



Endüstriyel Depo Raf Sistemlerinin Yapısal Güvenliğinin Dinamik Etkiler Altında İncelenmesi

Structural Safety Investigation of Industrial Steel Storage Rack Systems Under Dynamic Effects

Alper Deniz¹, Ülgen Mert Tuğsal^{2*}

¹ Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, alperdeniz@gtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1606-7846>

² Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, umtugsal@gtu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7304-4432>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 24 Nisan 2023
Revizyon 2 Ocak 2024
Kabul 8 Şubat 2024
Online 29 Mart 2024

Anahtar Kelimeler:

Endüstriyel Depo Raf Sistemleri,
Doğrusal Olmayan Statik ve
Dinamik Analiz, Kuvvetli
Yer Hareketi, Deprem Davranışı

ÖZ

Son yıllarda ülkemizdeki büyük halka açık depo mağazaları ve büyük firmaların depolama yapılarının sayısı artmıştır. Bu alanlarda kullanılan depo raf sistemleri endüstriyel ürünlerin 'üretim-dağıtım-satış-tüketim' döngüsü içinde güvenli bir şekilde depolanması/saklanması adına önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında iki farklı yüksekliğe ve kiriş-kolon bağlantı detayına sahip depo raf sistemlerinin deprem etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Kiriş-kolon birleşim detayları bu yapıların sismik davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle özellikle koridor doğrultusundaki kiriş-kolon birleşimlerinin deprem davranışına katkısının değerlendirilmesi amacıyla oluşturulan yapısal modellerde iki farklı tip birleşim göz önüne alınmıştır. Oluşturulan 3-ve 5- katlı modeller için doğrusal olmayan statik ve dinamik yöntemler çerçevesinde SAP 2000 programı ile yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve deprem etkisi altındaki davranışları irdelenmiştir. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde kolon-kiriş birleşimlerinin tersinir çevrimsel moment-dönme ilişkileri için literatürde yer alan deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Yapı yüksekliği ve birleşim noktası detayı unsurlarının sistemin deprem davranışını önemli ölçüde etkilediğinin belirlendiği bu çalışmada yapısal hasarın sınır durumlarını belirlemek için mühendislik talep parametreleri seçilmiştir. Doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçlarına bağlı olarak elde edilen yapısal kapasiteler doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları ile değerlendirilerek ilgili talep parametreleri için olası hasar sınırları belirlenmeye çalışılmış ve bu çerçevede kırılma eğrileri oluşturulmuştur. Çalışmada elde edilen bulguların endüstriyel döngüde ürünlerin güvenli bir şekilde depolanması noktasında fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 April 2023
Received in revised form 2 January 2024
Accepted 8 February 2024
Available online 29 March 2024

Keywords:

Industrial Storage Rack Systems,
Nonlinear Static and Dynamic
Analyses, Strong Ground Motion,
Earthquake Behavior

Doi: 10.24012/dumf.1286960

* Sorumlu Yazar

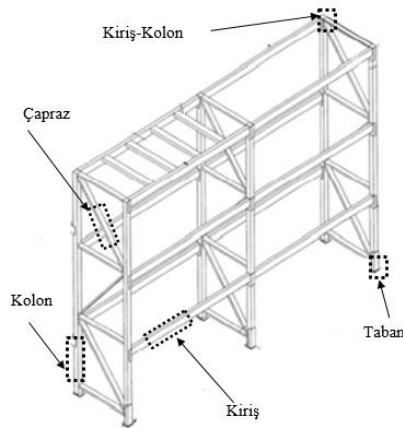
ABSTRACT

Recently, the number of large public warehouse stores and storage structures of large companies in our country has increased. The rack systems used in these areas are important for the safe storage of industrial products. Within the scope of this study, earthquake behavior of storage rack systems with different heights and different cases of beam-to-column connections are examined while joint details play an important role in the seismic behavior of these systems. Therefore, two different connection types have been considered in the structural models to evaluate the contribution of beam-to-column connections in the earthquake behavior of the models for the down-aisle direction. For the 3- and 5- storey models, static and dynamic structural analyses are carried out utilizing SAP2000 program and the earthquake behaviors are determined within the framework of nonlinear analysis methods. During nonlinear analyses, the experimental studies in the literature are taken into consideration for the cyclic moment-rotation relationships of beam-to-column connections. In this study, in which it is determined that the building height and beam-to-column connection detail significantly affect the seismic behavior of the system, engineering demand parameters are chosen to determine the limit states of structural damage. These limits are investigated by evaluating the structural capacities according to non-linear static push-over analysis and drift values that are obtained from incremental dynamic analysis. The fragility analysis is conducted depending on these limit failure conditions. It is believed that the findings obtained in this study will be beneficial at the point of safe storage of products in the industrial cycle.

Giriş

Günümüzde çelik depo raf sistemleri, insanlığın gelişen ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı endüstri kollarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Bu sistemler, lojistik tedarik zincirinin en önemli unsuru olan ürünlerin 'üretim-dağıtım-satış-tüketiciye ulaşım' döngüsü içinde güvenli bir şekilde depolanması/saklanması amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde de taşımacılık, depolama, paketleme, gümrükleme ve nihai tüketiciye erişimi de kapsayan lojistik hizmetleri gelişimini sürdürmekte ve bu sistemlerin kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

Farklı sektörlerde pek çok üretici ürünlerini (otomotiv, elektronik, beyaz eşya, gıda, tekstil, kimyasal madde, yapı malzemesi, vb.) farklı yükseklikteki endüstriyel depo raf sistemlerinde depolanmaktadır. Bu sistemler depolar için pratik ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bunlara ilave olarak hızlıca kurulum özelliğine sahiptir. Zamandan ve alandan tasarruf etmemizi sağlar. Modern hayatın getirdiği yeniliklere paralel olarak artık günümüzde büyük alışveriş merkezlerinde, marketlerde, konsept mağazalarında halkın kullanımına da açık hale gelmiştir. Yaygın olarak kullanımına bağlı olası bir tehlike durumunda hayati ve finansal kayıp riskini en aza indirmek bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Çelik depo raf sistemleri endüstride depolama için yaygın olarak kullanılmakta ve genellikle paletlere yerleştirilen yükleri taşımaktadır. Tipik bir palet rafının yapısal elemanları, gövde ve başlıklar boyunca delinmiş olan soğukta şekillendirilmiş çelik dikmeler ile genellikle dikdörtgen kutu kesite sahip kirişlerden oluşmaktadır. Kirişler, kirişlerin uçlarına önceden kaynaklanmış uç bağlantılarıyla dikmelere bağlanmaktadır. Şekil 1'de tipik bir depo raf sistemini görülmektedir.

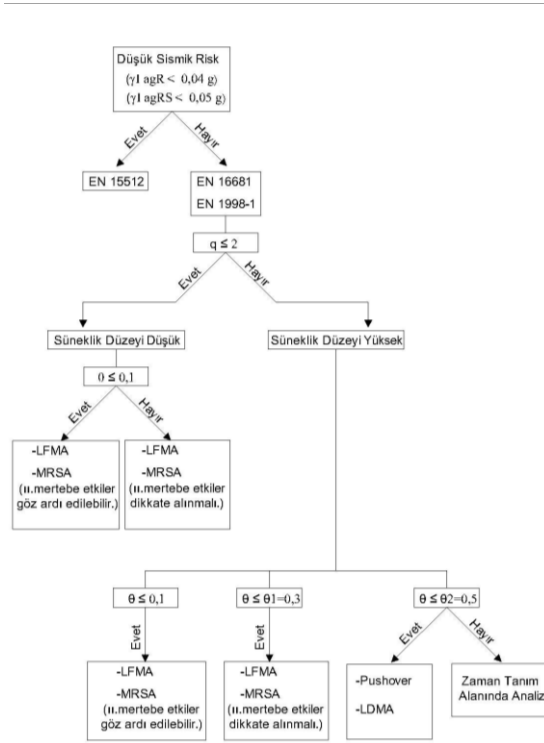


Şekil 1. Çelik Depo Raf Sistemi

Düsey taşıyıcı elemanlar (kolonlar) enkesit özellikleri ve kesitteki delikler nedeniyle farklı burkulma türlerine karşı narin bir davranış sergilemektedir. Tüm kolonda global burkulma veya kolon enkesiti flanşlarında lokal ya da çarpılma burkulması gibi etkilerin önlenmesi amacıyla bu elemanlar kompleks formda kesitlere sahip olacak şekilde üretilmektedir [1]. Çelik depo raf sistemlerinde kiriş-kolon bağlantıları farklı bağlantı tiplerinin moment taşıma kapasitelerine göre gruplandırılmakta ve rijit, yarı rijit ve

moment aktarmayan bağlantılar olarak sınıflandırılabilir. Yarı rijit bağlantıların moment taşıma kapasitelerinin deneysel ve teorik olarak belirlendiği bir çalışmada, kiriş-kolon birleşiminin kancalı olması durumu üzerinde incelemeler yapılmıştır [2]. Yapılan deneysel testlerde davranışın yarı-rijit olduğunu belirlemiştir. Başka bir çalışmada ise kiriş-kolon birleşimlerini yarı rijit olarak kabul etmiş ve 3 boyutlu sonlu elemanlar programı olan ANSYS ile birleşimlerin moment-dönme ilişkilerini elde etmişlerdir. Cıvatalı kolon-kiriş birleşiminin döngüsel performansını bir test düzeneği üzerinde incelendiği bir başka çalışmada, histeretik davranışta pinching4 modelinden yararlanılmıştır [3]. Tipik cıvatalı ve cıvasız bağlantılar arasında bir karşılaştırma da yapılmıştır. İki cıvatalı bağlantının enerji dağıtma kapasitesinin, tek cıvatalı bağlantılara kıyasla önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir [4]. Diğer bir önemli bağlantı elemanı ise taban plakalarıdır. Bu bağlantılar kolon elemanın üzerinde oluşan yükü zemine aktarması için tasarlanan bağlantılardır. Mesnet tiplerinin basit ve ankastre olması durumu konusu üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Ankastre mesnet olması durumunda sistemin periyodu azalmıştır [5]. Çapraz doğrultudaki yüklemelerde ankrajların performansının incelendiği bir çalışmada farklı tipteki ankrajlar sonlu elemanlar programı vasıtasıyla çözümlenmiştir [6].

Çelik depo raf sistemlerinde kullanılan düsey elemanların enkesit özelliklerinin kompleks formda olması yapısal davranışlarının teorik olarak tahmin edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle mevcut tasarım standartları, sistemi oluşturan elemanların ve bağlantılarının deneysel test sonuçlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Çalışmada öncelikle depo raf sistemleri özelinde kullanılmakta olan mevcut yönetmelikler incelenmiştir. Son yıllarda yapılan güncel çalışmalarda yapısal tasarım aşamasında 'BS EN 15512:2009, Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Structural Design., British Standards Institution.' yönetmeliğinin kullanıldığı görülmüştür. Deprem yükleri etkisinde yapısal analiz içinse 'BS EN 16681:2016, BSI Standards Publication Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Seismic Design., British Standards Institution.' normu kullanılmaktadır. EN 16681 normunda depo raf sistemlerinin tasarımında yapılacak olan kabuller ve yapısal analizlerde kullanılacak olan hesap yönteminin seçimi ile ilgili belli kısıtlamalar ve yönlendirmeler mevcuttur. Yapısal analizlerde kullanılacak yöntemin seçiminde izlenecek olan aşamalar Şekil 2'de özetlenmiştir. Tasarım yöntemini belirlemede kullanılan temel parametreler süneklik düzeyi (q) ve katlar arası ötelenme oranı (θ)dır. Yüksek sismik risk olması durumunda EN 16681 normu çerçevesinde öncelikle sistemin süneklik düzeyine karar verilir ve sonrasında ötelenme oranları belirlenerek hesap yöntemi seçilmektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan yapısal modeller için Şekil 2'deki yönerge takip edilerek elde edilen görel kat ötelenmesi oranlarına bağlı olarak yapısal analiz yöntemine karar verilmiştir. Yer çekimi ivmesi (g), eşdeğer deprem yükü yöntemi (LFMA) ve mod birleştirme yöntemi (MRSA) olarak tanımlanabilmektedir.



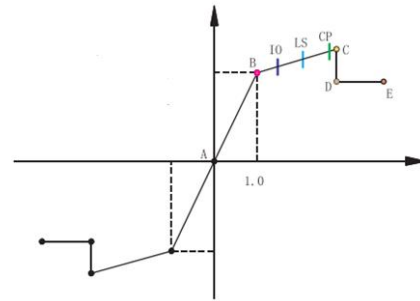
Şekil 2. Tasarım yöntemi belirleme adımlarına ait akış şeması.

İlgili normda endüstriyel depo raf sistemlerinin yapısal performans seviyelerine ait herhangi bir tanımlama yer almamaktadır. İfade edilen sadece göz önüne alınması gereken performans gereksinimini sağlayacak şekilde bir tasarım yapılmasıdır. Raf yapısı, depremden sonra yapısal bütünlüğünü ve yük taşıma kapasitesini koruyarak, yerel veya tümünden göçme olmaksızın tasarım kuvvetlerine dayanacak şekilde tasarlanması önerilmektedir. Bu nedenle, tez çalışması kapsamında ilgili sistemlerin performans seviyelerini belirlemek üzere bir çalışma yapılması amaçlanmıştır. Oluşturulan yapısal modeller göz önüne alınarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz sonuçları belirlenen mühendislik şiddet parametrelerine bağlı olarak irdelenmiş ve yapısal hasarın limit durumlarını tahmin etmek üzere değerlendirmeler yapılmıştır.

Literatürde çelik depo raf sistemlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarının değerlendirilmesi hususunda çok fazla sayıda çalışma bulunmamaktadır. Çelik depo raf sistemleri özelindeki uluslararası normlarda bu sistemlerin yapısal kapasitelerine ait hasar sınır durumlarının belirli olmaması nedeniyle, literatürde konuyla ilgili incelenen çalışmalarda görüldüğü üzere araştırmacılar tarafından farklı yaklaşımlarda bulunduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmada depo raf sisteminin bulunduğu yere bağlı olarak elde edilen maksimum yer hareketi ivmesine göre koridor doğrultusundaki yerdeğiştirme talebini ve kapasitesini değerlendirmek için yerdeğiştirmeye dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin Amerika Birleşik Devletleri'ndeki bina yönetmeliklerinde yer alan performans hedefleriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir ve uygunluğunu göstermek amacıyla analitik çözümler

gerçekleştirilmiştir. Çalışma özelindeki analitik yöntemle incelenen yapısal model gerçek boyutları ile test merkezinde simüle edilmiş ve böylelikle oluşturulan yapısal model ve deney sonuçları doğrulanmıştır. Önerilen yerdeğiştirmeye dayalı yöntemin uygulanabilirliği, kiriş-kolon bağlantılarının moment-dönme eğrilerinin mevcudiyetine bağlı olmakla beraber yapısal performans düzeyi göçmenin önlenmesi olarak hedeflenmiştir [5].

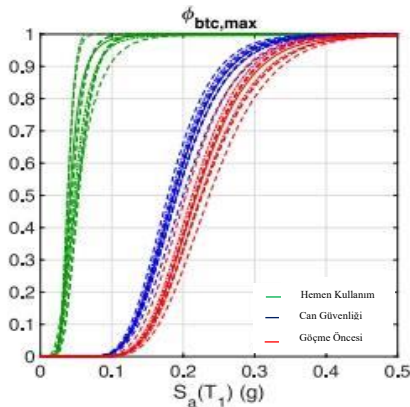
Literatürde yer alan çalışmada oluşturulan yapısal modellerde gerçekleştirdikleri doğrusal olmayan çözümlerinde yapısal elemanlar için plastik mafsalları tanımlamalarını ve hasar limit durumlarını FEMA-356'ya göre değerlendirmiştir (Şekil 3). A noktası ile B akma noktası arasında lineer davranır. B noktası ile C noktası pekleşme olmaktadır. C noktasından D noktasına önemli derecede dayanım azalması olmaktadır. E noktasında büyük deformasyonlara ulaşır ama dayanım sıfırdır. IO (hemen kullanım düzeyi), LS (can güvenliği düzeyi), CP (göçme önleme düzeyi) hasar sınırlarını ifade etmektedir. Farklı kiriş-kolon bağlantı tiplerinin göz önüne alınarak yapısal modellerin oluşturulduğu çalışmada sonlu elemanlar programı olan Sap 2000 vasıtasıyla doğrusal olmayan statik itme analiz yöntemi çerçevesinde yapısal modellere ait taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme grafikleri elde edilip, az-hasar, orta-hasar ve ağır-hasar olmak üzere 3 farklı performans düzeyi noktası belirlenmiştir [7]. Bu hedef yerdeğiştirmelere göre yapısal modellerin performans değerlendirmeleri yapılarak göçme mekanizması incelenmiştir.



Şekil 3. Çelik elemanlar için geliştirilmiş kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.

Önceki çalışmanın devamı niteliğinde gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada oluşturdukları bu yapısal modellerin deprem etkisi altındaki davranışlarını Artımsal Dinamik Analiz (IDA) yöntemi ile değerlendirmiştir [8]. Hesaplamalar iki tip kiriş-kolon bağlantı detayı göz önüne alınarak yapılmış olup, yapısal modellemeler aynı kalmak koşuluyla birleşimlerin histeretik davranışı deneysel testlerden elde edilen veriler ile çoklu lineer bağlantı olarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizlerde 22 takım kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak, toplamda 44 deprem yer hareketi etkisi altında dinamik analizleri gerçekleştirilerek IDA eğrileri (spektral ivme-maksimum göreceli kat ötelenmeleri) elde edilmiştir. Sistemin göçme noktasını tahmin etmek için birleşik bir IM (deprem düzeyi) / DM (hasar düzeyi) tabanlı kural kullanılmış olup, IM için S_a , DM için ise

maksimum görelî kat ötelenmesi oranı dikkate alınmıştır. $DM \geq 0.02$ olduğunda rafın göçmüş olduğu ve bu noktadaki teğet eğimin elastik eğimin %20'sinden düşük olduğu kabul edilerek bu doğrultuda kırılmalık eğrileri oluşturulmuştur [8]. Son yıllarda yapılan bir çalışmada oluşturmuş olan yapısal modellerde 3 farklı kiriş eleman enkesiti göz önüne alınmıştır (WB.100.40, WB.120.40, WB.140.40). Kiriş-kolon bağlantı tipleri için 3 farklı birleşim detayının irdelendiği bu çalışmada bağlantıların kancalı, 2 civatalı ve 4 civatalı olması durumuna göre toplamda 9 farklı tipe göre 'Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks (RMI 2012)' normu çerçevesinde deneysel testler gerçekleştirilmiş olup, bağlantı tiplerinin moment-dönme ilişkileri elde edilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre göz önüne alınan her bir farklı bağlantı tipi için hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) performans seviyeleri belirlenmiştir (Şekil 3). Deneysel testlerden edilen verilere göre kiriş-kolon bağlantıları çoklu lineer bağlantı elemanı olarak tanımlanmış olup ilgili modellerin bazılarında deneylerde oluşan plastik deformasyon durumlarına göre plastik mafsal tanımı yapılmıştır [9]. Depo raf sistemlerinin yapısal performansları malzeme özellikleri, kiriş-kolon bağlantı detayı, palet yüklerinin düzeni, malzeme imalat hataları gibi unsurlardan etkilendiği için bu sistemlerdeki belirsizlikler dinamik davranışlarını da önemli ölçüde değiştirmektedir. Malzeme özelliklerinin ve bağlantı detaylarının mühendislik talep parametreleri üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada yapısal sistemlerde meydana gelen hasarı tahmin etmek için üç farklı parametre seçilmiştir: i) maksimum kat ötelenmesi, ii) kiriş-kolon bağlantılarındaki maksimum dönme ve iii) taban plakasındaki maksimum dönme. Performans seviyeleri için üç sınır durum dikkate alınmıştır: Hemen Kullanım (IO), Can Güvenliği (LS) ve Göçme Öncesi (CP). Uluslararası standartlarda depo raf sistemlerine ait herhangi bir performans seviyesi belirtilmediği gerekçesiyle göz önüne alınan her bir sınır durum için mühendislik parametrelerinin kapasite değerleri, doğrusal olmayan statik itme analizleri, değişen akma momenti kapasiteleri, kiriş-kolon ve taban-plaka bağlantı kapasiteleri değerlendirilerek elde edilmiştir. Belirlenen üç hasar limit durumuna göre oluşturulan kırılmalık eğrileri Şekil 4' de verilmiştir [10].

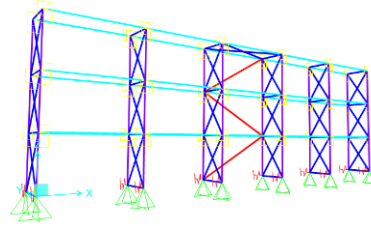


Şekil 4. Farklı hasar durumlarına göre kırılmalık eğrileri

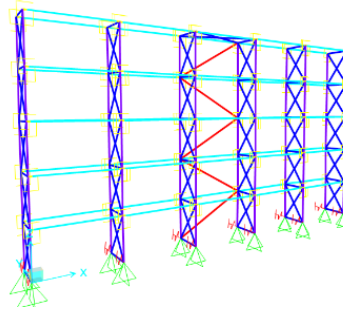
Depo raf sistemlerinin deprem davranışlarını 3 farklı limit hasar seviyesine göre değerlendirildiği çalışmada, bu hasar seviyeleri maksimum katlar arası ötelenme ve maksimum kolon-kiriş bağlantı dönmelerine göre belirlenmiştir. Raf sistemlerine ait limit sınır değerleri olmamasından dolayı her bir limit değeri doğrusal olmayan statik itme analizi ile elde edilmiştir. Şekil 3' de tanımlanan hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) hasar sınırlarını sırasıyla %1, %2 ve %4 görelî kat ötelenmesi oranı olarak belirlenmiş olup artımsal dinamik analizi ile elde edilen IDA grafikleri doğrultusunda 3 farklı hasar seviyesine göre kırılmalık eğrilerini oluşturmuştur [11].

Materyal ve Metot

Burada sunulan çalışmada Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nde konumlandığı düşünülen 3- ve 5-katlı endüstriyel depo raf sistemlerinin yapısal modelleri sonlu elemanlar programı aracılığıyla modellenmiştir (Şekil 5 ve 6). Yapısal modellerde kat yüksekliği 1500 mm aks açıklıkları ise 2700 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Yanal stabilitenin sağlanması amacıyla EN 15512 ve EN 16681 normları çerçevesinde yapısal modeller orta aksta düşey ve yatay doğrultuda tek çerçevede çapraz elemanlar kullanılarak tasarlanmıştır.

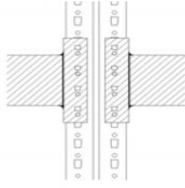


Şekil 5. 3 katlı yapısal model

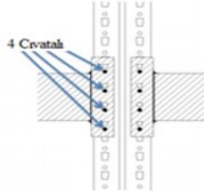


Şekil 6. 5 katlı yapısal model

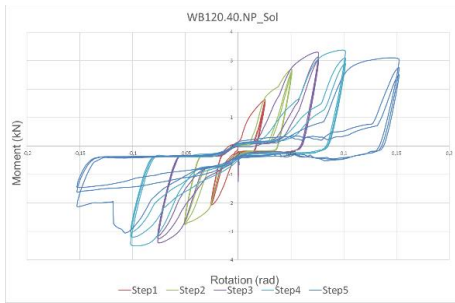
Oluşturulan yapısal modellerde kolon-kiriş bağlantı noktalarının moment-eğrilik ilişkileri literatürde yer alan detaylı deneysel çalışmanın bulgularından alınmıştır [9]. Şekil 9 ile 12 arasında moment eğrilik ilişkileri gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında yapısal modeller oluşturulurken, kolon-kiriş bağlantı detayının yapısal davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 2 tip bağlantı detayı göz önüne alınmış ve ilgili bağlantılar 4 civatalı (WB. 120.40.4P) ve kancalı (WB.120.40.NP) bağlantılar olarak belirlenmiştir (Şekil 7 ve 8).



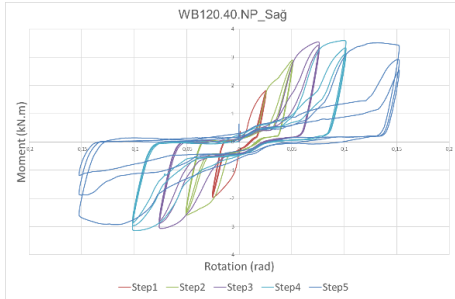
Şekil 7. Kancalı WB.120.40.NP bağlantı tipi



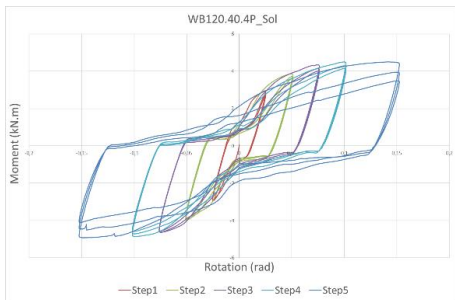
Şekil 8. 4-Civatalı WB.120.40.4P bağlantı tipi



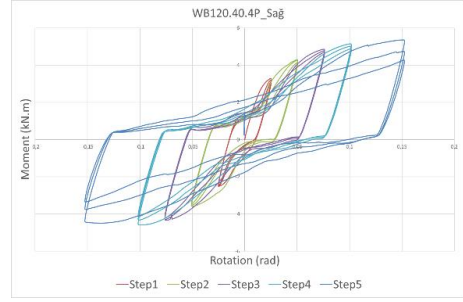
Şekil 9. WB120.40.NP_Sol moment eğrilik ilişkileri



Şekil 10. WB120.40.NP_Sağ moment eğrilik ilişkileri



Şekil 11. WB120.40.4P_Sol moment eğrilik ilişkileri



Şekil 12. WB120.40.4P_Sağ moment eğrilik ilişkileri

Oluşturulan yapısal modeller için koridor doğrultusundaki davranış göz önüne alınmıştır. Depo raf sistemlerinin kiriş-kolon bağlantı rijitlikleri deprem performansını belirlemektedir. Literatürde yer alan çalışmada koridor doğrultusunda depo raf sistemlerinin göçme durumu incelenmektedir [5]. Yapısal modelde doğrusal olmayan davranışın kiriş-kolon birleşim bölgelerinde olduğu kabul edilmekte ve bu kabule göre kiriş ve kolon elemanlarının davranışları elastik sınırlar içerisinde kalmaktadır. Kolon-kiriş birleşimleri SAP2000 programında multilinear plastik link eleman olarak tanımlanmıştır [8].

Doğrusal olmayan statik itme analizi

Türkiye Deprem Tehlike Haritası göz önüne alınarak Gebze Organize Sanayi Bölgesi'nde yer aldığı düşünülen yapısal sistemlerin doğrusal olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar programı olan SAP2000 ile kurulan yapısal modellerin hâkim doğal titreşim mod şekli genliği ile orantılı yatay yük dağılımları belirlenmiştir. Taban kesme kuvveti – tepe yer değiştirmesi ilişkisi olarak itme eğrileri elde edilmiş ve daha sonra bu eğrilerin koordinatları dönüştürülmesiyle modal tek serbestlik dereceli sisteme ait modal ivme – modal yer değiştirme ilişkisi olarak modal kapasite diyagramları elde edilmiştir. Talep yer değiştirmeleri göz önüne alınarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yenilenmiş ve göz önüne alınan her bir yapısal model için koridor yönündeki itme eğrisi elde edilmiştir [23].

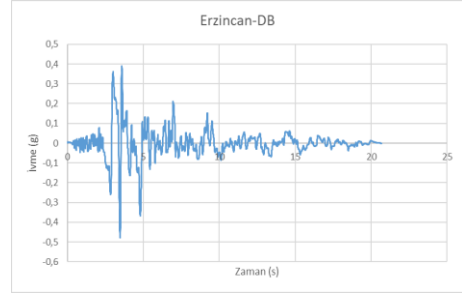
Doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz

Şekil 5 ve 6'da görülen iki farklı yüksekliğe sahip yapısal modellerin analitik yöntemler kullanılarak kırılma eğrilerini elde etmek üzere artımsal dinamik analiz yöntemi uygulanmıştır [24]. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerinde kullanılmak üzere kuvvetli yer hareketi kayıtları PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) <https://ngawest2.berkeley.edu> internet sitesinden alınmış olup 11 deprem kaydı takımı seçilmiştir. Seçilen deprem kayıtlarına ait özellikler Tablo 1'de ve ivme zaman serileri doğrultuları da verilerek (KG: Kuzey-Güney, DB: Doğu-Batı) Şekil 13 ile 34 arasında sunulmaktadır. Maksimum hız (Vmax) Maksimum ivme (Amax) olarak gösterilmiştir. Seçilen kuvvetli yer hareketleri maksimum yer ivmesi (Peak Ground Acceleration -PGA) değerleri, $g: 9.81 \text{ m/s}^2$ olmak üzere 0.1 g 'den 2.0 g 'ye kadar 0.1 g artımlar ile ölçeklendirilmiş ve böylelikle çalışma kapsamında göz önüne alınan her bir

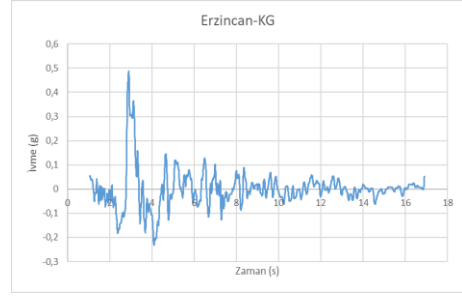
yapısal model 440 adet ölçeklendirilmiş deprem kaydı etkisinde analiz edilmiştir. Maksimum hız (Vmax) Maksimum ivme (Amax)

Tablo 1. Kuvvetli yer hareketi kayıtları.

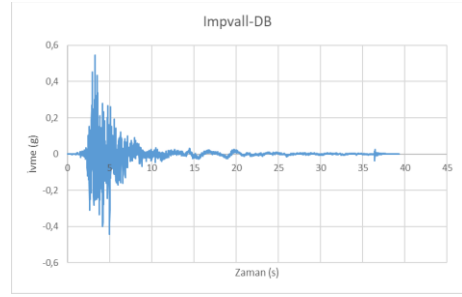
Kayıt No	Yatay Deprem Kaydı	PGA (g)	Vmax / Amax (sec)
1	RSN1614_Düzce-DB	0.527	0.235
2	RSN1614_Düzce-KG	0.584	0.115
3	RSN821_Erzincan-DB	0.479	0.135
4	RSN821_Erzincan-KG	0.489	0.161
5	RSN180_Impvall-DB	0.546	0.054
6	RSN180_Impvall-KG	0.534	0.099
7	RSN1083_Northr-DB	0.131	0.103
8	RSN1083_Northr-KG	0.156	0.105
9	RSN755_LomaP-DB	0.154	0.094
10	RSN755_LomaP-KG	0.477	0.089
11	RSN1633_Manjil_Abbar-DB	0.552	0.072
12	RSN1633_Manjil_Abbar-KG	0.491	0.099
13	RSN4482_L_aquila-DB	0.392	0.079
14	RSN4482_L_aquila-KG	0.451	0.055
15	RSN1108_Kobe-DB	0.283	0.202
16	RSN1108_Kobe-KG	0.313	0.112
17	RSN3475_ChiChi-DB	0.448	0.070
18	RSN3475_ChiChi-KG	0.522	0.065
19	RSN265_Vict-DB	0.618	0.054
20	RSN265_Vict-KG	0.511	0.033
21	RSN4352_UbMarche-DB	0.485	0.068
22	RSN4352_UbMarche-KG	0.366	0.075



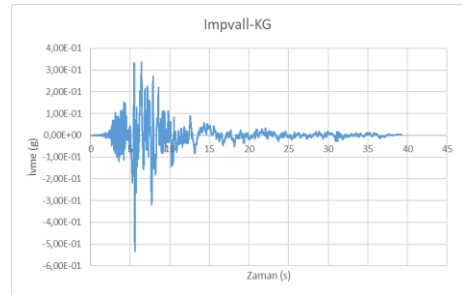
Şekil 15. RSN821_Erzincan-DB



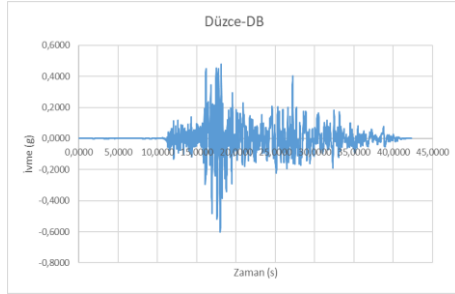
Şekil 16. RSN821_Erzincan-KG



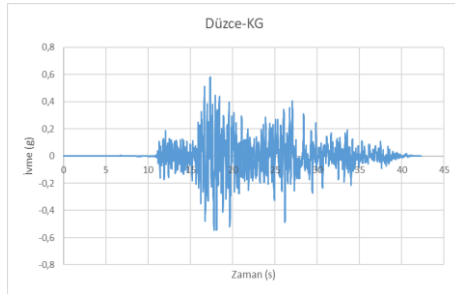
Şekil 17. RSN180_Impvall-DB



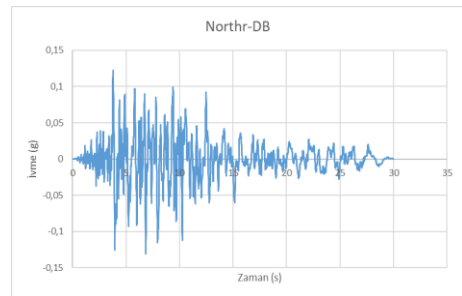
Şekil 18. RSN180_Impvall-KG



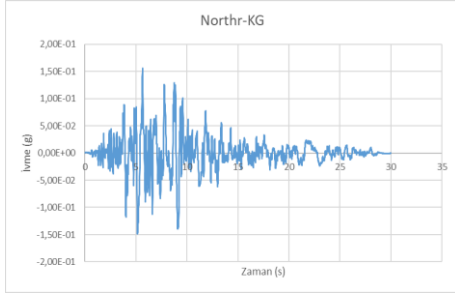
Şekil 13. RSN1614_Düzce-DB



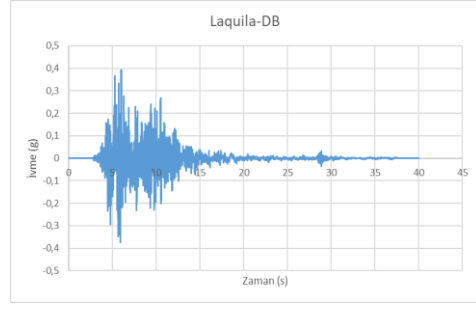
Şekil 14. RSN1614_Düzce KG



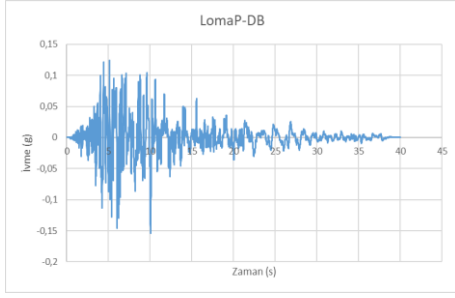
Şekil 19. RSN1083_Northr-DB



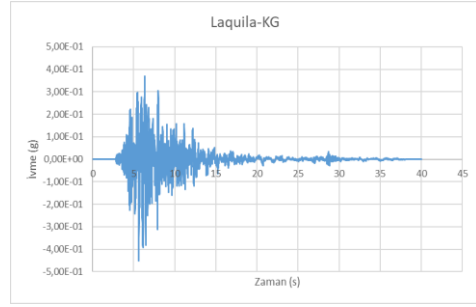
Şekil 20. RSN1083_Northr-KG



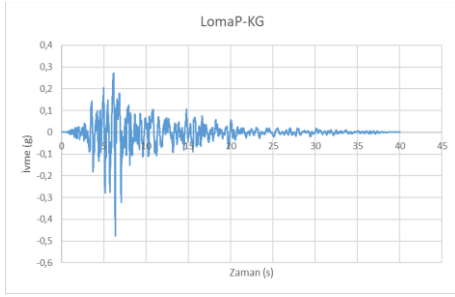
Şekil 25. RSN4482_Laquila-DB



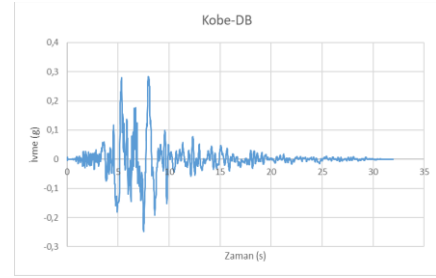
Şekil 21. RSN755_LomaP-DB



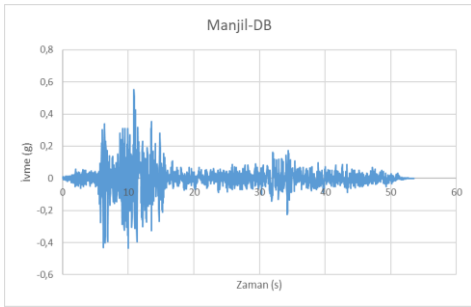
Şekil 26. RSN4482_Laquila-KG



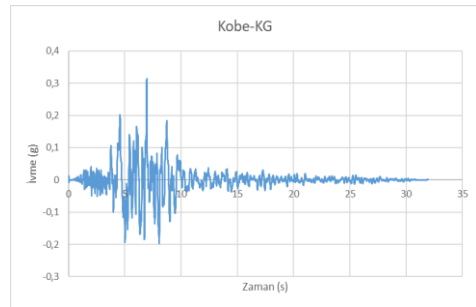
Şekil 22. RSN755_LomaP-KG



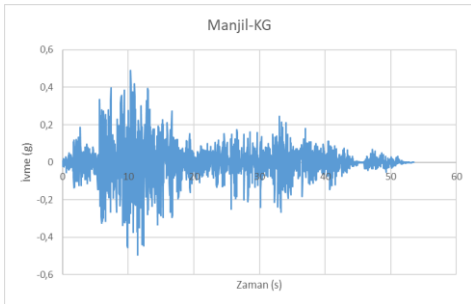
Şekil 27. RSN1108_Kobe-DB



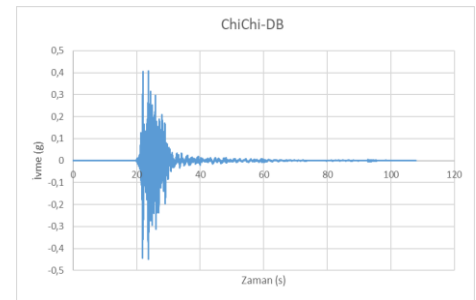
Şekil 23. RSN1633_Manjil_Abbar-DB



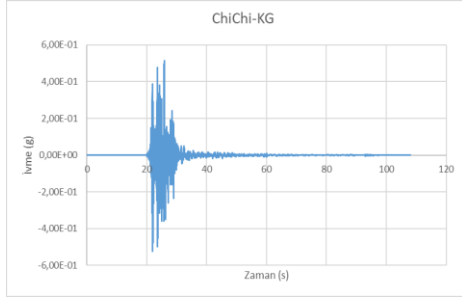
Şekil 28. RSN1108_Kobe-KG



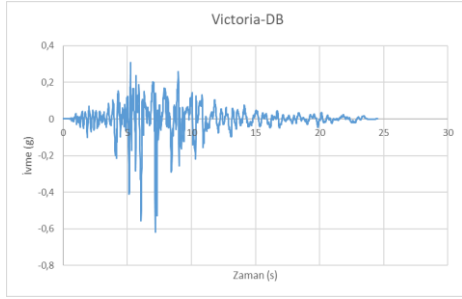
Şekil 24. RSN1633_Manjil_Abbar-KG



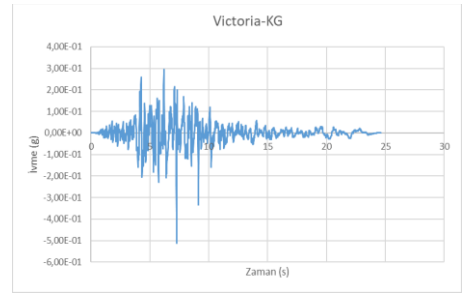
Şekil 29. RSN3475_ChiChi-DB



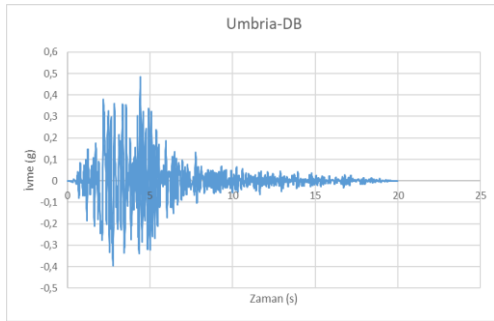
Şekil 30. RSN3475_ChiChi-KG



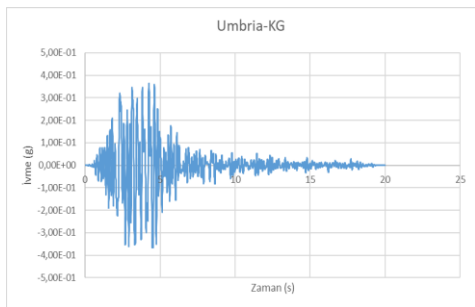
Şekil 31. RSN265_Vict-DB



Şekil 32. RSN265_Vict-KG



Şekil 33. RSN4352_UbMarche-DB

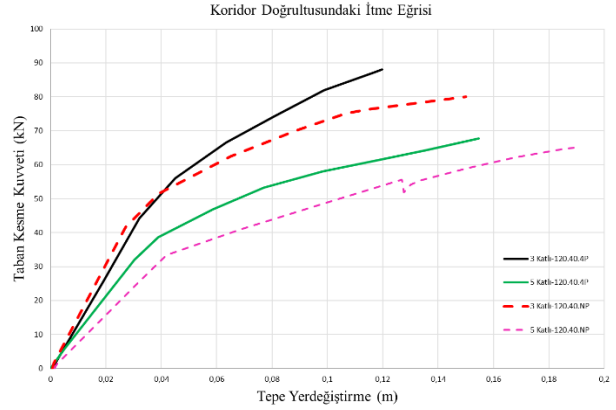


Şekil 34. RSN4352_UbMarche-KG

Araştırma ve bulguları

Doğrusal olmayan itme analizi

Talep yerdeğiştirmeleri göz önüne alınarak doğrusal olmayan statik itme analizleri yenilenmiş, göz önüne alınan her bir yapısal model için koridor yönündeki itme eğrisi elde edilmiş ve karşılaştırılmalı kapasite diyagramları Şekil 35’de sunulmuştur.



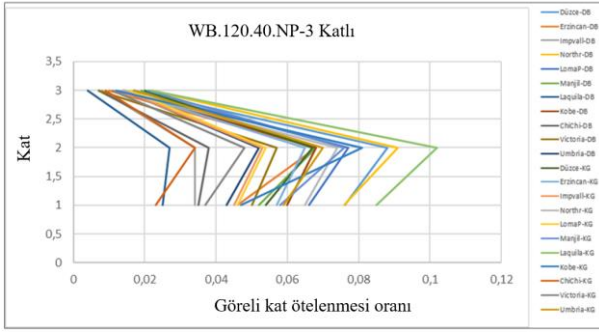
Şekil 35. Koridor doğrultusundaki itme eğrisi.

Şekil 7 ve 8’de verilen 3 ve 5 katlı 4-civatalı WB.120.40.4P yapı modelleri 3 ve 5 katlı kancalı WB.120.40.NP yapı modellerine göre daha çok taban kesme kuvveti taşımakla beraber daha az tepe yerdeğiştirmesi yaptığı tespit edilmiştir. 5 Katlı modellerde taban kesme kuvveti kapasitesi 3 katlı modellere göre daha düşük çıkmakta ama tepe yerdeğiştirmeleri artmaktadır.

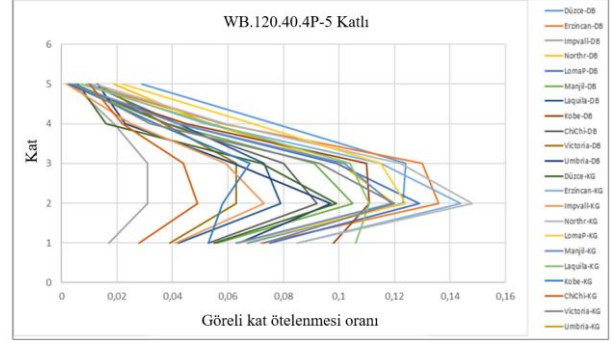
Doğrusal olmayan artımsal itme analizi

IDA görel kat ötelenmesi sonuçları

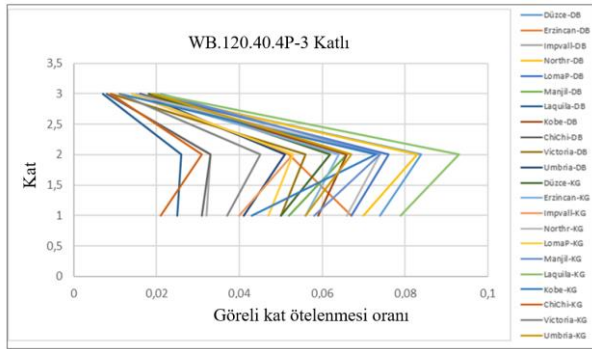
Bu bölümde deprem kayıtları etkisi altında gerçekleştirilen IDA analizi doğrultusunda elde edilen görel kat ötelenmesi sonuçları yer almaktadır. Seçilen depremlerim maksimum ivme değerleri birbirine yakın olsa da Tablo 1 ‘de gösterildiği üzere kayıtların frekans içeriğini tanımlayan bir parametre olan V_{max} / A_{max} oranı açısından değerlendirildiğinde farklılıklar göstermektedir. Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının frekans içeriklerindeki bu farklılık Şekil 36 ile Şekil 39 arasında verilmiş olan görel kat ötelenmeleri dağılımlarında kendini göstermektedir. İlgili şekilllerde görüldüğü üzere modellerde en fazla görel kat ötelenmesi oranı ikinci katta gözlemlenmiştir. 3 katlı yapısal modellerde kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modelin görel kat ötelenmesi oranı 4 civatalı modele göre daha fazladır. Buradan da anlaşıldığı üzere bağlantıların moment taşıma kapasiteleri arttıkça yapısal modellerin yer değiştirmeleri azalmaktadır.



Şekil 36. 3 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.NP)



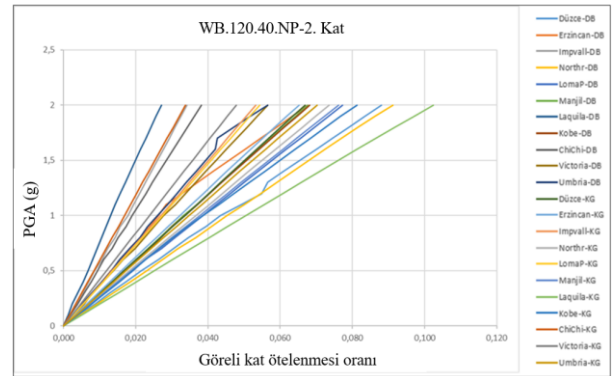
Şekil 39. 5 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.4P).



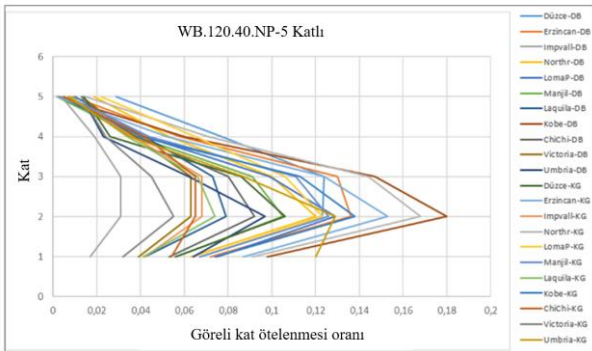
Şekil 37. 3 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.4P)

5 katlı yapısal modellerde de kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modelin görel kat ötelenmesi oranı 4 civatalı modele göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak kat sayısı arttıkça katlara ait görel kat ötelenmesi oranında artış gözükülmektedir.

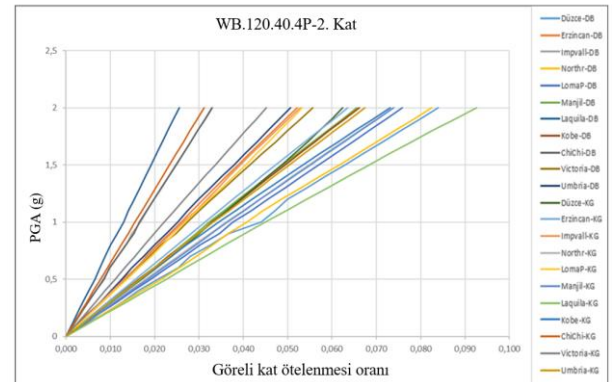
Çalışma kapsamında göz önüne alınan yapısal modeller için elde edilen IDA eğrileri en fazla kat ötelenme oranının meydana geldiği 2.kat için Şekil 40 ile 43 arasında verilmiştir.



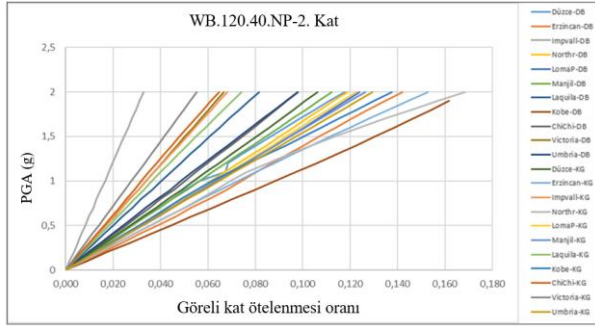
Şekil 40. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



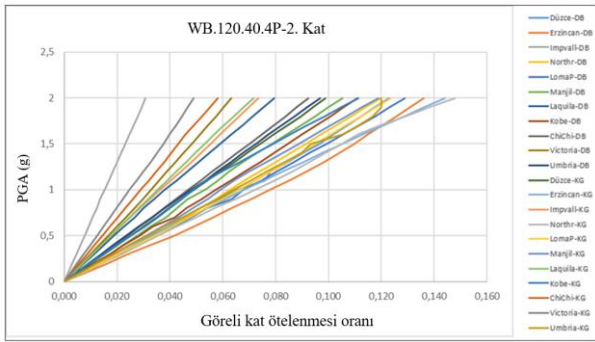
Şekil 38. 5 Katlı model görel kat ötelenmesi oranı değişimi (WB.120.40.NP).



Şekil 41. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.4P).



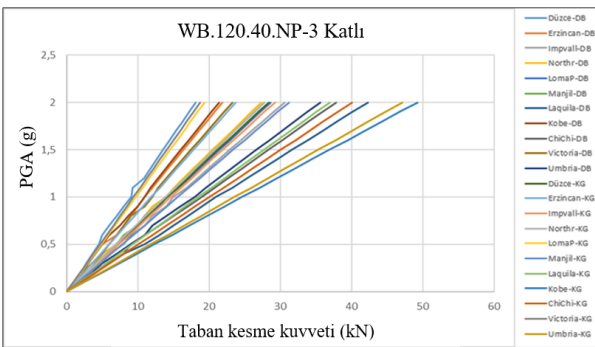
Şekil 42. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.NP)



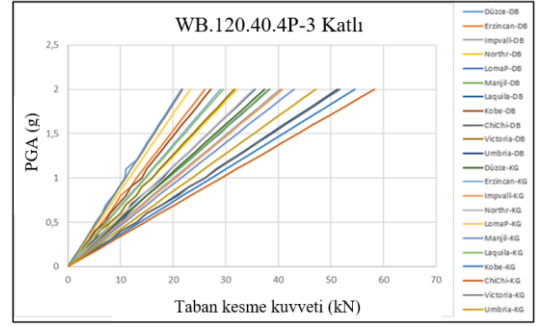
Şekil 43. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait 2. kat görel kat ötelenmesi IDA eğrileri (WB.120.40.4P)

IDA görel kat ötelenmesi sonuçları

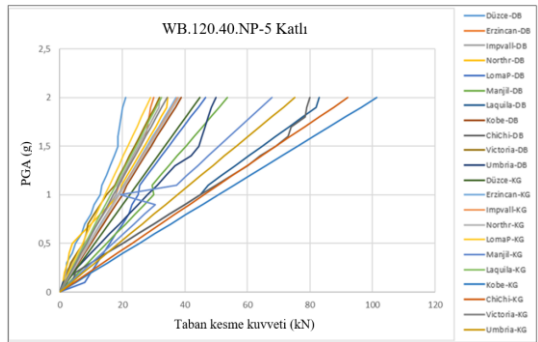
Bu bölümde deprem kayıtlarına göre elde edilen taban kesme kuvveti sonuçları yer almaktadır. 3 ve 5 katlı yapısal modellerde kancalı (WB.120.40.NP) ve 4 civatalı (WB.120.40.4P) bağlantıların grafiklerine bakıldığında kancalı birleşimlere sahip modellerin taban kesme kuvvetleri 4 civatalı modellerde daha azdır. Buna ek olarak kat sayısı arttıkça taban kesme kuvvetinde artış gözükmemektedir. Çalışma kapsamında göz önüne alınan yapısal modeller için elde edilen IDA taban kesme kuvveti eğrileri Şekil 44 ile 47 arasında verilmiştir.



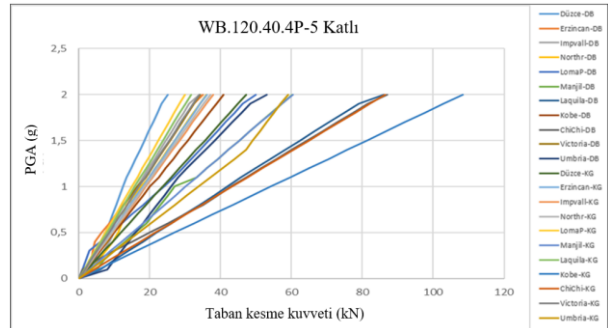
Şekil 44. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



Şekil 45. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 3 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.4P).



Şekil 46. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.NP).



Şekil 47. Seçilen 22 deprem kaydı etkisinde 5 katlı modele ait taban kesme kuvveti IDA eğrileri (WB.120.40.4P)

Kırılgnalık analizi

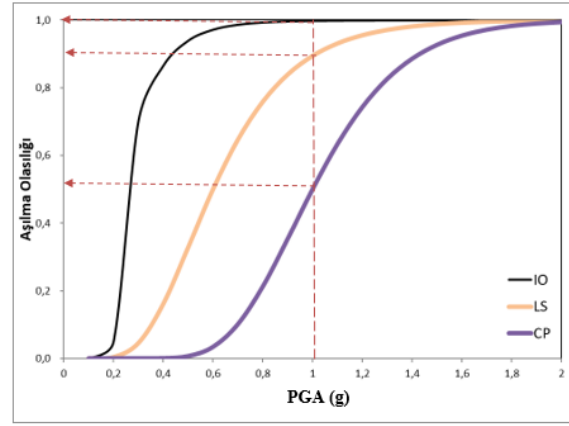
Kırılgnalık analizi deprem etkisi altındaki yapısal performansını değerlendirmeyi amaçlamakta ve özellikle son yıllarda binaların risk analizlerinin belirlenmesi amacıyla çok sayıda araştırmacının ilgi alanına girmiş bulunmaktadır. Kırılgnalık eğrilerinin yapısal performans değerlendirilmesinde kullanılmıyyla hasar analizlerinin yapılması çok daha güvenilir olmaktadır. Özeldde bir yapı genelde ise bir yapı stoku göz önüne alınarak kırılgnalık eğrilerinin geliştirilmesi için temel olarak yapısal kapasite limitlerine (hasar sınır durumlarına) ve yer hareketi şiddet parametresinin ölçüsü olan talep modellerine ihtiyaç vardır.

Kırılgnlık, belirli bir sismik risk altında tanımlanan deprem etkisinde, belirli bir mühendislik talep parametresinin sınır durumunun aşılmasının koşullu olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle analitik yöntemler kullanılarak elde edilen bu eğriler tanımlanan bir hasar limit durumunun aşılma olasılığını bir yer hareketi şiddet parametresi ile ilişkilendirmektedir.

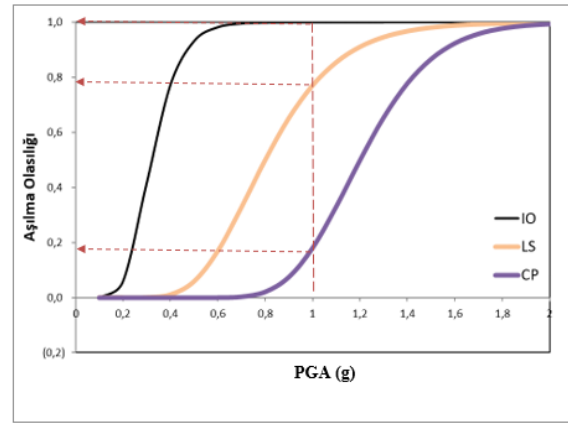
Kırılgnlık analizinde en temel unsur yapısal kapasite limitlerine ait hasar sınır durumlarının tanımlanmış olmasıdır. Bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalarda, depo raf sistemlerine ait tanımlı yapısal hasar sınırlarının olmamasından dolayı, doğrusal olmayan statik analiz yöntemi uygulanarak elde edilen yapısal kapasite eğrileri doğrusal olmayan artımsal dinamik analiz sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Kesme kuvvet kapasiteleri, ötelenme oranları ve moment-dönme ilişkileri gözönüne alınarak yapılan değerlendirmeler neticesinde hasar sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3’de görülen 3 sınır durum göz önüne alınmıştır: hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP). Bu hasar durumları için belirlenen sınırlar sırasıyla %0,6, %1,6 ve %3,0’ dır. Hemen kullanım performans seviyesini işaret etmekte olan limit durum için 3- ve 5-katlı yapısal modellerde ortalama olarak kuvvet kapasitesinin sırasıyla %50, %52 mertebelerine ulaştığı değerlendirilmiştir. Can güvenliği sınır durumu olarak kabul edilen noktada ise kuvvet kapasitesinde sırasıyla %80, %84 mertebelerinde ulaşılmaktadır. Literatürde çelik depo raf sistemlerinin deprem davranışlarını belirlemek amacıyla FEMA 356’da moment aktaran çelik çerçeveler için görel kat ötelenmesi göz önüne alınarak belirtilmiş olan hasar limit değerleri kullanılmıştır [12]. Bu sınır değerler hemen kullanım (IO) için %0,7, can güvenliği (LS) için %2,5 ve göçme öncesi (CP) için %5,0’ dir. Merkezi çaprazlı sistemler için bu sınır değerler sırasıyla %0,5, %1,5 ve %2,0’ dir. Buradan da görüldüğü üzere yapılan bu çalışma kapsamında belirlenmiş olan sınır değerler moment aktaran ve merkezi çaprazlı çerçeveler için tanımlanmış olan sırasıyla %0,7 (IO), %2,5 (LS), %5,0 (CP) ve %0,5 (IO), %1,5 (LS), %2,0 (CP) hasar limit durumlarının arasında kalmaktadır. Göz önüne alınan yapısal modeller incelendiğinde elde edilen bu bulgunun uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında belirlenen hasar limit durumları göz önüne alınarak kırılgnlık analizleri gerçekleştirilmiş ve bu amaçla olasılıksal yaklaşım kullanılmıştır [13]. Şekil 48 ile 51 arasında görüldüğü gibi kırılgnlık eğrileri elde edilmiştir. 3-katlı kancalı bağlantılı (WB.120.40.NP) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım (IO), can güvenliği (LS) ve göçme öncesi (CP) hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla %100, %89 ve %50 olduğu görülmektedir. 3- katlı 4 civata bağlantılı (WB.120.40.4P) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme öncesi hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla olasılıkları sırasıyla %100, %77 ve %18 olduğu görülmektedir. 5- katlı kancalı bağlantılı (WB.120.40.NP) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme

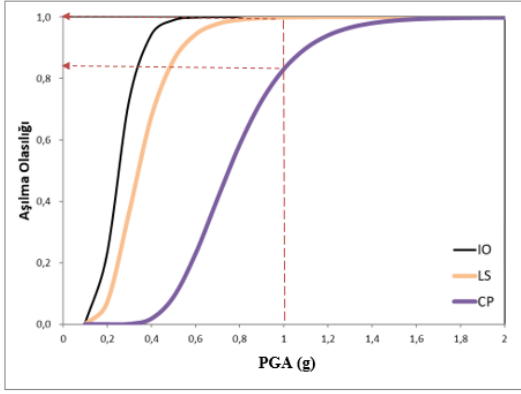
öncesi hasar limit durumlarının aşılması olasılıkları sırasıyla %100, %100 ve %83 olduğu görülmektedir. 5-katlı 4-civatalı bağlantılı (WB.120.40.4P) modeller için maksimum yer ivmesinin 1.0 g olması durumunda, hemen kullanım, can güvenliği ve göçme öncesi hasar limit durumlarının aşılması %100, %100 ve %74 olduğu görülmektedir. Kırılgnlık eğrileri sonuçları değerlendirildiğinde yapı modelleri teşkil edilirken kancalı bağlantılar yerine 4 civatalı bağlantı kullanılmasının farklı yüksekliğe sahip modellerin yapısal hasar potansiyelini azalttığı bulgusu elde edilmiştir. Kat yüksekliği arttıkça göz önüne alınan her bir sınır durum için hasar görme olasılığının da arttığı kırılgnlık analizi sonuçlarından görülmektedir.



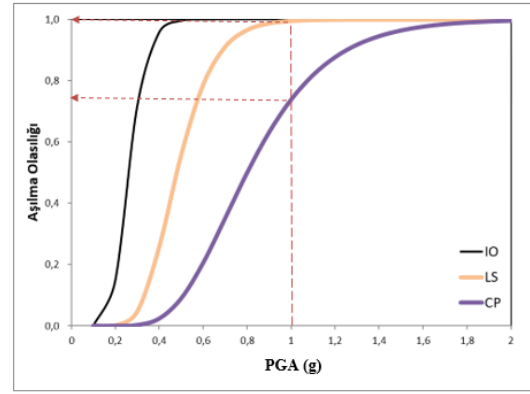
Şekil 48. 3 Katlı model kırılgnlık analiz sonuçları (WB.120.40.NP)



Şekil 49. 3 Katlı model kırılgnlık analiz sonuçları (WB.120.40.4P)



Şekil 50. 5 Katlı model kırılma olasılığı analiz sonuçları (WB.120.40.NP)



Şekil 51. 5 Katlı model kırılma olasılığı analiz sonuçları (WB.120.40.4P)

Sonuç

Depo raf sistemleri lojistik tedarik zincirinin en önemli unsurlarındandır. Kiriş-kolon bağlantı tipleri ve yapı yüksekliği, sismik yükleme altında sistemin genel performansında önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez kapsamında 3- ve 5-katlı yapısal modellerde kolon-kiriş bağlantı detayının yapısal davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla 2 tip bağlantı detayı göz önüne alınmış ve ilgili bağlantılar 4 cıvatalı (WB. 120.40.4P) ve kancalı (WB.120.40.NP) bağlantılar olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar programı olan SAP2000 ile sayısal modeller kurulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmede doğrusal olmayan statik itme analizi ve doğrusal olmayan dinamik itme analizi yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemine göre elde edilen sonuçlar;

3-katlı yapısal modellerin taban kesme kuvveti taşıma kapasiteleri 5-katlı modellere göre daha fazla, 3-katlı modellerin tepe deplasman talep değerleri 5-katlı modellere göre daha az olduğu görülmektedir. Buradan elde edilen sonuçlara göre 3-katlı modellerin 5-katlı modellere göre daha rijit bir yapısal taşıyıcı sisteme sahip oldukları söylenebilir.

Kaynakça

- [1] N. Baldassino, C. Bernuzzi, "Analysis and Behaviour of Steel Storage Pallet Racks" Thin-Walled Structures, 37(4), 277-304, 2000.
- [2] C. Aguirre, "Seismic behaviour of Rack Structures", Journal of Constructional Steel Research 61:607-624, 2004. doi:10.1016/j.jcsr.2004.10.001
- [3] K.M. Bajoria, K.K. Sangle and R.S. Talicotti "Modal Analysis of Cold-formed Pallet Rack Structure with Semi-rigid Connections", Journal of Constructional Steel Research 66:428-441, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.10.005
- [4] L. Dai, X. Zhao and K.J.R. Rasmussen, "Cyclic Performance of Steel Storage Rack Beam-to-Upright Bolted Connections", Journal of Constructional Steel Research 148:28-48, 2018.
- [5] A. Filiatrault, E.B. Robert and M.G. Mahoney, "Performance-Based Seismic Design of Pallet-Type Steel Storage Racks", Earthquake Spectra 22(1), 2006.
- [6] F. Petrone, P.S. Higgins, N.P. Bissonnette, A.M. Kanvinde, "The Cross-Aisle Seismic Performance of Storage Rack Base Connections", Journal of Constructional Steel Research 122:520-31, 2016.

- [7] L. Yin, G. Tang, Z. Li, M. Zhanga and B. Feng, "Responses of Cold-Formed Steel Storage Racks with Spine Bracings Using Speed-Lock Connections with Bolts I: Static Elastic-Plastic Pushover Analysis", *Thin-Walled Structures* 125(January):51–62, 2018.
- [8] L. Yin, G. Tang, Z. Li and M. Zhang, "Responses of Cold-Formed Steel Storage Racks with Spine Bracings Using Speed-Lock Connections with Bolts II: Nonlinear Dynamic Response History Analysis", *Thin-Walled Structures* 125(January):89–99, 2018.
- [9] B. Elkadi, "Behavior of Cold Formed, Thin-Walled, Rack Type Frames and Their Use in Building Structures", PhD, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, 2019
- [10] G. Gabbianelli, F. Cavalieri, R. Nascimbene, "Seismic Fragility Curves of Steel Storage Pallet Racks", *SPONSE – 4th International Workshop on the Seismic Performance of Non-Structural Elements* 363–77, 2019
- [11] M. Jaradat, "Investigation of Industrial Storage Rack Systems Under Earthquake Loads", Msc, Gebze Technical University, 2020.
- [12] N. Asawasongkram, P. Chomchuen, P. Premthamkorn, "Seismic Performance Evaluation of Steel Storage Racks Using Experimental Results of Beam-to-Column Connection", *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul*, 2014.
- [13] J.W. Baker, "Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis", *Earthquake Spectra* 31(1):579–99, 2015.
- [14] BS EN 16681:2016, BSI Standards Publication *Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Seismic Design.*, British Standards Institution.
- [15] BS EN 15512:2009, *Steel Static Storage Systems — Adjustable Pallet Racking Systems — Principles for Structural Design.*, British Standards Institution.
- [16] Eurocode 3. Design of Structures for Earthquake Resistance, EN 1998-1, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [17] Eurocode 3. Design of Structures for Earthquake Resistance, EN 1998-1, Part 1, General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [18] FEMA-273, *NHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 1997.
- [19] FEMA-356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [20] FEMA-440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Federal Emergency Management Agency, 2005.
- [21] RMI, *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks*, Rack Manufacturers Institute, 2012.
- [22] TBDY, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Türk Standartları Enstitüsü*, 2018.
- [23] ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1* by Applied Technology Council, California Seismic Safety Commission.
- [24] D. Vamvatsikos, C.A. Cornell, "Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002.