kumbasar (2000), Darılmaz (2019), Doğangün (2021) ve Deren vd. (2008) gibi kaynaklarda kapsamlı biçimde ele alınmıştır. Uygulamacı odaklı tasarım–konstrüksiyon yaklaşımı Eren (2007) tarafından sunulmuş; ahşap ve çelik elemanların temel prensipleri Odabaşı (1997) ve mukavemetin esasları Özbek (1998) ile desteklenmiştir. İnce cidarlı U profillerin eksantrik yük altındaki tek bulonlu bağlantı davranışı Demirel ve Tüylüoğlu (2019) tarafından incelenmiş; raf sistemlerinde dikme/ayak elemanlarının burkulma davranışı ve optimizasyonu Şenaysoy (2017) tarafından ayrıntılandırılmıştır. Soğukta şekillendirilmiş profillerin yapısal özellikleri Tunca vd. (2017) tarafından deneysel–sayısal olarak değerlendirilmiş; hafif çelik yapıların çağdaş uygulamaları Türker (2020) tarafından özetlenmiştir. Bağlantı elemanlarının yangın etkisi altındaki davranışı Yazıcı ve Koşatepe (2020) tarafından deneysel olarak incelenmiş; depolama raf sistemi elemanlarının deneysel–sayısal analizi ve kolon–kiriş birleşimleri için mekanik model önerisi Yazıcı (2022) tarafından geliştirilmiştir. Deprem performansının iyileştirilmesine yönelik tasarım önerileri Davidson ve McBride (2011) tarafından ortaya konmuş; benzer tartışmalar 9. Pasifik Deprem Mühendisliği Konferansı bildirilerinde de yer almaktadır (Pacific Conference on Earthquake Engineering, 2011). Doğrusal olmayan statik analiz yaklaşımlarının geliştirilmesine yönelik yöntemsel çerçeve FEMA (2005a) tarafından sunulmuş; ilgili yöntemlerin karşılaştırılması ve uygulamaları Karabulut (2011) ile Khoshnoudian ve Behmanesh (2010) tarafından tartışılmıştır. Çelik raf bağlantılarının deneysel sonuçlarına dayalı sismik performans değerlendirmesi Asawasongkram, Chomchuen ve Premthamkorn (2014) tarafından yapılmıştır. Ayrıca sektördeki endüstriyel raf çözümlerine ilişkin örnekler Asçelik DRS (2023) ve Rafex (2023) tarafından paylaşılmıştır.

Bu çalışmanın problemi; farklı deprem bölgelerinde aynı raf modülü için oluşan deprem taleplerinin, soğukta şekillendirilmiş ayak profillerinin taşıma gücü ve stabilitesi üzerindeki etkisinin yönetmelik/standart çerçevesinde karşılaştırmalı olarak yeterince ortaya konulamamasıdır. Bu kapsamda çalışma; farklı deprem bölgelerinde yer aldığı varsayılan örnek bir raf modülü üzerinde, statik ve sismik yüklerin ayak profili kapasitelerine etkisini karşılaştırmalı olarak incelemeyi amaçlamaktadır. AutoCAD ortamında oluşturulan ön model SAP2000 ortamına aktarılmış; sonlu elemanlar analiziyle elde edilen talepler, ilgili standart ve yönetmelik hükümleri doğrultusunda değerlendirilerek profil kesiti/şekli ve yönetmelik uyumunun taşıma kapasitesine etkileri sistematik biçimde tartışılmıştır. Bu çalışmanın literatüre özgün katkısı üç başlık altında özetlenebilir. İlk olarak, aynı geometriye ve aynı depolama senaryosuna sahip temsilî bir raf modülü, farklı sismik tehlike düzeylerine sahip üç yerleşim yeri için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci olarak, global sistem davranışı SAP2000 ile değerlendirilirken, ayak profillerinin kesit

bazındaki dayanım ve burkulma kontrolleri CFS yazılımı ile ayrıca ele alınmıştır. Üçüncü olarak, çalışma yalnızca toplam deplasmanları değil, ayak profillerinde oluşan eksenel kuvvet artışını, burkulma eğilimini ve kapasite kullanım oranlarını da karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Böylece farklı deprem talepleri altında raf ayaklarının kritik tasarım parametreleri daha açık biçimde belirlenmiştir.

YÖNETMELİKLER VE ANALİZ

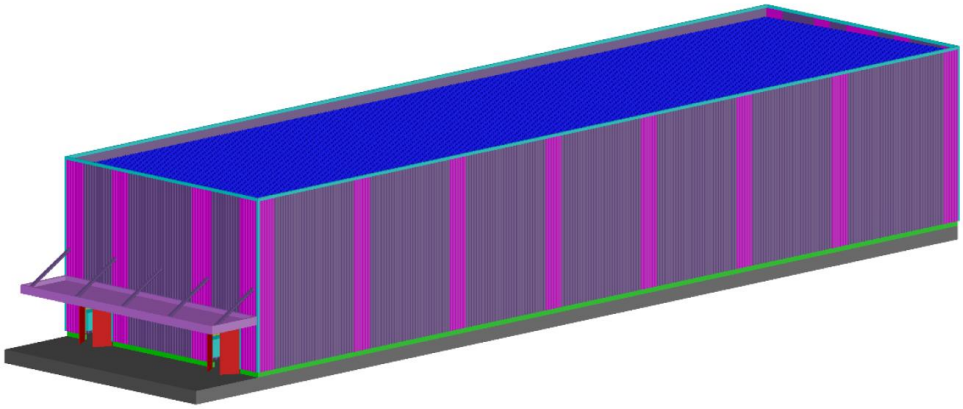
Bu çalışmada, soğukta şekillendirilmiş çelik profillerden oluşan depo raf sistemlerinin statik ve sismik yükler altındaki yapısal davranışı incelenmiştir. Analizler SAP2000 v22.2.0 yazılımında (Computers and Structures, Inc., 2020), sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Raf sistemi, her katta üç paletin yer aldığı 14 açıklık ve beş kattan oluşmakta; X ekseninde 39,6 m, Y ekseninde 2,35 m ve Z ekseninde 13 m boyutlarındadır. Üniteler sırt sırta bağlanmış çiftli modül şeklindedir. İlk kat travers yüksekliği 2,45 m olup diğer katlar aynı seviyededir. Analizlerde sistemin içerisinden sadece bir tek sıra dikkate alınmıştır; tekli sıra ise değerlendirme dışında bırakılmıştır.



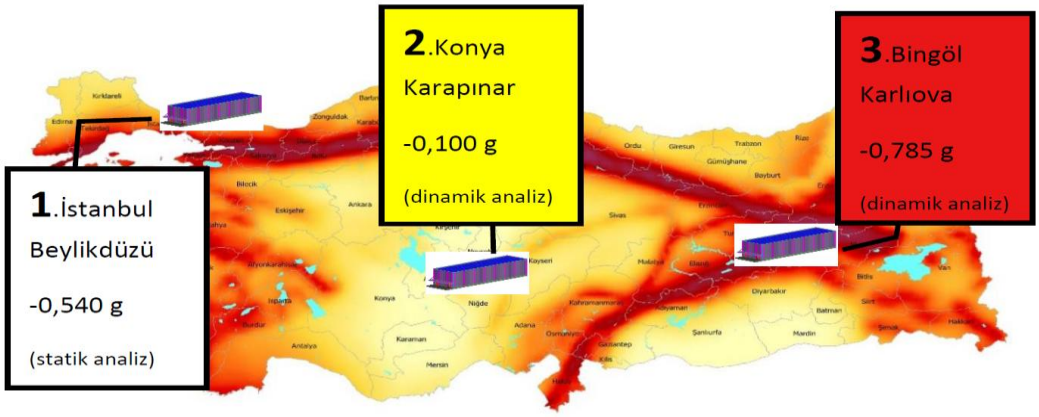
Şekil 1. Raflara Ait Plan Ve Kesit

Bu analiz kapsamında, aynı teknik özelliklere sahip depo raf sisteminin ayak profillerine gelen etkiler ve bu profillerin kapasiteleri, üç farklı durum için (İstanbul/Beylikdüzü referans durumu, Konya/Karapınar ve Bingöl/Karlıova) incelenmiştir. Her bir durum için statik ve sismik analizler ayrı ayrı yürütülmüştür. Bu çalışmada düşey yükler için lineer statik analiz, sistemin doğal titreşim özelliklerinin belirlenmesi için modal analiz ve deprem etkilerinin belirlenmesi için ise modal davranış spektrum analizi kullanılmıştır. Sismik etkiler SAP2000 ortamında X ve Y doğrultularında tanımlanmış; depremli yük birleşimlerinde iki doğrultunun birlikte etkisi ana doğrultunun %100'ü ve dik doğrultunun %30'u esas alınarak dikkate alınmıştır. Statik analizler düşey yükler altında ayak profillerinde oluşan eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve moment taleplerini belirlemek amacıyla, sismik analizler ise deprem etkisi altında oluşan ek yatay yüklerin kat kesme kuvvetleri, mesnet reaksiyonları, devrilme momentleri ve ayak profili talepleri üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Analiz süreci; (i) geometrik modelin oluşturulması, (ii) malzeme ve kesit tanımlamalarının yapılması, (iii) düşey yüklerin atanması, (iv) deprem parametrelerinin tanımlanması, (v) yük kombinasyonlarının oluşturulması, (vi) SAP2000 ile global sistem çözümünün yapılması ve (vii) kritik iç kuvvetlerin CFS ortamında kapasite kontrolüne tabi tutulması adımlarından oluşmaktadır.

Tasarıma ait özel kesitlerin özellikleri belirlenmiş ve bu soğukta şekillendirilmiş kesitler, SAP2000'de doğrudan bulunmadığı için section designer modülüyle tanımlanmıştır. Yükleme öncesi elde edilen bu özellikler CFS programı ile de karşılaştırılmıştır. Analiz sürecinde önce SAP2000 ile global sistem çözümü yapılarak ayak profillerinde oluşan kritik iç kuvvetler belirlenmiş, ardından bu iç kuvvetler CFS yazılımına (RSG Software, n.d.) aktarılarak AISI S100-16/S1-18 kapsamında kesit dayanımı, net kesit etkileri ve burkulma kapasiteleri kontrol edilmiştir. Böylece sistem düzeyi davranış ile kesit düzeyi dayanım değerlendirmesi birlikte ele alınmıştır. Sistem tasarımında ayak profilleri S355, diğer tüm elemanlar ise S235 çeliğinden seçilmiş; elastisite modülü ise E=210.000 N/mm² olarak alınmıştır (ÇYTHYE, 2018).



Şekil 2. Raf Kurulumunun Yapılacağı Varsayılan Depo Modeli



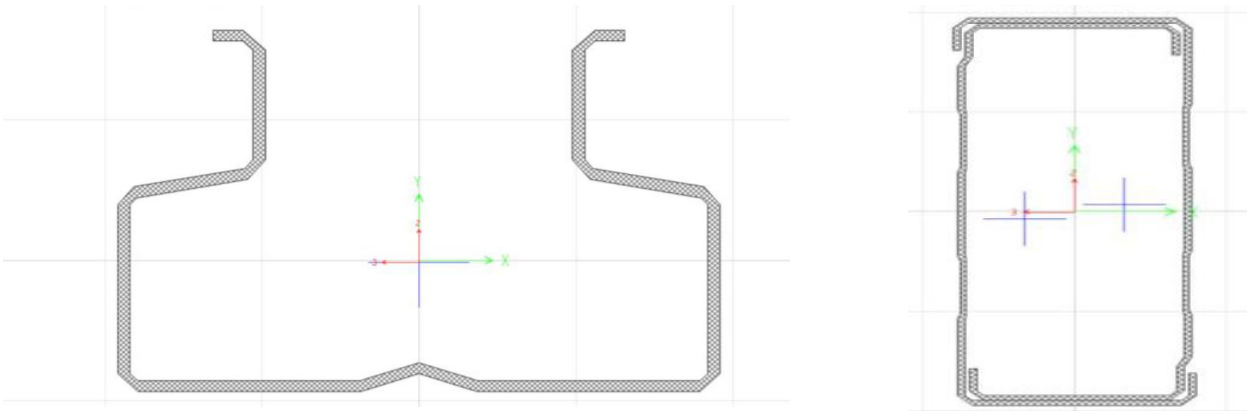
Şekil 3. Deprem Bölgeleri Harita Görseli (AFAD, 2023)

Tablo 1. Tasarımda Kullanılan Kesitler

Kesit	Boyu (mm)	Kesiti (mm)	Malzeme
Ayak Profili	13000	120Ω-T=2,5 mm	S355
Diyagoneller	960–1140	30x50x1,5 KP	S235
Travers	2700	CC120x1,5	S235
Ayak Ara Bağlantı	250	80x80x5 KP	S235
Yatay Deprem Gerdirmesi	2720	C30x40x1,5	S235
Düşey Deprem Gerdirmesi	3560	80x80x5 KP	S235

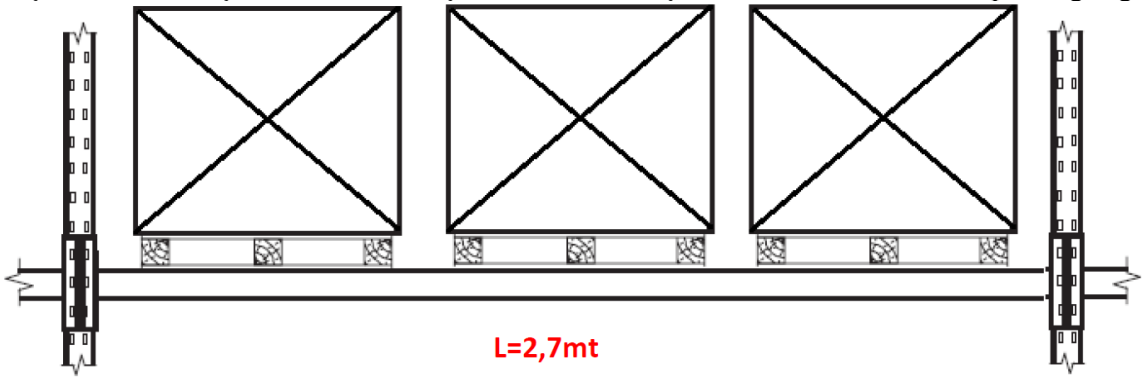
Bu çalışmada ayak profili olarak TS EN 10346 standardına uygun galvanizli çelikten üretilmiş, 120Ω–T=2,5 mm geometrisine sahip soğukta şekillendirilmiş omega kesit kullanılmıştır. Kesit özellikleri SAP2000 ve CFS ortamında bu profil esas alınarak tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri olarak elastisite modülü E = 210.000 MPa, Poisson oranı ν = 0.3 ve akma sınırı fy = 355 MPa alınmıştır. SAP2000 ve CFS yazılımları ile ön tanımlamalar ve mukavemet hesapları gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5'te verilen yükleme şeması doğrultusunda, palet yükleri analiz modelinde travers elemanlarına eşdeğer yayılı yük olarak tanımlanmıştır. Bu amaçla palet ağırlığı, kat yerleşimi ve yük aktarım düzeni birlikte değerlendirilmiş ve her bir travers için q = 3,27 kN/m yayılı yük değeri esas alınmıştır. Bu kabul, depolanan yüklerin raf sistemi içerisinde düzenli dağıldığı varsayımına dayanmakta olup, düşey yük etkilerinin global yapısal analizde temsil edilmesi için uygun bir idealizasyon sunmaktadır.



Şekil 4: Ayak Profili Ve Travers

Sistem, 14 açıklık ve 5 katlı çiftli modülden oluşmaktadır. Palet ölçüsü: 800x1200x2100 mm, palet ağırlığı: 600 kg.



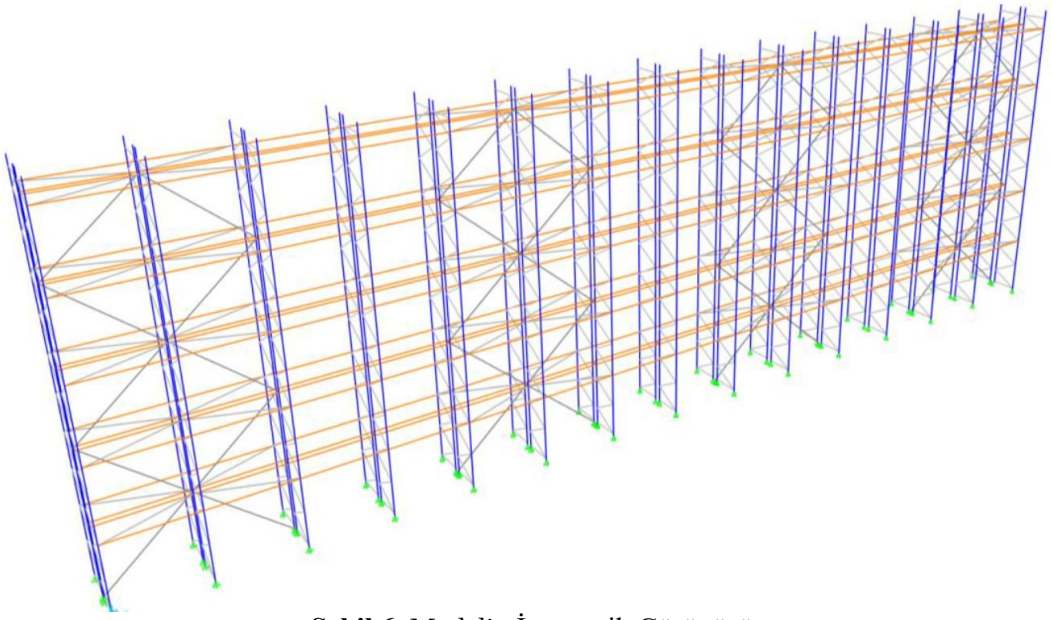
Şekil 5. Bir Raf Katının Yüklenme Şematiği

Alt ayaklar ankastre, üst bağlantılar ise yarı rijit olarak tanımlanmıştır. SAP2000 yazılımında analizler lineer statik ve modal yöntemlerle gerçekleştirilmiş; ayak profilleri frame elemanları, çaprazlar ise truss elemanları olarak modellenmiştir.

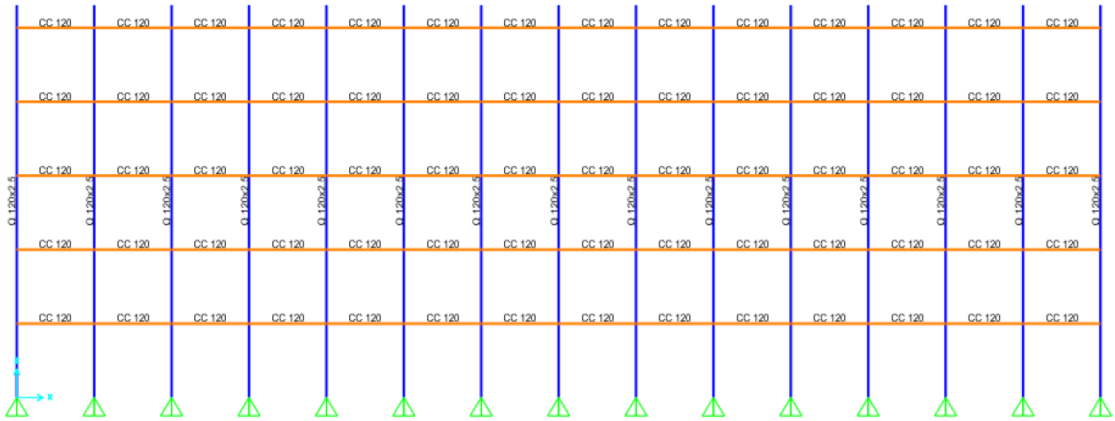
Modelleme aşamasında, ayak profilleri ve traversler çerçeve (frame) elemanlar, düşey ve yatay çaprazlar ise yalnızca eksenel kuvvet taşıyan çubuk (truss) elemanlar olarak tanımlanmıştır. Alt ayak uçları ankastre kabul edilmiş, üst seviyedeki bağlantılar yarı rijit olarak modellenmiştir. Travers uçlarına moment aktarımını sınırlamak amacıyla mafsal atamaları yapılmış; bu kabul, raf sistemlerinde bağlantı bölgelerinin tam rijit davranmamasını temsil etmek amacıyla benimsenmiştir. Yapı sisteminin sırt sırta bağlanan çiftli modül davranışı esas alınmış ve geometrik tekrarın yüksek olması nedeniyle analizlerde temsilî bir tek sıra üzerinde çözüm yapılmıştır. Alt ayak uçlarının ankastre kabul edilmesi, raf ayaklarının taban plakası ve ankraj bağlantıları aracılığıyla döşemeye bağlanması sonucu oluşan dönme kısıtının ilk yaklaşım olarak temsil edilmesi amacıyla benimsenmiştir. Gerçekte bu bağlantılar tam ankastre davranış göstermeyip belirli bir yarı rijitlik sergileyebilir. Bununla birlikte, bu çalışmada amaç farklı sismik talep düzeylerinin aynı raf sistemi üzerindeki göreli etkisini karşılaştırmak olduğundan, tüm durumlar için aynı mesnet kabulü korunmuştur. Böylece bölgeler arası karşılaştırma tutarlı bir modelleme yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Şekil 8'de verilen travers mafsal kabulleri ile Şekil 9–11'de gösterilen çapraz sistem tanımları, metinde açıklanan frame/truss modelleme yaklaşımıyla uyumlu olacak şekilde SAP2000 modeline aynen aktarılmıştır.

İstanbul/Beylikdüzü bu çalışmada deprem etkilerinden arındırılmış referans durum olarak ele alınmıştır. Bu nedenle Tablo 2'de bu durum için spektral deprem parametreleri verilmemiş; Konya/Karapınar ve Bingöl/Karlıova ise sismik karşılaştırma yapılan bölgeler olarak değerlendirilmiştir. Yükleme düzeninde D, sistem öz-ağırlığını ve diğer sabit yükleri; P, paletlerden kaynaklanan depolama yükünü; Ex ve Ey ise deprem etkilerinin X ve Y doğrultularındaki bileşenlerini ifade etmektedir. Palet yükleri traverslere eşdeğer yayılı yük olarak aktarılmış ve her bir travers için q = 3,27 kN/m yayılı yük değeri esas alınmıştır. Yük kombinasyonları oluşturulurken ANSI MH16.1, FEMA 460 ve TBDY 2018'de yer alan depremli ve depremsiz tasarım ilkeleri esas alınmış; deprem etkilerinin iki doğrultuda birlikte değerlendirilmesi için ana doğrultunun %100'ü ile buna dik doğrultunun %30'u dikkate alınmıştır. Tablo 2'de verilen deprem parametreleri, AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritası ve TBDY 2018 esas alınarak, sismik

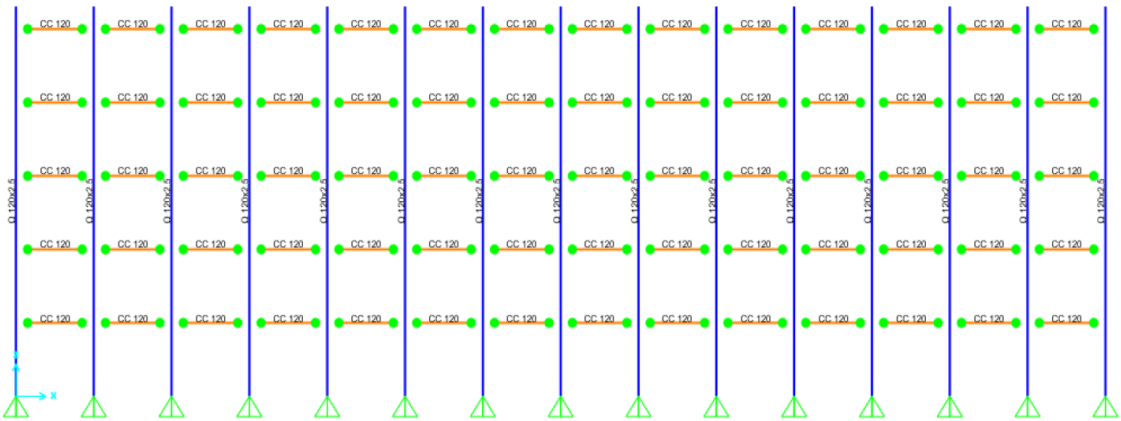
karşılaştırma yapılan yerleşim yerlerinin koordinatları ve ZD zemin sınıfı için elde edilmiştir. Ss, S1, PGA, SDS ve SD1 değerleri Konya/Karapınar ve Bingöl/Karlıova için ayrı ayrı belirlenmiş ve SAP2000 modelinde deprem yüklerinin tanımlanmasında kullanılmıştır.



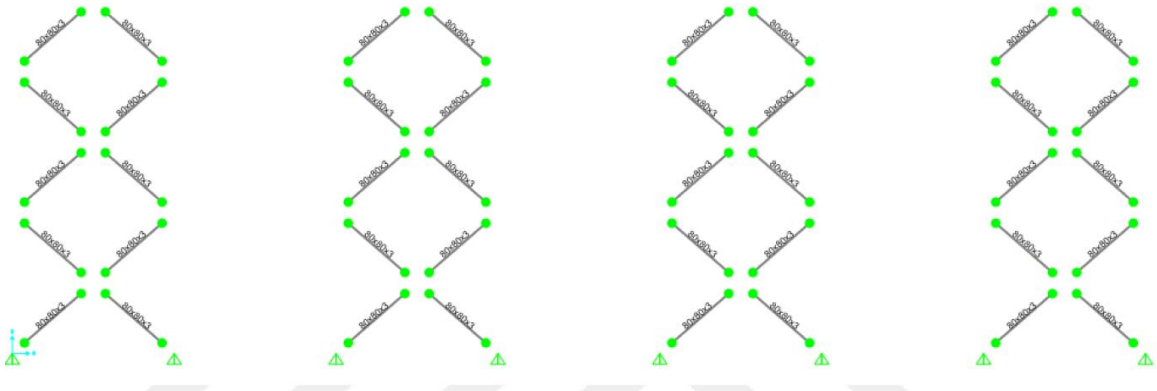
Şekil 6. Modelin İzometrik Görünüşü



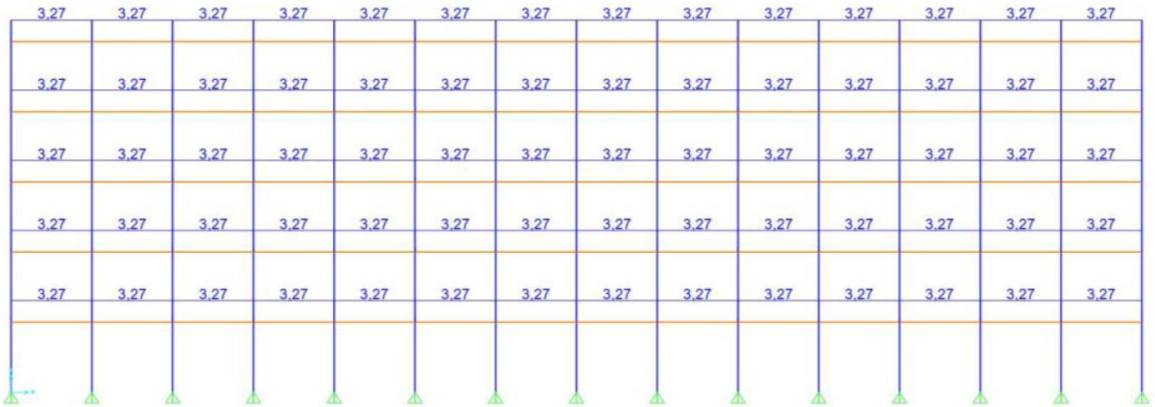
Şekil 7. Modelin Ön Görünüşü



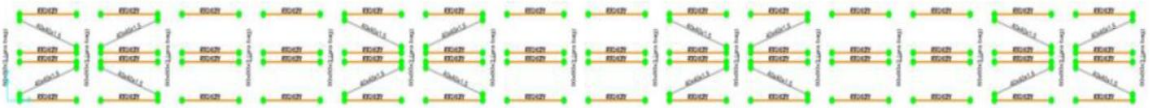
Şekil 8. Traverslere Mafsal Atanması



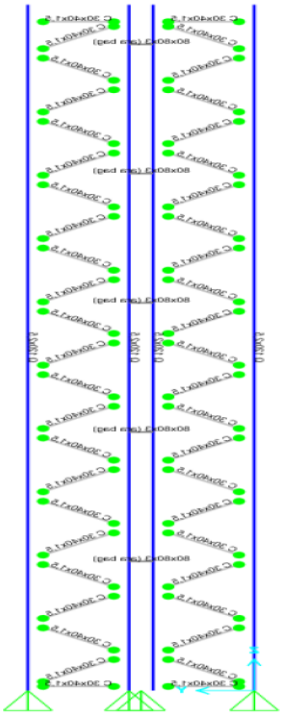
Şekil 9. Düşey Deprem Gerdirmelerinin Görünüşü



Şekil 10. Yük Atamalarının Grafiksel Görünüşü



Şekil 11. Yatay Çaprazların Görünüşü



Şekil 12. Diyagonellerin Görünüşü.

Tablo 2. Referans Durum Ve Sismik Karşılaştırma Yapılan Bölgeler İçin Deprem Parametreleri (PGA, SDS Ve SD1 Değerleri)

Parametre	Referans Durum (İstanbul/Beylikdüzü)	2.Bölge	3.Bölge
Deprem Yer Hareketleri Düzeyi (DD_)	-	DD-2	DD-2
Zemin Sınıfı (Z_)	ZD	ZD	ZD
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz] (Ss)	-	0,231	1,932
1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz] (S1)	-	0,056	0,509
En büyük yer ivmesi [g] (PGA)	-	0,100	0,785
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz] (SDS)	-	0,370	1,932
1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı [boyutsuz] (SD1)	-	0,134	0,912
Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	-	3	3
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	-	3	1
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	-	7	6
Tasarım Yaklaşımı	YDKT	YDKT	YDKT
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R)	-	4	4
Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	-	2	2
Bina Önem Katsayısı (I)	1	1	1
Kütle Katılım Katsayısı	0,67	0,67	0,67
Süneklik Düzeyi ve Çerçeve Şekli	-	D1	D1
Fazlalık faktörü (Redundancy Factor) (ANSIMH16 – 2.6.2.1)	-	1,3	1,3
Diyafram Türü	yok	yok	yok
Bölge Koordinatları	-	37,70 - 33,50	39,30 - 41,00

Deprem Spektrumunun Tanımı Ve SAP2000'de Uygulanması

Bu çalışmada deprem etkisi, TBDY 2018'de DD-2 deprem yer hareketi düzeyi ve ZD zemin sınıfı için tanımlanan yatay elastik tasarım spektrumu esas alınarak modal davranış spektrum analizi ile hesaba katılmıştır. SAP2000'de her bir sismik karşılaştırma bölgesi için ayrı bir response spectrum function tanımlanmış; spektrum ordinatları, ilgili yerleşim yerine ait kısa periyot ve 1,0 saniye periyoda karşılık gelen tasarım spektral ivme katsayıları (SDS ve SD1) esas alınarak oluşturulmuştur. Analizlerde kritik sönüm oranı %5 olarak kabul edilmiştir. Böylece yapının doğal titreşim periyotlarına karşılık gelen modal ivme talepleri doğrudan spektrum üzerinden belirlenmiştir. Deprem etkileri X ve Y doğrultularında ayrı ayrı tanımlanmış, modal katkılar SAP2000'de spektrum fonksiyonu üzerinden elde edilmiş ve depremli yük birleşimlerinde iki doğrultunun birlikte etkisi ana doğrultunun %100'ü ve buna dik doğrultunun %30'u esas alınarak dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım, çalışmada kullanılan sismik talep tanımının TBDY 2018 ile doğrudan uyumlu olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Referans Durum (İstanbul/Beylikdüzü) İçin Kullanılan Yük Kombinasyonları

Yük Adı	Kombinasyon
Statik	1D + 1P
RMI-1	1,4D + 1,2P
RMI-2	1,2D + 1,4P
RMI-3	1,2D + 0,85P
RMI-5	1,2D
RMI-6	0,9D
RMI-8	1,2D + 1,4P + 1,4I

Tablo 4. 2.Bölgenin Yaygın Kullanılan RMI Yük Kombinasyonları

Yük Adı	Kombinasyon
Statik	1D + 1P
RMI-1	1,4D + 1,2P
RMI-2	1,2D + 1,4P
RMI-3	1,2D + 0,85P
RMI-5A	1,28D + 0,9P + 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-5B	1,28D + 0,9P + 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-5C	1,28D + 0,9P – 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-5D	1,28D + 0,9P – 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-5E	1,28D + 0,9P + 1,3Ey + 0,3Ex
RMI-5F	1,28D + 0,9P + 1,3Ey – 0,3Ex
RMI-5G	1,28D + 0,9P – 1,3Ey – 0,3Ex
RMI-5H	1,28D + 0,9P – 1,3Ey + 0,3Ex
RMI-6	0,9D + 0,9Papp
RMI-7A	0,83D + 0,58Papp + 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-7B	0,83D + 0,58Papp + 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-7C	0,83D + 0,58Papp – 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-7D	0,83D + 0,58Papp – 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-7E	0,83D + 0,58Papp + 1,3Ey + 0,3Ex
RMI-7F	0,83D + 0,58Papp + 1,3Ey – 0,3Ex
RMI-7G	0,83D + 0,58Papp – 1,3Ey – 0,3Ex
RMI-7H	0,83D + 0,58Papp – 1,3Ey + 0,3Ex
RMI-8	1,2D + 1,4P + 1,4I

Tablo 5. 3.Bölgenin Yaygın Kullanılan RMI Yük Kombinasyonları

Yük Adı	Kombinasyon
Statik	1D + 1P
RMI-1	1,4D + 1,2P
RMI-2	1,2D + 1,4P
RMI-3	1,2D + 0,85P
RMI-5A	1,59D + 1,12P + 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-5B	1,59D + 1,12P + 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-5C	1,59D + 1,12P – 1,3Ex – 0,3Ey
RMI-5D	1,59D + 1,12P – 1,3Ex + 0,3Ey
RMI-5E	1,59D + 1,12P + 1,3Ey + 0,3Ex
RMI-5F	1,59D + 1,12P + 1,3Ey – 0,3Ex

Bu çalışmada kullanılan yük kombinasyonu mantığı tekildir ve tüm bölgeler için aynıdır. Tablo 3–5'te kombinasyonların ayrı tablolar halinde sunulmasının amacı, bölgeler için farklı bir tasarım yaklaşımı tanımlamak değil, aynı LRFD/RMI kombinasyon yapısının değişen sismik parametreler altında aldığı sayısal biçimi açık biçimde göstermektir. Kombinasyonların yönetmeliksel temeli ANSI MH16.1, FEMA 460 ve TBDY 2018'de tanımlanan aynı yük birleşim kurallarına dayanmaktadır. Bölgeler arasında değişen tek unsur, AFAD–TBDY 2018 verilerinden türetilen Ex ve Ey deprem etkilerinin büyüklüğüdür. Dolayısıyla karşılaştırmanın odağı farklı kombinasyon şemaları değil, aynı kombinasyon mantığının farklı sismik tehlike düzeylerinde ayak profillerine yansıttığı iç kuvvet ve kapasite talepleridir. İstanbul/Beylikdüzü ise bu çerçevede deprem etkilerinden arındırılmış referans durum olarak ele alınmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, aynı ayak profiline sahip temsilî depo raf sisteminin farklı sismik talep düzeyleri altındaki davranışı SAP2000 yazılımı ile analiz edilmiş; elde edilen kritik iç kuvvetler daha sonra CFS ortamında kapasite açısından

değerlendirilmiştir. Analizlerde, sistemin deplasmanları, burkulma modları ve kritik yükleri ayrıntılı olarak değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular tablolar ve şekillerle sunulmuştur.

Tablo 6. Sistemin Doğal Titreşim Periyot Tablosu Ve Frekans Değerleri

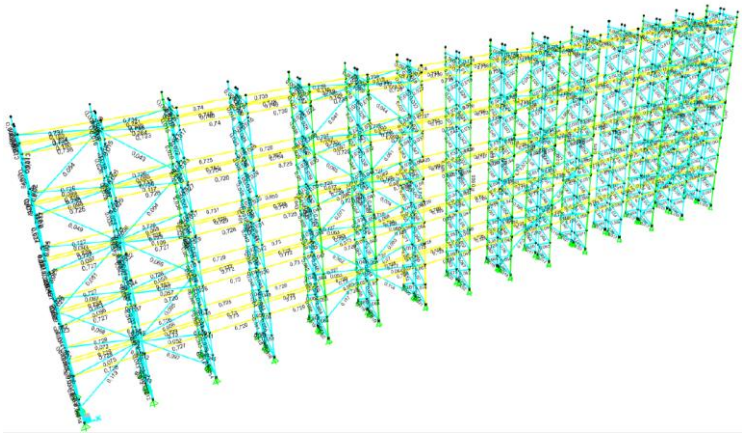
Çıktı Durumu	Adım Türü	Adım No	Periyot (sn)	Toplam UX	Toplam UY	Frekans (devir/sn)	Frekans (rad/sn)
MODAL	Mod	1	0,654	0,000	0,561	1,529	9,604
MODAL	Mod	2	0,637	0,000	0,561	1,569	9,859
MODAL	Mod	3	0,603	0,000	0,561	1,658	10,418
MODAL	Mod	4	0,602	0,000	0,731	1,660	10,431
MODAL	Mod	5	0,547	0,000	0,731	1,830	11,496
MODAL	Mod	6	0,509	0,000	0,733	1,966	12,350
MODAL	Mod	7	0,491	0,000	0,733	2,038	12,802
MODAL	Mod	8	0,483	0,000	0,734	2,071	13,015
MODAL	Mod	9	0,348	0,747	0,734	2,874	18,061
MODAL	Mod	10	0,287	0,747	0,735	3,479	21,860
MODAL	Mod	11	0,223	0,747	0,735	4,481	28,156
MODAL	Mod	12	0,215	0,747	0,736	4,652	29,227
MODAL	Mod	13	0,186	0,747	0,736	5,372	33,755
MODAL	Mod	14	0,180	0,747	0,877	5,564	34,958
MODAL	Mod	15	0,179	0,747	0,877	5,582	35,073
MODAL	Mod	16	0,176	0,747	0,905	5,674	35,651
MODAL	Mod	17	0,175	0,747	0,905	5,707	35,855
MODAL	Mod	18	0,175	0,747	0,910	5,727	35,986
MODAL	Mod	19	0,173	0,747	0,925	5,795	36,414
MODAL	Mod	20	0,166	0,747	0,925	6,016	37,799
MODAL	Mod	21	0,152	0,747	0,931	6,577	41,322
MODAL	Mod	22	0,136	0,747	0,931	7,341	46,123
MODAL	Mod	23	0,135	0,905	0,931	7,413	46,580
MODAL	Mod	24	0,134	0,905	0,931	7,457	46,854
MODAL	Mod	25	0,133	0,905	0,931	7,502	47,134
MODAL	Mod	26	0,133	0,905	0,942	7,536	47,349
MODAL	Mod	27	0,128	0,905	0,942	7,785	48,912
MODAL	Mod	28	0,128	0,905	0,942	7,788	48,932
MODAL	Mod	29	0,109	0,905	0,942	9,201	57,812
MODAL	Mod	30	0,108	0,905	0,942	9,227	57,975
MODAL	Mod	31	0,107	0,905	0,943	9,322	58,572
MODAL	Mod	32	0,105	0,905	0,943	9,500	61,690
MODAL	Mod	33	0,102	0,905	0,972	9,828	61,754
MODAL	Mod	34	0,101	0,905	0,972	9,854	61,917
MODAL	Mod	35	0,101	0,905	0,972	9,860	61,954
MODAL	Mod	36	0,101	0,905	0,972	9,897	62,186
MODAL	Mod	37	0,101	0,905	0,973	9,916	62,302
MODAL	Mod	38	0,101	0,905	0,973	9,919	62,324
MODAL	Mod	39	0,100	0,905	0,973	9,953	62,538
MODAL	Mod	40	0,100	0,905	0,973	9,970	62,645
MODAL	Mod	41	0,099	0,905	0,973	10,059	63,200
MODAL	Mod	42	0,099	0,949	0,973	10,133	63,671
MODAL	Mod	43	0,098	0,949	0,974	10,214	64,177
MODAL	Mod	44	0,093	0,949	0,974	10,772	64,685
MODAL	Mod	45	0,089	0,952	0,974	11,278	70,862

Modal analiz sonuçlarına göre, TBDY 4.8.1.2'de öngörülen kümülatif kütle katılım oranı şartı sağlanmıştır. Kümülatif kütle katılımı UY doğrultusunda 33. modda %97,2 seviyesine, UX doğrultusunda ise 45. modda %95,2 seviyesine ulaşmıştır. İlk modlar ağırlıklı olarak Y doğrultusunda baskın translasyonel davranış üretirken, X doğrultusundaki baskın translasyonel katılım daha ileri modlarda belirgin hale gelmektedir. Özellikle 1. mod çevresindeki davranış Y yönündeki görece esnekliği, 9. mod civarında belirginleşen katılım ise X doğrultusundaki sistem tepkisini temsil etmektedir. Bu durum, raf sisteminin Y doğrultusunda daha esnek; çaprazlı X doğrultusunda ise daha rijit davrandığını göstermektedir. Bununla birlikte, çaprazlı doğrultudaki daha yüksek rijitlik, deprem etkisi altında daha büyük kat kesme kuvvetlerinin bu doğrultuda toplanmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla modal analiz

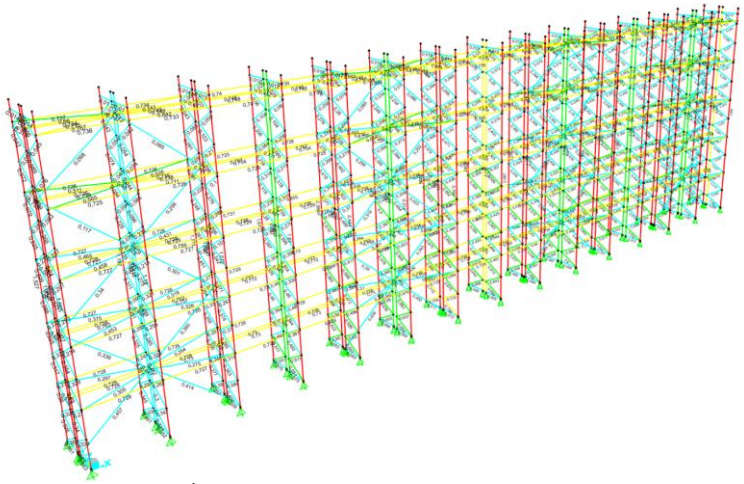
sonuçları yalnızca doğal periyotları değil, aynı zamanda sistemin yönsel yük aktarım mekanizmasını ve dinamik karakterini de açıklamaktadır.

Tablo 6'da görülen hâkim periyotların yaklaşık 0,60–0,65 s bandında yoğunlaşması, yapının deprem talebinin spektrumun orta periyot bölgesindeki ordinatlar tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Bu periyot aralığında Bingöl/Karlıova için elde edilen spektral ivme talepleri Konya/Karapınar'a göre belirgin biçimde daha yüksektir. Bu nedenle aynı raf geometrisi ve aynı depolama senaryosu altında Bingöl durumu daha büyük taban kesme kuvvetleri, daha yüksek devrilme etkileri ve ayak profillerinde daha büyük eksenel basınç talepleri üretmiştir. Bu değerlendirme, yapısal talebin yalnızca PGA değeri ile değil, yapı periyodu ile ilişkili spektral ivme düzeyi üzerinden de yorumlanması gerektiğini göstermektedir.

Yapılan kesit kontrolleri sonucunda, referans durum (İstanbul/Beylikdüzü) ile Konya/Karapınar için ayak profillerinin kapasite sınırları içerisinde kaldığı; buna karşılık Bingöl/Karlıova için tanımlanan yüksek sismik talepler altında özellikle ayak profillerinde kapasite sınırlarının aşıldığı belirlenmiştir.



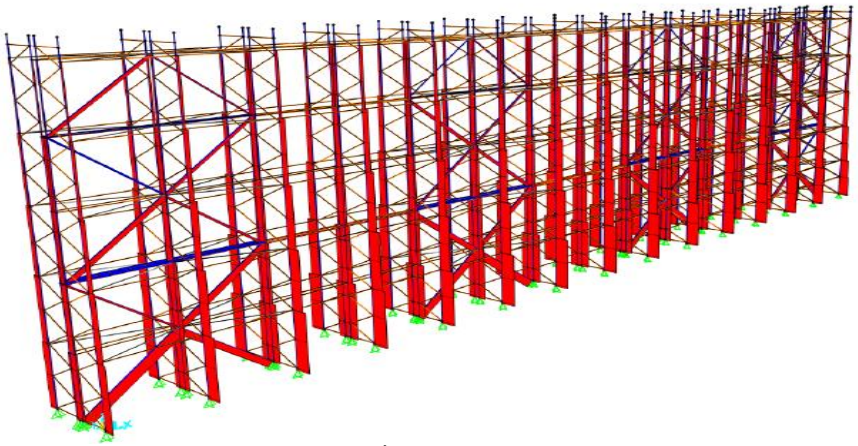
Şekil 13. 2.Bölge İçin Kesitlere Ait Kapasite Oranları Gösteren SAP2000 Çıktıları (Konya)



Şekil 14. 3.Bölge İçin Kesitlere Ait Kapasite Oranları (Bingöl)

Ayak profillerine etki eden iç kuvvetlerin değerlendirilmesi sonucunda, kapasite oranlarının özellikle Bingöl bölgesinde aşıldığı belirlenmiştir. Eksenel kuvvetler açısından, referans durumda (İstanbul/Beylikdüzü) ayak profillerinde yaklaşık 65 kN, Bingöl/Karlıova için ise yaklaşık 268 kN değerlerine ulaşılmıştır.

Katlara gelen kesme yükleri incelendiğinde, hakim periyot y yönünde olmasına rağmen çaprazlı yönün deprem kuvvetini daha fazla aldığı gözlemlenmiştir. Bir önceki grafikte, kat kesme kuvvetlerinin X yönünde, Y yönüne göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 15. Ayaklara Gelen İç Kuvvetlerin Grafiksel Gösterimi

Eleman Kuvvetleri – Çerçeveler (Referans Durum Maksimum Ayak İç Kuvvetleri) (SAP2000 Çıktıları)

Tablo 7. Referans Durum (İstanbul/Beylikdüzü) İçin Maksimum Ayak İç Eksenel Kuvvetler

Çerçeve	Çıkış Durumu	Kombinasyon Türü	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN-m)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
F316	RMI-2	Kombinasyon	-64,55	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F316	RMI-8	Kombinasyon	-64,55	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31E	RMI-2	Kombinasyon	-64,55	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31E	RMI-8	Kombinasyon	-64,55	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F316	RMI-2	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F316	RMI-8	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31A	RMI-2	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31A	RMI-8	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31E	RMI-2	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31E	RMI-8	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F348	RMI-2	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F348	RMI-8	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31A	RMI-2	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
F31A	RMI-8	Kombinasyon	-64,54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablo 8. 2.Bölge İçin Maksimum Eksenel Kuvvetler (Konya)

Çerçeve	Çıkış Durumu	Kombinasyon Türü	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN-m)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
F319	RMI-5E	Kombinasyon	-71,76	-2,48	-0,01	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5F	Kombinasyon	-71,76	-2,48	-0,01	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5G	Kombinasyon	-71,76	-2,48	-0,01	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5H	Kombinasyon	-71,76	-2,48	-0,01	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5E	Kombinasyon	-71,76	-2,48	0,00	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5F	Kombinasyon	-71,76	-2,48	0,00	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5G	Kombinasyon	-71,76	-2,48	0,00	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5H	Kombinasyon	-71,76	-2,48	0,00	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5E	Kombinasyon	-71,75	-2,48	-0,01	0,00	0,00	-0,21
F319	RMI-5F	Kombinasyon	-71,75	-2,48	-0,01	0,00	0,00	-0,21
F319	RMI-5G	Kombinasyon	-71,75	-2,48	-0,01	0,00	0,00	-0,21
F319	RMI-5H	Kombinasyon	-71,75	-2,48	-0,01	0,00	0,00	-0,21
F31B	RMI-5E	Kombinasyon	-71,75	-2,48	0,00	0,00	0,00	-0,21

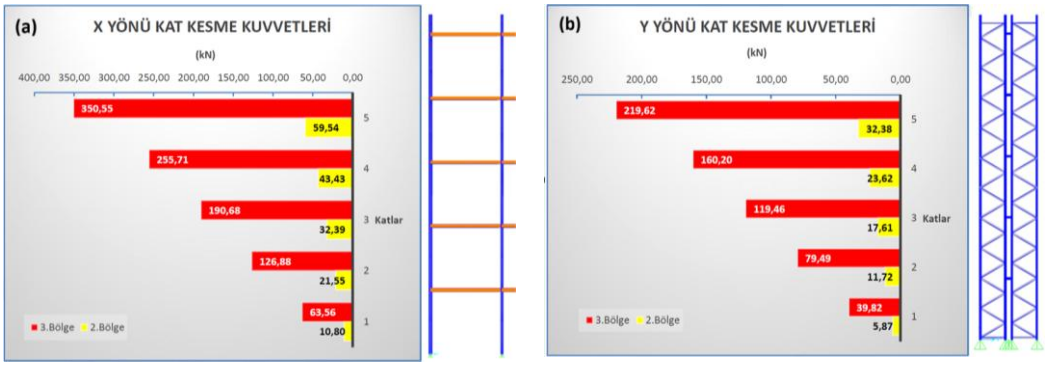
Yüklerin Profil Elemanlarına Dağılımı Ve Karşılaştırmalı Değerlendirme

Bu bölümde, deprem etkileri altında tipik bir raf kolonunun yapısal tepkisini değerlendirmek amacıyla CFS programı ile parametrik analizler yapılmıştır. Hesaplamalarda burkulma boyları x doğrultusunda Lx = 1,20 m, y doğrultusunda Ly = 2,45 m ve burulma boyu Lt = 1,20 m olarak alınmıştır. Yük kombinasyonları arasından en yüksek eksenel

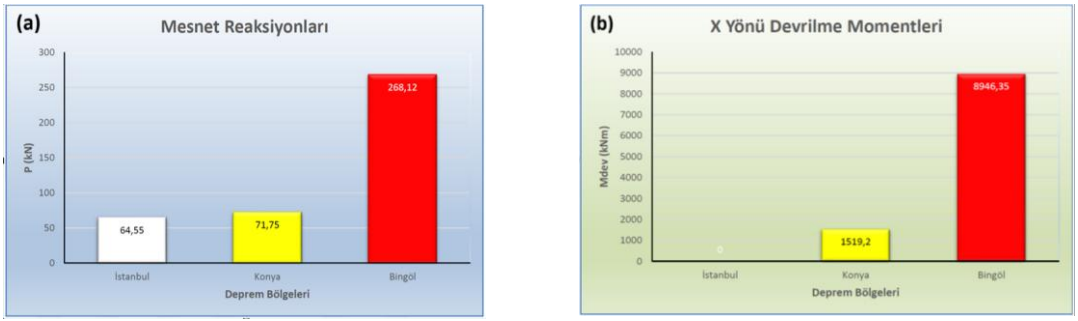
kuvveti oluşturan durum seçilerek profil davranışı bu senaryo üzerinden incelenmiştir. Analizlerde, S355 kalitesinde yüksek mukavemetli çelik kullanılmış ve malzeme tanımlamaları yönetmeliklere uygun olarak yapılmıştır. Her ayak profili için deprem kuvvetlerinin X ve Y yönlerindeki etkileri analiz edilerek, normal kuvvet dağılımları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, aynı ayak profilinin farklı sismik talep düzeyleri altındaki davranışını karşılaştırmalı olarak sunmakta ve yüksek sismik talepler altında alternatif kesit gereksiniminin önemini göstermektedir.

Tablo 9. 3.Bölge İçin Maksimum Eksenel Kuvvetler (Bingöl)

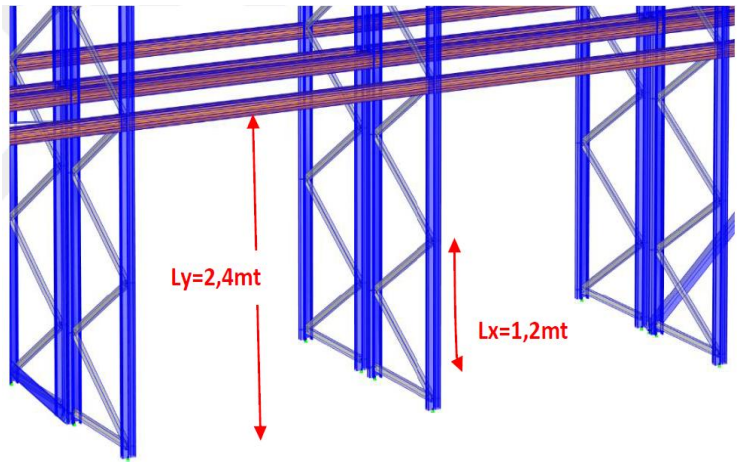
Çerçeve	Çıkış Durumu	Kombinasyon Türü	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kN-m)	M2 (kN-m)	M3 (kN-m)
F319	RMI-5E	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5F	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5G	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5H	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5E	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5F	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5G	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F31B	RMI-5H	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F319	RMI-5E	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F319	RMI-5F	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F319	RMI-5G	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F319	RMI-5H	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F31B	RMI-5E	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F31B	RMI-5F	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F31B	RMI-5G	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F31B	RMI-5H	Kombinasyon	-268,61	-17,31	-0,03	0,00	0,00	-1,38
F347	RMI-5E	Kombinasyon	-268,60	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F347	RMI-5F	Kombinasyon	-268,60	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00
F347	RMI-5G	Kombinasyon	-268,60	-17,31	-0,03	0,00	0,00	0,00



Şekil 16. a) Deprem bölgeleri için X yönü kat kesme kuvvetleri ve b) deprem bölgeleri için Y yönü kat kesme kuvvetleri.

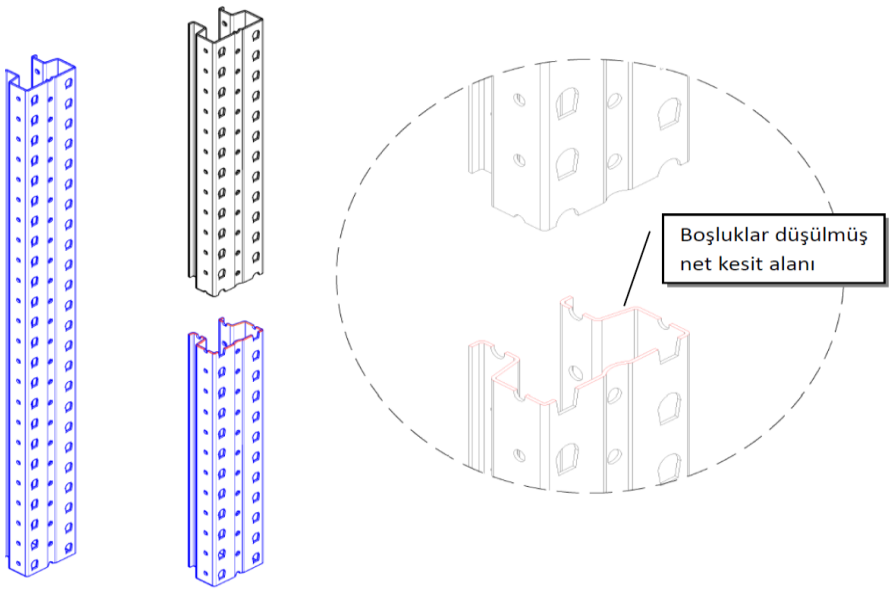


Şekil 17. a) Her Üç Bölge İçin Mesnet Reaksiyonları Ve b) Her Üç Bölge İçin Çaprazlı Yön Devrilme Momentleri.



Şekil 18. Ayak Profillerinin Burkulma Boyları

Analizler sonucunda, ayak profillerinde en kritik eksenel yüklerin tabana yakın düğüm noktalarında meydana geldiği belirlenmiştir. Taşıma kapasitesinin sadece malzeme mukavemetiyle değil, aynı zamanda burkulma boylarının uzunluğuyla da yakından ilişkili olduğu görülmüştür. Euler burkulma teorisine göre, kısa boylu elemanlar daha yüksek yük taşıyabilirken, burkulma boyu arttıkça kritik yük değerleri azalmaktadır. Dolayısıyla, özellikle alt seviyelerde yüksek gerilme oluşsa bile, uzun burkulma boyuna sahip kesitlerin performansı sistemin davranışında belirleyici olmaktadır. Ayrıca, profilin taşıyıcı kapasitesinin değerlendirilmesinde net faydalı kesit alanı esas alınmış; kesitteki boşluk ve açıklıklar dikkate alınarak yapılan efektif alan hesapları, yapı güvenliğinin ve performansının daha gerçekçi biçimde değerlendirilmesini sağlamıştır.



Şekil 19. Faydalı Enkesit Alanı

Yapılan yapısal değerlendirmelerde tasarım hesapları Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT/LRFD) yaklaşımına göre yürütülmüştür. Kesit dayanımı ve burkulma kontrolleri AISI S100-16/S1-18 esaslarına göre, deprem etkisinin raf sistemlerine uygulanmasına ilişkin kabuller FEMA 460 ve ANSI MH16.1 çerçevesinde, genel raf tasarım ilkeleri ise BS EN 15512 ve BS EN 16681 doğrultusunda değerlendirilmiştir. Profil davranışlarının ayrıntılı incelenmesinde CFS yazılımı kullanılmıştır.
Farklı sismik bölgelerdeki taşıma performansını belirlemek amacıyla, İstanbul, Konya ve Bingöl için maksimum iç kuvvetler analiz edilmiş; SAP2000 ile her profilin burkulma boyları dikkate alınarak yük etkileri incelenmiş ve özet bulgular Tablo 10'da sunulmuştur.

Analiz sonuçları, deprem ivmesinin en yüksek olduğu Bingöl bölgesinde, yapı sistemine etki eden taban kesme kuvvetlerinin İstanbul'a göre yaklaşık yedi kat daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, yük dağılımının bölgesel sismik ivmelere bağlı olarak büyük ölçüde değiştiğini göstermektedir. Aynı şekilde, deprem yüklerinin etkisiyle düşey mesnet reaksiyonlarının da arttığı belirlenmiştir. Aynı geometrik özelliklere sahip raf sisteminin farklı

deprem bölgelerine kurulması halinde, tabana aktarılan eksenel yükler ve oluşan devrilme momentleri, ilgili bölgenin sismik özelliklerine bağlı olarak ciddi şekilde artış göstermektedir. İstanbul ise düşük sismik risk nedeniyle, karşılaştırmalar için referans bölge olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bu eğilim, raf sistemlerinde sismik etkinin özellikle dikme/ayak elemanları ile bağlantı bölgelerinde talep artışına yol açtığını bildiren önceki çalışmalarla genel olarak uyumludur (Davidson ve McBride, 2011; Asawasongkram vd., 2014; Yazıcı, 2022). Bu çalışmada da deprem ivmesi arttıkça ayak profillerindeki eksenel kuvvetlerin ve kapasite kullanım oranlarının belirgin biçimde yükseldiği görülmüştür. Sonuçlar, toplam yatay deplasmanın sınırlandırılmış olmasının tek başına güvenli tasarım için yeterli olmadığını; ayak profillerinin burkulma boyu, net kesit alanı ve eksenel basınç kapasitesinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 10. SAP2000 İle Ayak Profilinin Burkulma Boyları Dikkate Alınarak Elde Edilen Yük Etkileri.

Bölge	Profil	P (kN)	V_2 (kN)	V_3 (kN)	M_2 (kNm)	M_3 (kNm)	L_x (m)	L_y (m)
İstanbul	120 Ω	64,55	0,00	0,00	0,00	0,00	1,2	2,45
Konya	120 Ω	71,76	-2,48	0,02	0,00	0,00	1,2	2,45
Bingöl	120 Ω	268,61	17,53	0,03	0,00	1,36	1,2	2,45

Kapasite oranının özellikle Bingöl/Karlıova durumunda daha hızlı artmasının temel nedeni, aynı sistem kütlesi ve aynı geometri için daha yüksek spektral ivme düzeylerinin daha büyük atalet kuvvetleri ve buna bağlı daha yüksek devrilme momentleri üretmesidir. Bu artış, ayak profillerinde yalnızca eksenel basıncı yükseltmemekte; aynı zamanda eksenel yük ile eğilme ve kesmenin birleşik etkisini büyüterek LRFD esaslı talep/dayanım oranını hızlandırmaktadır. Çapraz sistem, özellikle X doğrultusunda global ötelenmeleri sınırlandırarak sistemi rijitleştirmekte; ancak bu rijitlik artışı deprem etkisinin daha büyük kat kesme kuvvetleri olarak sisteme aktarılmasına da neden olmaktadır. Bu nedenle daha düşük deplasman her zaman daha düşük eleman talebi anlamına gelmemektedir. Elde edilen bu eğilim, raf sistemlerinde sismik etkinin özellikle ayak/dikme elemanlarında ve bağlantı bölgelerinde talep artışı yarattığını bildiren Barry ve Anthony (2011), Asawasongkram vd. (2014) ve Yazıcı (2022) ile genel olarak uyumludur.

Mukavemet Hesapları

Ayak profillerinin en fazla kuvvete maruz kalan üç bölgesindeki iç kuvvetler belirlenmiş; bu bölgelerin davranışları AISI S100-16 standardı ve YDKT yöntemiyle analiz edilmiştir. Her deprem bölgesi için kritik yükleme senaryoları değerlendirilerek profillerin taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Kapasite yetersizliği saptanan durumlarda ise alternatif profil formları önerilmiş ve geometrik parametre değişiklikleriyle kapasite artışı sağlanmıştır. Elde edilen bulgular tablolarda ve grafiklerle desteklenmiştir.

KESİT ANALİZLERİ VE KAPASİTE DEĞERLENDİRMESİ

Analiz Yaklaşımı Ve Hesaplama Esasları

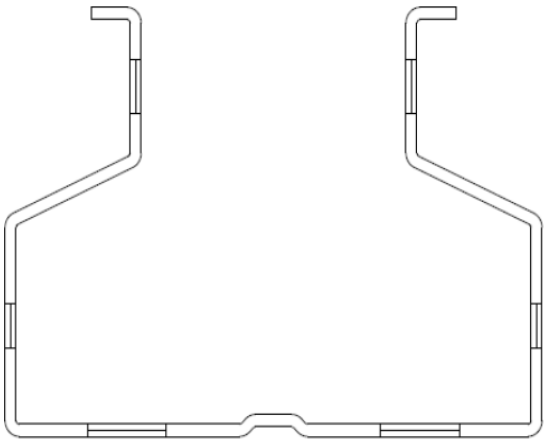
Bu bölümde, farklı deprem bölgelerinde maruz kalınan yükler altında kullanılan 120x2,5 mm omega tipi ayak profilinin yapısal davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Analizlerde, CFS (Cold-Formed Steel) yazılımı kullanılmış; profillere etkiyen eksenel yükler, eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri dikkate alınarak, taşıma kapasiteleri AISI S100-16/S1-18 (LRFD) yönetmeliği kapsamında değerlendirilmiştir. SAP2000'de elde edilen maksimum iç kuvvetler CFS ortamına aktarılarak her bir profil için burkulma modları ve taşıma kapasiteleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Profillerin yetersiz kaldığı durumlarda kapasite artırımı amacıyla alternatif kesit seçenekleri önerilmiştir. Çalışmada kullanılan omega kesitli 120x2,5 mm ayak profili CFS ile modellenmiş ve bu kesite ait temel geometrik ve mekanik özellikler (kesit alanı, atalet momentleri, yarıçaplar, eğilme ve burulma dayanımları) belirlenmiştir. Hesaplamalar otomatik olarak gerçekleştirilmiş ve her üç deprem bölgesinde oluşan iç kuvvet yüklemeleri bu kesit için analiz edilmiştir.

Bu çalışmada kapasite kullanım oranı, CFS yazılımında LRFD esaslı talep/dayanım oranı olarak değerlendirilmiştir. Eksenel basıncın baskın olduğu durumlarda bu oran yaklaşık olarak $\eta = Pu / (\varphi Pn)$ biçiminde okunabilmektedir. Eğilme momenti ve kesme kuvvetinin eşlik ettiği yükleme durumlarında ise AISI S100-16/S1-18 kapsamında tanımlanan birleşik etki denklemleri CFS tarafından otomatik olarak uygulanmıştır. Bu nedenle sunulan kapasite oranları yalnızca tek bir iç kuvvetin değil, gerekli olduğu durumlarda eksenel yük, eğilme ve kesmenin birleşik etkisinin tasarım dayanımına oranını temsil etmektedir.

KULLANILAN PROFİLİN GEOMETRİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Brüt Kesit Özellikleri

Kullanılan Omega profilin açılım geometrisi ve ilgili kesit özellikleri aşağıda verilmiştir:



Şekil 20. 120x2,5 Mm Omega Ayak Profili Kesiti

Tablo 11. Kullanilan Kesit Geometrik Ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Alan	859,86 mm²	Wt.	0,066132 kN/m
Yüzey	343,94 mm	Ix	759010 mm⁴
Sx(t)	13690 mm³	Sx(b)	23741 mm³
Zx	22865 mm³	rx	29,711 mm
y(t	55,443 mm	y(b)	31,971 mm
Height	87,413 mm	Iy	1652303 mm⁴
Sy(1)	26976 mm³	Sy(r)	26976 mm³
Zy	34923 mm³	ry	43,836 mm
x(1)	61,250 mm	x(r)	61,250 mm
Width	122,500 mm	Ixy	0 mm⁴
A	-90,000 deg	xo	0,000 mm
Yo	-73,949 mm	jx	0,000 mm
Jy	77,983 mm	I_1	1652303 mm⁴
I_2	759010 mm⁴	Ic	2411135 mm⁴
I_0	7113356 mm⁴	r_1	43,836 mm
r_2	29,711 mm	rc	52,956 mm
r_0	90,955 mm		

Tablo 12. Açıklık Bölgelerindeki Boşluklar Düşüldükten Sonra Elde Edilen Net Kesit Değerleri

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Ix	58251 mm⁴	rx	29,489 mm
Sx(t)	10805 m	y(t)	53,912 mm
Sx(b)	17388 mm	y(b)	33,502 mm
Zx	17556 mm³	Area	669,86 mm²
Ixy	0 mm⁴	α	-90,000 deg
Iy	1332567 mm⁴	ry	44,602 mm
Sy(1)	21756 mm³	x(1)	61,250 mm
Sy(r)	21756 mm³	x(r)	61,250 mm
Zy	27480 mm³	xo	0,000 mm
yo	-76,916 mm	jx	0,000 mm
Ic	1915084 mm⁴	jy	79,672 mm
Io	5877971 mm⁴	rc	53,469 mm
Cw	3,1223e009 mm⁶	ro	93,675 mm
J	1395,5 mm⁴		

Referans Durum (İstanbul/Beylikdüzü)

Tablo 13. Referans Durum (İstanbul/Beylikdüzü) İçin Statik Kesit Analizi – Elastik Burukulma Sonuçları

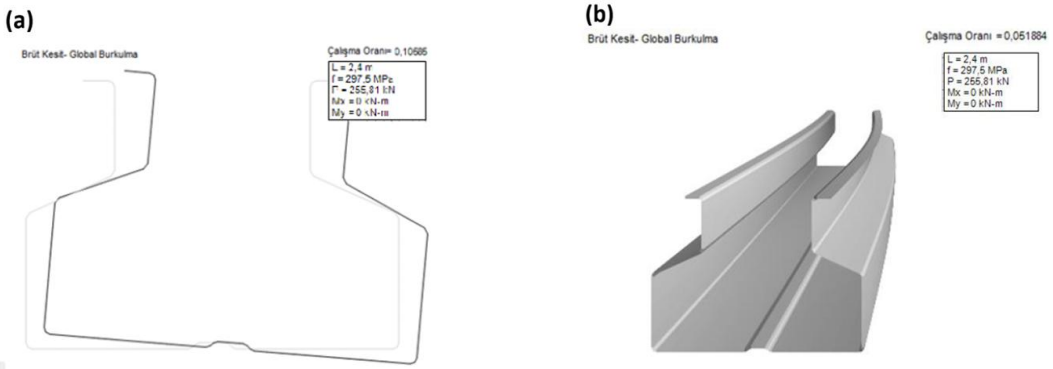
Mode	Büyüklüğü (kN, kN-m)	Gerilim (MPa)	Gerilim Yield	Uzunluğu (m)	Çalışması Ratio
Pcrl	746,18	867,8	24,445	0,03810	7,21
Pcrd	315,87	367,4	10,348	0,69505	0,97
Mcrlx+	48,099	3513,5	98,971	0,03810	1,51
Mcrdx+	8,863	647,4	18,236	0,69505	0,98
Mcrlx-	20,308	1483,4	41,786	0,03810	7,24
Mcrdx-	10,431	762,0	21,464	0,10823	1,98
Mcrly+	57,469	2130,3	60,010	0,03810	21,55
Mcrdy+	21,380	792,5	22,325	0,65533	0,93
Mcrly-	57,469	2130,3	60,010	0,03810	21,55
Mcrdy-	21,380	792,5	22,325	0,65533	0,93

İstanbul'da sadece eksenel yük etkisi altında kalan sistemde hesaplanan kapasite oranı %49,3 olarak tespit edilmiştir. Burkulma modları ve deformasyon grafikleri aşağıda sunulmuştur.

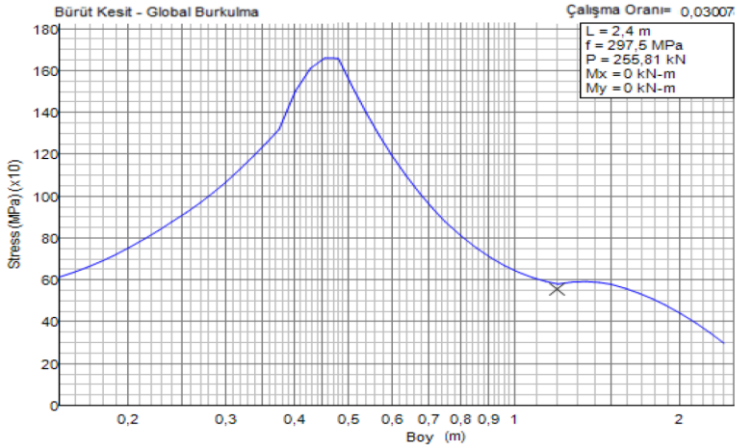
Lx = 1,200 m, Ly = 2,450 m, Lt = 1,200 m , Kx = 1,0000 , Ky = 1,0000, Kt = 1,0000, Cbx = 1,0000, Cby = 1,0000, ex = 0,0000 mm , Cmx = 1,0000, Cmy = 1,0000 , ey = 0,0000 mm , Braced Flange: None , kϕ = 0 kN , Red. Factor, R = 0, Lm = 13,000 m.

Tablo 14. Referans Durumda Sisteme Uygulanan Eksenel Yükler.

Loads	P (kN)	Mx (kNm)	Vy (kN)	My (kNm)	Vx (kN)
Entered	64,55	0,0000	0,00	0,0000	0,00
Applied	64,55	0,0000	0,00	0,0000	0,00
Strength	131,00	3,7773	79,03	6,1726	37,53



Şekil 21. a) Referans Durum İçin Maksimum Deformasyon Görünümü Ve b) Burkulma Modu Şekli.



Şekil 22. Referans Durum İçin Statik Yükler Altında Kapasite Grafiği.

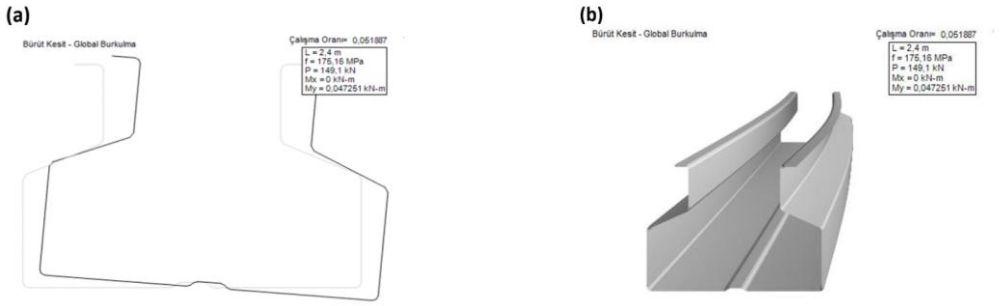
Bölge – Konya (Düşük Deprem Etkisi)

Konya'daki sistemde düşük seviyeli yatay kesme ve moment etkileri görülmüş olup, kapasite kullanımı %55,6 olarak belirlenmiştir.

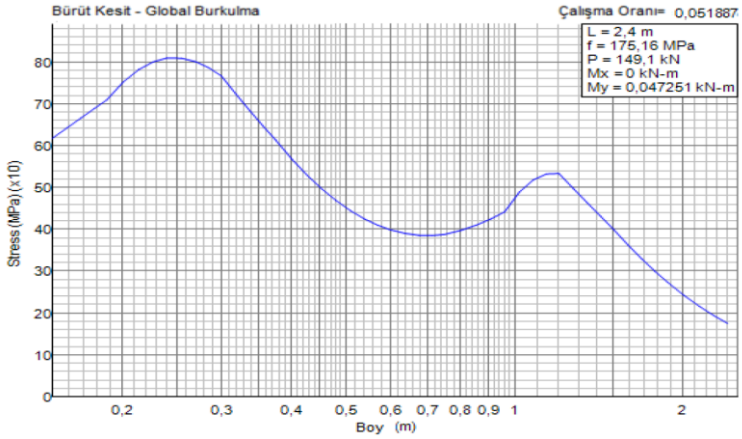
Lx = 1,200 m , Ly = 2,450 m , Lt = 1,200 m , Kx = 1,0000 , Ky = 1,0000, Kt = 1,0000, Cbx = 1,0000, Cby = 1,0000, ex = 0,0000 mm , Cmx = 1,0000, Cmy = 1,0000 , ey = 0,0000 mm , Braced Flange: None , kϕ = 0 kN , Red. Factor, R = 0, Lm = 6,0960 m.

Tablo 15. 2. Bölgede Sisteme Yüklendiği Eksenel Yükleri.

Loads	P (kN)	Mx (kNm)	Vy (kN)	My (kNm)	Vx (kN)
Entered	71,75	0,0300	-2,48	0,0000	0,02
Applied	71,75	0,0323	-2,48	0,0000	0,02
Strength	131,00	3,7773	79,03	6,1726	37,53



Şekil 23. a) 2. Bölge Deformasyon Görünümü Ve b) 2. Bölge Burkulma Modu Şekli.



Şekil 24. 2.Bölge İçin Deprem Etkileri Altında Kapasite Grafiği

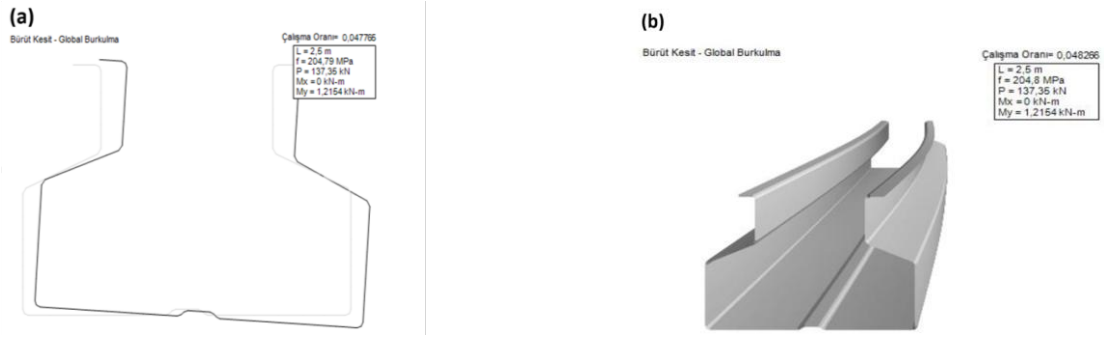
Bölge – Bingöl (Yüksek Deprem Etkisi)

En yüksek sismik talebin tanımlandığı Bingöl/Karlıova durumunda, mevcut ayak profilinin kapasite oranının 1,0 değerini belirgin biçimde aştığı ve burkulma etkisinin belirleyici hale geldiği görülmüştür. Kapasite yetersizliği açıkça ortaya çıkmış ve kesit modifikasyonu önerilmiştir.

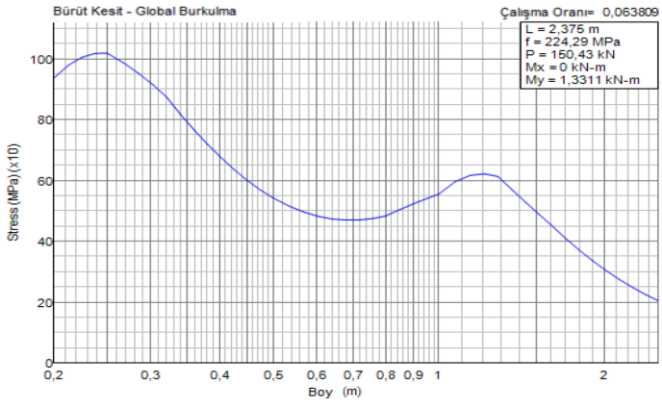
Lx = 1,200 m , Ly = 2,450 m , Lt = 1,200 m , Kx = 1,0000 , Ky = 1,0000, Kt = 1,0000, Cbx = 1,0000, Cby = 1,0000, ex = 0,0000 mm , Cmx = 1,0000, Cmy = 1,0000 , ey = 0,0000 mm , Braced Flange: None , kϕ = 0 kN , Red. Factor, R = 0, Lm = 13,000 m.

Tablo 16. 3. Bölgede Sisteme Yüklendiği Eksenel Yükleri.

Loads	P (kN)	Mx (kNm)	Vy (kN)	My (kNm)	Vx (kN)
Entered	268,60	0,0000	17,55	1,3600	0,03
Applied	268,60	0,0000	17,55	2,7221	0,03
Strength	131,00	3,7773	79,03	6,1726	37,53



Şekil 25. a) 3. Bölge Max Kapasite Burkulma Modu Ve b) 3. Bölge Burkulma Deformasyon Şekli.

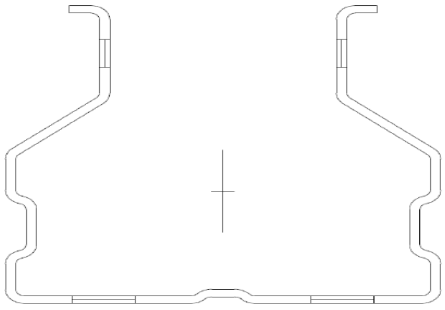


Şekil 26. 3.Bölge İçin Deprem Etkileri Altında Kapasite Grafiği.

Sonuçların Yorumu ve Alternatif Kesit Önerisi

Yapılan analizler sonucunda özellikle 3. deprem bölgesinde (Bingöl) kullanılan mevcut kesitin taşıma kapasitesinin yetersiz kaldığı ve burkulma davranışının belirleyici olduğu görülmüştür. Kritik talebin güvenli taşıma kapasitesini belirgin biçimde aştığı tespit edilmiştir. Bu duruma yönelik olarak:
Sac kalınlığı 2,5 mm'den 3 mm'ye çıkarılmış,
Kesit açılımı 340 mm'den 400 mm'ye genişletilmiştir.

Yeniden düzenlenen bu profil ile gerekli Ix ve Iy atalet momentleri sağlanmış, tasarım güvenliği artırılmıştır. Bu sonuç, yüksek sismik bölgelerde tasarımın yalnızca malzeme dayanımının artırılmasıyla değil, kesit geometrisinin burkulma davranışını iyileştirecek biçimde yeniden düzenlenmesiyle daha etkili biçimde geliştirilebileceğini göstermektedir. Başka bir ifadeyle, kalınlık artışı ile birlikte kesit açılımının büyütülmesi Ix ve Iy rijitliklerini artırarak hem global ötelenme kontrolüne hem de yerel burkulma güvenliğine katkı sağlamıştır.



Şekil 27. Geliştirilmiş Profil Kesit Görünümü

Bu çalışmada alt ayak uçları ankastre, üst bağlantılar ise yarı rijit olarak modellenmiştir. Bu kabul, taban plakası–ankraj sisteminin gerçek davranışını sadeleştiren ve sistemde görece daha rijit bir sınır durumu üreten idealize bir modelleme yaklaşımıdır. Dolayısıyla mutlak deplasman, iç kuvvet ve doğal periyot değerleri gerçek sistem davranışından belirli ölçüde sapma gösterebilir. Özellikle ankastre kabulü, global ötelenmeleri azaltırken taban bölgesindeki kuvvet yığılmasını ve bazı eleman taleplerini etkileyebilir. Bununla birlikte, bu çalışmanın amacı belirli

bir raf sisteminin mutlak saha performansını birebir tahmin etmekten çok, aynı modelleme kabulleri altında farklı sismik tehlike düzeylerinin göreli etkisini karşılaştırmaktır. Bu nedenle elde edilen bulgular, mutlak performans beyanından ziyade karşılaştırmalı bir mühendislik değerlendirmesi olarak yorumlanmalıdır.

Tablo 17. Kullanılan Kesit Geometrik Ve Mekanik Özellikleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Alan	1203,2 mm²	Wt.	0,092538 kN/m
Flat	401,07 mm	Ix	1880002 mm⁴
Sx(t)	25502 mm³	Sx(b)	42462 mm³
Zx	42052 mm³	rx	39,53 mm
y(t)	73,72 mm	y(b)	44,28 mm
Height	118,00 mm	Ixy	0 mm⁴
α	-90,000 deg	Iy	2489878 mm⁴
Sy(l)	40088 mm³	Sy(r)	40088 mm³
Zy	51346 mm³	ry	45,49 mm
x(l)	62,11 mm	x(r)	62,11 mm
Width	124,22 mm	xo	0,00 mm
yo	-99,23 mm	jx	0,00 mm
jy	105,41 mm	I_1	2489878 mm⁴
I_2	1880002 mm⁴	r_1	45,49 mm
r_2	39,53 mm	Cw	9,5651e09 mm⁶
J	3609,6 mm⁴		

Tablo 18. Açıklık Bölgelerindeki Boşluklar Düşüldükten Sonra Elde Edilen Net Kesit Değerleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Ix	1483033 mm⁴	rx	37,96 mm
Sx(t)	20388 mm³	y(t)	72,74 mm
Sx(b)	32771 mm³	y(b)	45,25 mm
Zx	33978 mm³	Area	1029,2 mm²
Ixy	0 mm⁴	α	-90,000 deg
Iy	2286074 mm⁴	ry	47,13 mm
Sy(l)	36806 mm³	Sy(r)	36806 mm³
Zy	45435 mm³	x(l)	62,11 mm
x(r)	62,11 mm	xo	0,00 mm
yo	-98,77 mm	jx	0,00 mm
jy	104,01 mm	Ic	3769107 mm⁴
rc	60,52 mm	I_0	13808430 mm⁴
r_0	115,83 mm	Cw	7,6301e09 mm⁶
J	3087,6 mm⁴		

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, soğukta şekillendirilmiş çelik profillerle oluşturulan depo raf sistemlerinin farklı sismik bölgelerdeki yapısal davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, SAP2000 ile gerçekleştirilen global sistem analizleri ile CFS yazılımı kullanılarak yapılan kesit bazlı dayanım ve burkulma kontrollerinin birlikte ele alınmasıyla yapılmıştır. Böylece yalnızca sistem düzeyindeki deplasmanlar değil, ayak profillerinde oluşan eksenel kuvvet artışları ve kapasite kullanım oranları da karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ulaşılan başlıca bulgular ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:
Sunulan sonuçlar, aynı modelleme kabulleri altında yürütülen karşılaştırmalı analizlere dayanmaktadır; bu nedenle özellikle mesnet rijitliği ve bağlantı idealizasyonları mutlak büyüklükleri etkileyebilse de, bölgeler arası eğilimlerin yorumlanmasında bulgular geçerliliğini korumaktadır.

Statik ve düşük sismik etkiler altında, ayak profillerinde oluşan iç kuvvet taleplerinin mevcut kesit kapasitesi içerisinde kaldığı görülmüştür. Ancak yüksek sismisite koşullarında, özellikle ayak profillerinde eksenel kuvvet taleplerinin ve kapasite kullanım oranlarının belirgin biçimde arttığı, bazı durumlarda ise kesit kapasitesinin aşıldığı belirlenmiştir. Deprem kuvvetinin logaritmik artışı, sistem davranışını doğrudan etkilemektedir. Örneğin, yer ivmesinin 0.4g'den 0.75g'ye çıkmasıyla, ayak profillerindeki zorlanmanın yaklaşık 10 kata kadar arttığı tespit

edilmiştir. Bu durum, özellikle burkulma ve eksenel yük kapasitesinde belirgin kayıplara yol açmıştır. Modal analiz sonuçları da sistemin doğrultuya bağlı rijitlik farklılıkları gösterdiğini ortaya koymuştur. İlk modlarda Y doğrultusunda baskın kütle katılımı elde edilirken, çaprazlı X doğrultusunda daha rijit bir davranış gözlenmiştir. Buna rağmen çaprazlı doğrultuda deprem yüklerinin daha yüksek kat kesme kuvvetleri olarak sisteme aktarılması, ayak profillerindeki iç kuvvet taleplerinin yalnızca ötelenme değerleri ile değil, aynı zamanda kuvvet esaslı olarak da değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir.

Profil geometrisi, sistemin sismik performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Burkulma boylarının artması, özellikle zemin seviyesi yakınlarında kapasiteyi ciddi şekilde azaltmaktadır. Yapısal dayanımı artırmak amacıyla, ayak profillerinin ilk kat yüksekliğinin yarısına kadar içten takviye edilmesi (örneğin U levha ile desteklenmesi) önemli fayda sağlamaktadır. Ayrıca, y yönünde burkulmayı sınırlandırmak için çift sıra profil kullanımı önerilmektedir.

Elde edilen bulgular, raf sistemlerinde deprem etkisinin özellikle ayak/dikme elemanlarında ve bu elemanların burkulma davranışında kritik hale geldiğini bildiren önceki çalışmalarla genel olarak uyumludur. Bu çalışmada da, toplam deplasmanların sınırlandırılmış olması tek başına yeterli olmamış; ayak profillerindeki eksenel yük artışı ve kapasite kullanımı tasarım güvenliği açısından belirleyici olmuştur.

Türkiye gibi yüksek sismisiteye sahip ülkelerde, depo raf sistemlerinin mevcut yönetmeliklerde doğrudan tanımlanmaması mühendislik açısından önemli bir boşluktur. Bu bağlamda, FEMA ve AISI gibi uluslararası standartların dikkate alınarak ulusal ölçekte özel düzenlemeler yapılması gereklidir. Ekonomiklik ve güvenlik arasında denge sağlanması, hem yatırımcılar hem de mühendislik açısından kritik öneme sahiptir. Tasarımda malzeme seçiminden, profil formuna ve sistem geometrisine kadar çok yönlü optimizasyon yapılması gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma; farklı sismik bölgelerde kurulan depo raf sistemlerinin güvenli tasarımında profil formu, kesit rijitliği, burkulma boyu, sistem geometrisi ve yerel sismik parametrelerin birlikte dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek deprem tehlikesi taşıyan bölgelerde, ayak profillerine ilişkin kesit iyileştirmeleri ve kapasite kontrolleri, sistem güvenliğinin sağlanmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

KAYNAKLAR

AFAD. (2023). *Türkiye Deprem Tehlike Haritası Web Sitesi*. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Erişim tarihi: 13 Şubat 2023.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmî Gazete, 30364 (Mükerrer), 18 Mart 2018.

Aghayere, A., & Vigil, J. (2021). *Çelik yapı tasarımı: Uygulamaya yönelik bir yaklaşım* (B. Akbaş & O. Ö. Eğilmez, Çev.). Ankara, Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık.

Allen, D. (2006, November). History of cold-formed steel. *Structure Magazine: Building Blocks*, 28–32.

American Institute of Steel Construction. (2016a). *Seismic provisions for structural steel buildings* (ANSI/AISC 341-16). Chicago, IL, USA.

American Institute of Steel Construction. (2016b). *Specification for structural steel buildings* (ANSI/AISC 360-16). Chicago, IL, USA.

American Iron and Steel Institute. (2007). *North American specification for the design of cold-formed steel structural members* (AISI S100-07). Washington, DC, USA.

American Iron and Steel Institute. (2016). *North American specification for the design of cold-formed steel structural members* (AISI S100-16). Washington, DC, USA.

American Iron and Steel Institute. (2018). *Supplement 1 to the North American specification for the design of cold-formed steel structural members, 2016 edition* (AISI S100-16/S1-18). Washington, DC, USA.

American Society of Civil Engineers. (2013). *Minimum design loads for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-10). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/9780784412916

Asawasongkram, N., Chomchuen, P., & Premthamkorn, P. (2014). Seismic performance evaluation of steel storage racks using experimental results of beam-to-column connection. In *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Türkiye.

Asçelik DRS. (2023). *ASC Depo Raf Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti.* Erişim tarihi: 20 Şubat 2023.

British Standards Institution. (2009). *Steel static storage systems—Adjustable pallet racking systems—Principles for structural design* (BS EN 15512:2009). London, UK.

British Standards Institution. (2016). *Steel static storage systems—Adjustable pallet racking systems—Principles for seismic design* (BS EN 16681:2016). London, UK.

Celep, Z., & Kumbasar, N. (2000). *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*. İhlas Matbaacılık.

Computers and Structures, Inc. (2020). SAP2000® (Version 22.2.0) [Computer software]. Berkeley, CA, USA: Computers and Structures, Inc.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapımına dair esaslar*. Ankara, Türkiye.

Darılmaz, K. (2019). *Depreme dayanıklı binaların tasarımına giriş*. İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi.

Davidson, B. (2011). Design Recommendations for the Improvement of the Seismic Performance of Steel Storage Racks.

Demirel, Y. (2019). İnce Cidarlı U Çelik Profillerin Eksantrik Yük Altında Tek Bulonlu Bağlantılarının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, *7*(2), 372-382.

Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F., & Çağlayan, B. Ö. (2008). *Çelik yapılar*. İstanbul, Türkiye: Çağlayan Kitabevi.

Doğangün, A. (2021). Deprem-zemin ve depreme dayanıklı yapı tasarımı. *Istanbul: Birsen Yayınevi*.

Eren, Ö. (2007). *Çelik yapılar: Tasarım, konstrüksiyon, uygulama*. İstanbul, Türkiye: Arı Sanat Yayınları.

European Committee for Standardization. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings* (EN 1993-1-1:2005). Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-3: General rules—Supplementary rules for cold-formed members and sheeting* (EN 1993-1-3:2006). Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (2008a). *Steel static storage systems—Adjustable pallet racking—Tolerances, deformations and clearances* (EN 15620:2008). Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (2008b). *Steel static storage systems—Specification of storage equipment* (EN 15629:2008). Brussels, Belgium.

European Committee for Standardization. (2008c). *Steel static storage systems—Application and maintenance of storage equipment* (EN 15635:2008). Brussels, Belgium.

European Racking Federation. (2010). *Latest developments in harmonisation for the design and use of storage equipment* (FEM 10/1-02). Birmingham, UK.

Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356). Washington, DC.

Federal Emergency Management Agency. (2005a). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (FEMA 440). Washington, DC.

Federal Emergency Management Agency. (2005b). *Seismic considerations for steel storage racks located in areas accessible to the public* (FEMA 460). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.

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 Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *24*(3), 362-375.

Halmos, G. T. (2005). *Roll forming handbook*. CRC Press. DOI: 10.1201/9781420030693

Karabulut, A. (2011). *TDY2007 yönetmeliği ve FEMA 440 raporunda tanımlanan doğrusal olmayan analiz yöntemlerinin mevcut betonarme binalar için karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

Khoshnoudian, F., & Behmanesh, I. (2010). Evaluation of FEMA-440 for including soil-structure interaction. *Earthquake engineering and engineering vibration*, *9*(3), 397-408.

Livatyalı, H. (2006, Ağustos). Bilgisayar destekli rollform makara tasarımı: Zanaatın teknolojiyle birleşmesi. *Makinetek Dergisi*.

Odabaşı, Y. (1997). *Ahşap ve çelik yapı elemanları*. İstanbul, Türkiye: Beta Basım Yayım.

Özbek, T. (1998). *Mukavemet*. İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi.

Özmen, G., Orakdöğen, E., & Darılmaz, K. (2015). *Örneklerle SAP 2000-V17*. Birsen Yayınevi.

Rack Manufacturers Institute. (2012). *Specification for the design, testing and utilization of industrial steel storage racks* (ANSI MH16.1-2012). Charlotte, NC, USA: Material Handling Industry.

Rafex. (2023). *Rafex depo ve raf sistemleri*. Erişim tarihi: 20 Şubat 2023.

RSG Software. (n.d.). *CFS®* [Computer software]. RSG Software.

Storage Equipment Manufacturers' Association. (2010). *Code of practice for the use of static pallet racking*. Birmingham, UK: Storage Equipment Manufacturers' Association.

Şenaysoy, S. (2017). *Çelik depo raf sistemlerinde kullanılan dikme ve ayakların burkulma davranışlarının incelenmesi ve optimizasyonu* (Master's thesis, Bursa Uludag University (Turkey)).

Todd, R. H., Allen, D. K., & Alting, L. (1994). *Manufacturing processes reference guide*. Industrial Press Inc..

Tunca, O., Erdal, F., Sağsöz, A. E., & Çarbaş, S. (2017). Soğukta Şekillendirilmiş Çelik Profillerin Yapısal Özellikleri. *Uluslararası Katılımlı 7. Çlik Yapılar Sempozyumu*, 234-241.

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.

Yu, W. W. (1973). Cold-formed steel structures.

Koşatepe, A. (2020). Çelik Yapılarda Kullanılan Birleşim Elemanlarının Yangın Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, *10*(4), 2692-2703.

Yazıcı, C. (2022). *Depolama Raf Sistemi Elemanlarının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi Ve Kiriş-Kolon Birleşimleri İçin Mekanik Bir Model Önerilmesi* (Doctoral Dissertation, Atatürk Üniversitesi).