

GÜNÜMÜZ TASARIM YÖNTEMLERİNİN BETONARME BİNALARIN DEPREM PERFORMANSINA ETKİSİNİN PARK-ANG HASAR İNDEKSİ İLE BELİRLENMESİ

Muzaffer BÖREKÇİ *

Alınma: 21.11.2019; düzeltme: 03.02.2020; kabul: 15.02.2020

Öz: Bilindiği üzere Türkiye'deki yapı stoğunun büyük bir kısmı deprem güvenilirliği düşük binalardan oluşmaktadır ve bu binaların şiddetli depremler altında ağır hasar görebilme ve hatta göçme olasılıkları yüksektir. Bu sebeple, deprem güvenilirliği yüksek yapılar tasarlamak veya mevcut yapıların deprem güvenilirliğini doğru belirlemek için kullanılan hesap yöntemlerinin gerçeğe en yakın sonuçlar verecek yöntemler olması gerekmektedir. Deprem güvenilirliğinin belirlenmesinde şekil değiştirmeye göre tasarım yaklaşımı yaygınlaşmakta, deprem yönetmeliklerinde neredeyse zorunlu hale getirilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018, performansla dayalı tasarımda hasar sınırları olarak malzeme birim şekil değiştirmelerini ve/veya plastik dönmeleri kullanmaktadır. Fakat bilindiği üzere deprem yükleri çevrimsel yüklerdir ve çevrim sayısına bağlı olarak sönmülenen enerji, buna bağlı olarak da birikimli hasar değişmektedir. Hem yer değiştirmeye bağlı sünekliği hem de bu birikimli hasarı dikkate alan hasar indeksi yöntemleri, hasar seviyesinin elde edilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu çalışmada, 1975 yılı Türk Deprem Yönetmeliği koşullarına göre tasarlanmış ve inşa edilmiş mevcut bir betonarme okul binasının deprem performansı ve aynı binanın TBDY 2018'e göre tasarlanması durumundaki deprem performansı hasar indeksi yöntemlerinden biri olan Park-Ang Hasar İndeksi ile araştırılmıştır. Analitik modeli IDARC bilgisayar programında hazırlanan binalarda zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılmış ve hasar indeksleri elde edilerek deprem performansları bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Deprem performansı, Hasar indeksi, Dinamik analiz, Göçme, Betonarme

Determination of the Effect of Modern-Day Designing Methods on Seismic Performance of RC Buildings by using Park-Ang Damage Index

Abstract: It is known that most of building stock in Turkey may suffer severe damage or collapse due to strong earthquakes. Thus, reliable methods should be used in earthquake resistant design or in the performance evaluation of existing buildings. Deformation-based design approach is becoming widespread and is almost made compulsory by earthquake regulations in determination of earthquake reliability. Turkish Seismic Code for Buildings (TSCB) 2018 suggests material strains and/or plastic rotations as damage limit in performance-based design. However, as it is known, earthquake is a cyclic load and the damped energy and consequently the accumulated damage change depending on the number of cycles. Damage index methods, which take into account displacement ductility and the cumulative damage, are effective in the estimation of the damage level. In this study, the seismic performance of an existing reinforced concrete school building designed and built in accordance with the Turkish Seismic Code of 1975 and the seismic performance of the same building, which is designed according to TSCB 2018 were investigated using the Park-Ang Damage Index. Non-linear time history analyses were performed for the buildings whose analytical models were prepared via IDARC computer program and seismic performance were obtained by considering damage indices.

Keywords: Seismic performance, Damage Index, Dynamic analysis, Collapse, Reinforced Concrete

* Yıldız Teknik Üniversitesi, Davutpaşa Kampüsü, İnşaat Müh. Bölümü, 34220, Esenler, İstanbul
İletişim Yazarı: Muzaffer Börekçi (mborekci@inm.yildiz.edu.tr)

1. GİRİŞ

Ülkemiz, şiddetli depremlerin yaşandığı bir kuşakta yer almaktadır. Can ve mal kayıplarının yaşanmaması açısından, inşa edilecek binaların bu şiddetli depremlerde yeterli güvenliği sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle, inşa edilecek binaların depreme dayanıklı bir şekilde tasarlanması, mevcut binaların ise öngörülen bir deprem durumunda güvenilirliğinin doğru bir şekilde elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bilgi ve teknolojiye gelişmeler, depreme dayanıklı yapı tasarımı alanında da ilerlemeler sağlamış, günümüz yönetmeliklerindeki daha modern yaklaşımlarla, deprem performansı daha yüksek binalar tasarlamamıza olanak kılmıştır. Genel olarak, binalar tasarlanırken dayanıma göre tasarım (DGT) kullanılmakta ve yapısal elemanlar (kolon, kiriş, perde vb.) öngörülen kesit etkilerini taşıyabilecek şekilde boyutlandırılmaktadır. Fakat yapılan çalışmalar göstermiştir ki, büyük depremler sırasında yapıda oluşan hasarlar büyük yerdeğiştirmelerden kaynaklanmaktadır. Bu bilgi ışığında, son yıllarda dayanıma göre tasarım yerine, şekil değiştirmeye göre tasarım (ŞDGT) tercih edilmeye başlanmış (Fajfar ve Krawinkler, 1997; Priestley, 2000) ve FEMA 356, ATC40, EC8, TBDY 2018 gibi birçok modern deprem yönetmeliği ŞDGT için yöntemler önermiştir. Bu yönetmeliklerde, ŞDGT, “performansa dayalı tasarım” (PDT) olarak isimlendirilmiştir. PDT, belirli bir deprem etkisinde yapıdaki elastik ötesi yerdeğiştirmeler için görece ötelemelere, eleman uçlarındaki plastik dönmelere veya elemanlardaki birim şekil değiştirmelere bağlı olarak hasar seviyelerinin elde edilmesi ve bu hasar seviyelerine bağlı olarak yapının deprem performansının elde edilmesi esasına dayanır (Zhang ve Tian, 2019). Elastik ötesi yerdeğiştirme esaslı bir tasarım, elastik ve kuvvet esaslı bir tasarıma göre yapı hasarını elde etmede daha gerçekçi olsa da, birçok araştırmacı deprem süresince oluşan çevrimsel plastik şekil değiştirmelerden kaynaklı tüketilen histeretik enerjinin daha iyi bir gösterge olduğunu savunmaktadır (Banon ve diğ., 1980; Zahrah ve Hall, 1984; Fajfar, 1992; Ghosh ve Collins, 2006; Negro, 1997; Ghosh ve diğ., 2011). Sönümlenmiş enerji, en büyük çatı yerdeğiştirmesi gibi anlık bir değer aksine birikerek artan (kümülatif) bir değerdir. Ghosh ve Collins (2006), birikerek artan enerji talebi ile sünellik talebini birleştiren Park-Ang hasar indeksinin (PAHİ) (Park ve Ang, 1985) potansiyel sismik hasarı en iyi tahmin edebilen ölçülerden biri olduğunu belirtmişlerdir. Bu yüzden, bu çalışma kapsamında yapı deprem performansı belirlenirken, sadece elastik ötesi yerdeğiştirmeye bağlı olarak eleman hasarını elde eden, TBDY 2018’in de önerdiği performans değerlendirmesi yerine, elastik ötesi yerdeğiştirme ile birlikte sönümlenen histeretik enerjiyi de dikkate alan Park-Ang hasar indeksi yöntemi kullanılacaktır.

Bu çalışmada, 1987 yılında inşa edilen ve Türk Deprem Yönetmeliği (TDY) 1975’e göre tasarlanmış betonarme bir okul binasının mevcut durumdaki deprem performansı ve bu okulun TBDY 2018 koşullarına göre tasarlanması durumunda sahip olacağı deprem performansı araştırılarak modern bir yönetmeliğin deprem performansına katkısı araştırılmak istenmiştir. Elastik ötesi davranışın ve deprem performansının elde edilebilmesi için her iki binanın analitik modeli IDARC bilgisayar programında hazırlanmıştır. IDARC, yapıların doğrusal olmayan statik ve dinamik analizini yaparak hasar durumunu elde eden bir analiz programıdır ve hasar indeksi doğrudan hesaplanmaktadır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapılarak Park-Ang hasar indeksi elde edilmiş, okul binasının hem mevcut durumunun, hem de günümüz yönetmeliğine göre tasarlanması durumunun deprem performansları belirlenmiştir.

2. HASAR İNDEKSİ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesi, güçlü veya çok güçlü depremlerde can güvenliğini tehlikeye atmadan yapılarda kontrollü bir hasara izin verilmesi esasına dayanır. Bu yaklaşımdan dolayı, hasarı sayısal olarak ifade edebilmek gerekmektedir ve “Hasar İndeksi” (Hİ) bu sayısal ifadenin elde edebilmesinde kullanılır. Hİ genelde 0 ile 1 arasında boyutsuz değerler olup, 0 (sıfır) hasarsız yapıyı, 1 ise tamamen hasarlı veya göçen yapıyı ifade etmektedir. 0 ile 1 arasındaki değer aralıkları ile hasarın derecesi belirlenir.

Hasar indekslerinin ilk versiyonları genellikle yerdeğiştirme ve dönme sünekliği olarak elde edilmiştir. Banon ve diğ. (1981) yapısal elemanların uçlarındaki dönme sünekliğini Denklem (1)'de görülen $H\dot{I}$ olarak ifade etmişlerdir..

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_m}{\theta_y} \quad (1)$$

Denklem (1)'de verilen θ_m en büyük dönmeyi, θ_y ise akma dönmesini ifade etmektedir. Denklem (1)'den açıkça görülmektedir ki, bu tür en büyük yerdeğiştirme veya dönmeye dayalı hasar parametreleri dayanım ve rijitlik azalmasını da içeren çevrimsel davranışı dikkate alamamaktadır. Literatürde önerilen “Esnek hasar indeksi” (Banon ve diğ., 1981) ve “geliştirilmiş esnek hasar indeksi” (Roufaiel ve Meyer, 1987) yöntemleri de yine çevrimsel davranışın etkisini dikkate alamayan farklı $H\dot{I}$ yaklaşımlarıdır. Histeretik çevrimin elastik ötesi kısmındaki tüm plastik dönmelerin toplamının akma dönmesine oranı olarak ifade edilen “Normalleştirilmiş birikimli dönme”, birikimli hasarı dikkate alan ilk hasar indekslerinden biridir (Banon ve diğ., 1981). Stephens ve Yao (1987), Wang ve Shah (1987), Powell ve Allahabadi (1988) yerdeğiştirme veya dönme esaslı birikimli hasar indeksleri; Jeong ve Ivan (1988), Chung ve diğ. (1989) çevrim sayısına bağlı düşük çevrim yorulma esaslı hasar indeksleri önermişlerdir. Zahrah ve Hall (1984), Hwang ve Scribner (1984) tüm çevrimlerde oluşan histeretik enerji talebine dayalı hasar indeksleri önermişlerdir.

Park ve Ang 1985'te sünekliği ve toplam (birikimli) histeretik enerji talebini birleştiren bir hasar indeksi önermişlerdir. Park-Ang Hasar İndeksi (PAHİ) Denklem (2)'de verilmiştir.

$$H\dot{I} = \frac{d_m}{d_u} + \frac{\beta}{V_y d_u} \int dE_h \quad (2)$$

Denklem (2)'de d_u monotonik statik yükleme altında son limit şekil değiştirme/yerdeğiştirme kapasitesi, d_m dinamik yükleme altında en büyük şekil değiştirme/yerdeğiştirme, dE_h artımsal histeretik enerji talebi, V_y akma dayanımı ve β pozitif boyutsuz bir katsayıdır.

Fajfar (1992), Carr ve Tabuchi (1993), Cosenza ve diğ. (1993), Kunnath ve Jenne (1994), Ghobarah ve diğ. (1999) farklı hasar indekslerinin etkinliklerini deneysel gözlemlerle karşılaştırmışlar ve PAHİ'nin deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiğini gözlemleyerek hasar indeksi olarak kullanılabileceğini önermişlerdir. Hem betonarme, çelik ve ahşap yapılarda kullanılabilmesi hem de farklı histeretik karakteristiklere uygulanabilmesi açısından PAHİ en çok tercih edilen hasar indeksidir.

IDARC programı binaların eleman bazında, kat bazında ve tüm sistem olarak deprem hasar seviyelerini PAHİ ile elde etmektedir. Yapı elemanlarının uçlarındaki hasarı elde edebilmek için PAHİ, Kunnath ve diğ. (1992) tarafından Denklem (3)'te verildiği şekilde IDARC programına adapte edilmiştir.

$$H\dot{I} = \frac{\theta_m - \theta_y}{\theta_u - \theta_y} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_h \quad (3)$$

Denklem (3)'te θ_m yükleme boyunca oluşan en büyük uç dönmesini, θ_u son limit dönme kapasitesini, θ_y akma dönmesini, M_y akma momentini, E_h ise kesitin sönümlendiği histeretik enerjiyi ifade etmektedir.

Bu çalışmada, deprem performansı, Denklem (3)'te verilen Değiştirilmiş Park-Ang Hasar İndeksi (DPAHİ) ile elde edilmiştir ve Denklem (3) doğrudan eleman için hasar indeksini vermektedir. Spesifik olarak kat hasarı ve tüm sistemin toplam hasarı eleman ve kat bazında sönümlenen histeretik enerjinin ağırlık faktörü ile elde edilir (Valles ve diğ., 1996).

$$H\dot{I}_{kat,j} = \sum_{i=1}^{n_e} (\lambda_i)_{eleman} (H\dot{I}_i)_{eleman} \quad (4)$$

$$H\dot{I}_{sistem} = \sum_{j=1}^{n_s} (\lambda_j)_{kat} (H\dot{I}_j)_{kat} \quad (5)$$

$$(\lambda_i)_{eleman} = \left(\frac{E_i}{\sum_{i=1}^{n_e} E_i} \right)_{eleman} \quad (6)$$

$$(\lambda_j)_{kat} = \left(\frac{E_j}{\sum_{j=1}^{n_s} E_j} \right)_{kat} \quad (7)$$

n_e , j katındaki elemanların sayısı, n_s toplam kat adedini, $(\lambda_i)_{eleman}$ bir elemanın sönümlendirdiği enerjinin bir kattaki tüm elemanların sönümlendirdiği toplam enerjiye oranı, $(\lambda_j)_{kat}$ ise bir katta sönümlenen toplam enerjinin tüm sistemde sönümlenen toplam enerjiye oranıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Bina Özellikleri

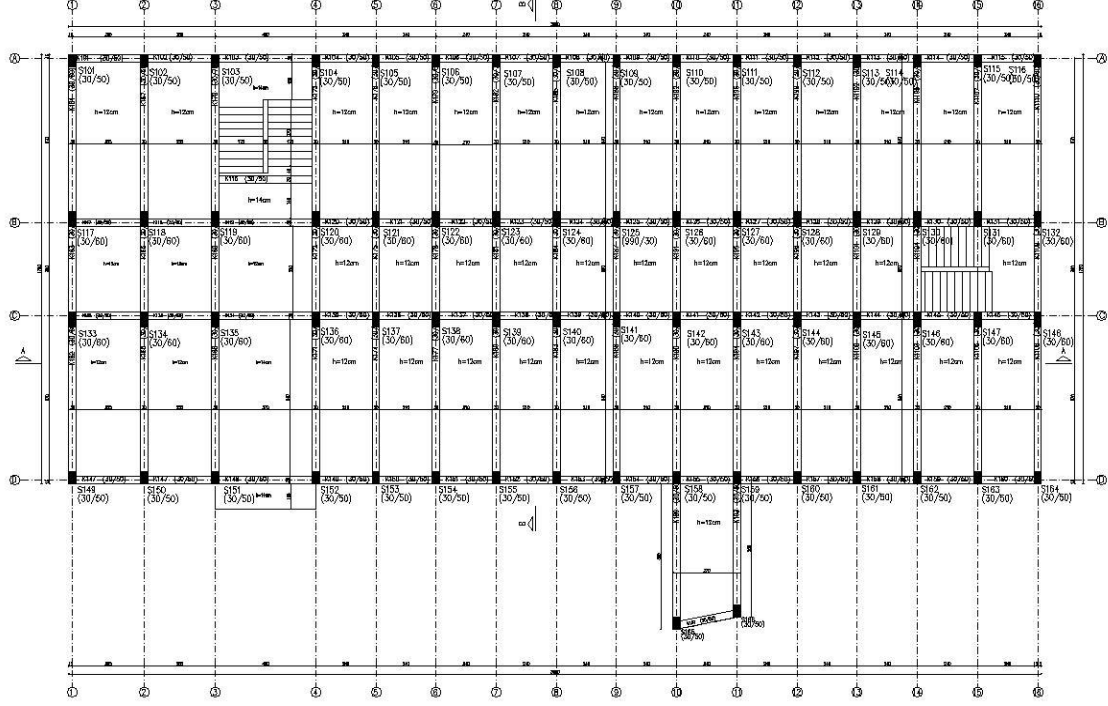
Bu çalışmada, TDY 1975'e göre inşa edilmiş bir okul binasının mevcut durumunun ve TBDY 2018'e göre inşa edilmesi durumunun deprem performansları, hasar indeksi yöntemi ile elde edilmek istenmiştir. 1987 yılında inşa edilen okul binası betonarme çerçevelerden oluşmaktadır ve binanın genel bir görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1:
Mevcut okul binasının genel görünümü

Bina 3 katlı olup tüm katlarda yükseklik sabit 3,2 m'dir ve toplam bina yüksekliği 9,6 m'dir. Planda uzun doğrultuda 15 açıklıklı ve açıklığı 38,8 m, kısa doğrultuda 3 açıklıklı ve açıklığı 17,5 m'dir. Yerinde alınan karotlar sonucu mevcut beton basınç dayanımı 11 MPa olarak belirlenmiş, donatı akma dayanımının ise 220 MPa olduğu görülmüştür. Binanın 1. kat kalıp planı Şekil 2'de verilmiştir. TBDY 2018'e göre yeniden tasarlanan mevcut binada karakteristik basınç dayanımı

30 MPa olan C30 betonu, akma dayanımı 420 MPa olan S420 donatı çeliği kullanılmıştır. Mevcut bina ile yeni tasarlanan binanın geometrisi ve kesit boyutları aynıdır, tek fark malzeme dayanımları ve kiriş kolon donatı adedi ve düzenlemesidir. Mevcut binanın kolon boyutları ve donatı miktarları Tablo 1’de, kiriş boyutları ve donatı miktarları Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2:
Binanın 1. kat kalıp planı

Tablo 1. Mevcut binanın kolon boyutları ve donatı miktarları

Kolon İsmi	Kolon Kesiti (cm/cm)	Boyuna Donatı	Etriye
S101, S102, S103, S104, S105, S106, S107, S108, S109, S110, S111, S112, S113, S114, S115, S116, S149, S150, S151, S152, S153, S154, S155, S156, S157, S158, S159, S160, S161, S162, S163, S164, S165, S166	30×50	6Φ16	Φ8/25
S117, S118, S119, S120, S121, S122, S123, S124, S125, S126, S127, S128, S129, S130, S131, S132, S133, S134, S135, S136, S137, S138, S139, S140, S141, S142, S143, S144, S145, S146, S147, S148	30×60	6Φ18	Φ8/25

Tablo 2. Mevcut binanın kiriş boyutları ve donatı miktarları

Kiriş İsmi	Kiriş Kesiti (cm/cm)	Sağ ve sol mesnet boyuna donatısı	Etriye
K101 - K161 arası, K163, K166, K169, K172, K175, K178, K181, K184, K187, K189, K191, K193, K195, K198, K1101, K1104, K1109	30/50	3Φ12 (üst) 2Φ12 (alt)	Φ8/25
K162, K164, K165, K167, K174, K176, K177, K179, K180, K183, K185, K186, K188, K190, K192, K194, K196, K197, K199, K1103, K1105, K1106, K1107, K1108, K1110	30/60	3Φ12 (üst) 2Φ12 (alt)	Φ8/25
K168, K170, K171, K173, K180, K182, K1100, K1102	30/70	3Φ12 (üst) 2Φ12 (alt)	Φ8/25

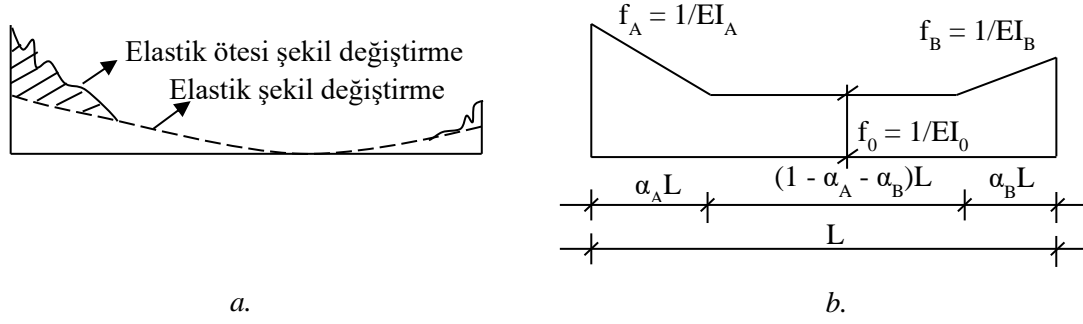
Zemin etüdü sonuçlarına göre binanın zemin sınıfı, TBDY 2018’de verilen ZC zemin sınıfına uymaktadır. TBDY 2018’e göre zemin profilinin temel alt kotundan itibaren aşağıya doğru en üst 30 m kalınlığındaki ortalama kayma dalgası hızı (V_s)₃₀, 360 – 760 m/s arasında ise, yerel zemin sınıfı ZC olmaktadır.

3.2. Bina Analitik Modeli

Bu çalışmada okul binasının mevcut durumu ve TBDY 2018’e göre tasarlanmış hali IDARC bilgisayar programında modellenmiştir. IDARC; kullanıcı ara yüzü olmayan, sayısal kodlarla sistemin ve modelin oluşturulduğu akademik bir programdır. 2 boyutlu analiz yapılmasından dolayı yalnızca tek doğrultudaki çerçeveler modellenir ve dikkate alınan doğrultudaki elastik ötesi tepkiler, hasar durumları ve enerji talepleri elde edilir. Kullanıcı ara yüzünün olmaması bir eksiklik olarak kabul edilse de analiz hızının yüksek olması, etkili çözümlerin yapılabilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Yapılan çalışmada, binanın uzun kenarı doğrultusundaki deprem için hesaplar yapılmıştır.

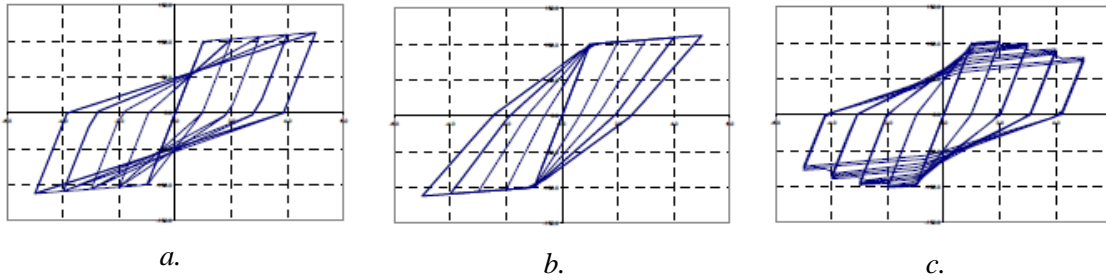
IDARC programında zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yapılarak DPAHİ yöntemi ile binaların deprem performansları belirlenmiştir. Doğrusal olmama durumu eleman uçlarına plastik mafsallar tanımlanarak sağlanmaktadır. TBDY 2018 hem yığılı hem de yayılı plastik mafsalları tanımlama izin vermektedir. IDARC doğrusal olmama tanımında yayılı plastikliği kullanılmaktadır. Fakat programın plastik mafsalları tanımlama en önemli özelliklerinden biri şekil değiştirmedeki eğilme ve kayma bileşenlerinin birbirine bağlı olarak kullanılmasıdır. Şekil 3a’da betonarme bir elemandaki eğrilme dağılımı, Şekil 3b’de ise IDARC programının kullandığı yayılı plastiklik modeli verilmiştir. Şekil 3b’de görülen EI_A ve EI_B ifadeleri elemanın A ve B uçlarındaki kesitlerin eğilme rijitliklerini, EI_0 ise elemanın merkezindeki eğilme rijitliğini göstermektedir. α_A ve α_B elemanın A ve B uçlarındaki kesitlerde akma penetrasyon katsayılarıdır. Akma penetrasyon katsayıları elemanda çatlamaya olduğu kısımları belirlemeye yarayan parametrelerdir.

Betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi için Kent-Park beton modeli (Kent ve Park, 1971) kullanılmıştır. Donatının gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisinde pekleşme dikkate alınmıştır.



Şekil 3:
Betonarme bir elemanda eğrilik dağılımı ve yayılı plastiklik kabulü
a. Eğrilik dağılımı b. Yayılı plastiklik kabulü

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap (ZTADOH) yönteminin vereceği sonuçların güvenilir olmasını sağlayacak parametrelerden biri de sistemin çevrimsel davranışını en iyi tarif edebilecek histeretik çevrim modelinin seçimidir (Börekçi ve diğ., 2018). ZTADOH yöntemini kullanırken mühendislik pratiği ve araştırma çalışmalarında genel olarak seçilen çevrim modeli “dayanım ve rijitlik azalması ikili doğrusal çevrim” modelidir. Fakat deneysel çalışmalar göstermiştir ki, betonarme binaların elemanlarının çevrimsel yükler altındaki davranışı ikili doğrusal modele değil “pike yönelen” (peak-oriented) modele uymaktadır ve bu yükler altında sistemde dayanım ve rijitlik azalması olmaktadır (Negro, 1997). Bu sebeplerden dolayı binaların IDARC modelinde “dayanım ve rijitlik azalmalı pike yönelen histeretik çevrim modeli” kullanılmıştır. Sıkışma (pinching) etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 4’te, bina modelinde dikkate alınan “pike yönelen model”, “rijitlik azalması” ve “enerji esaslı dayanım azalması” durumları gösterilmiştir. Şekil 4a’da modelin mantığını göstermek adına azalmalar dikkate alınmamıştır. Şekil 4b ve 4c’de ayrı ayrı verilen azalmalar sistemde aynı anda dikkate alınmaktadır. Tablo 3’te ise her iki bina için de dikkate alınan azalma seviyeleri verilmiştir.



Şekil 4:
Histeretik çevrim modeli ve özellikleri
a. Pike yönelen model b. Rijitlik azalması c. Enerji esaslı dayanım azalması

Tablo 3. Bina histeretik çevrimlerinin azalma seviyeleri

Bina	Rijitlik Azalması	Dayanım Azalması (Enerji Esaslı)	Dayanım Azalması (Süneklik Esaslı)	Sıkışma (Pinching)
Mevcut	BÜYÜK	BÜYÜK	YOK	YOK
Yeni	AZ	AZ	YOK	YOK

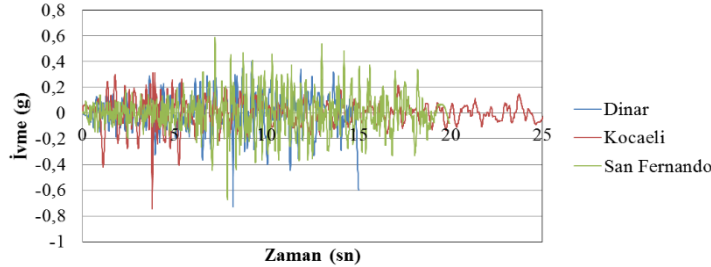
3.3. Yer Hareketi Kayıtları

Bu çalışma kapsamında 3 farklı deprem kullanılmıştır ve kayıtlar PEER NGA deprem kayıt kütüphanesinden elde edilmiştir. Kayıtların seçiminde etkili bir çok parametre olmasına rağmen magnitüd, kaynağa uzaklık ve zemin koşulları parametreleri seçim kriterleri için yeterli olmaktadır (Fahjan, 2008; Katsanos ve diğ., 2010). Binanın bulunduğu alandaki yerel zemin sınıfı TBDY 2018'e göre ZC'dir. Bu nedenle, depremler ZC tipi zeminlerde kaydedilmiş depremler arasından seçilmiştir. Yakın alan etkisinin ihmal edilebilmesi için kaynağın faya olan uzaklığı üzerine birçok öneri olmasına rağmen bu çalışmada, en yakın uzaklık 60 km olarak alındığından yakın alan etkisinin ihmal edildiği düşünülmektedir. Kullanılan depremler ve özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

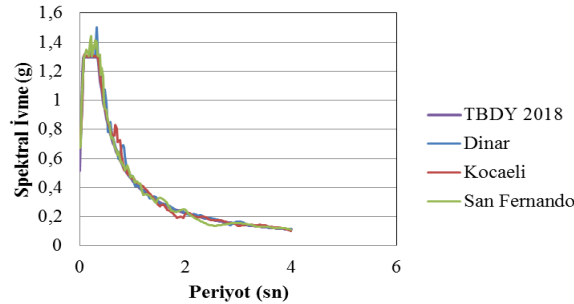
Tablo 4. Deprem yer hareketi kayıtları

Deprem	Kayıt İstasyonu	Yıl	Magnitüd	Faya uzaklık (km)
Dinar	İzmir Trigger #1	1995	6,40	250,3
Kocaeli	Ereğli	1999	7,51	141,4
San Fernando	Wrightwod-6074 Park Dr	1971	6,61	61,6

Kullanılan kayıtların %5 sönümlü ivme spektrumları TBDY 2018'de verilen tasarım spektrumuna, SeismoMatch bilgisayar programı ile ölçeklenmiştir. Ölçekleme işlemi frekans alanında yapıldığından, spektruma olabildiğince benzeştirilerek ölçekleme yapılmıştır. Ölçeklenen kayıtların zaman geçmişleri ve spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan spektrum, binanın bulunduğu coğrafi konumun koordinatları için <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden elde edilmiştir ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem) depremi temsil etmektedir.



a.



b.

Şekil 5:

Ölçeklenmiş kayıtların ivme – zaman geçmişleri ve ivme spektrumları
a. İvme – zaman geçmişi **b.** İvme spektrumu

3.4. Analiz Yöntemi

Bilgisayar teknolojisindeki ilerleme ve bilimsel gelişmeler sonucu genelde şekil değiştirmeye göre tasarım, özelde de performansa dayalı tasarım günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Performansa dayalı tasarım yaklaşımı statik ve dinamik olmak üzere iki yöntemden oluşmaktadır. TBDY 2018’de, statik yöntem “Doğrusal Olmayan Statik İtme Analizi” (DOSİA) olarak, dinamik yöntem ise “Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz” (ZTADOA) olarak isimlendirilmiştir.

Bazı araştırmacılar (Kim ve diğ., 2005; Diaz ve diğ., 2017) DOSİA ile hasar indeksi elde edecek çalışmalar yapmışlardır. Fakat statik itme yöntemi kullanıldığında hasar indeksini etkileyen parametreler olan deprem süresi ve çevrimsel etki dikkate alınmadığından, sismik ve dinamik yükler altında oluşacak hasarı elde etmek için statik itme yöntemini kullanmak çok uygun olmayacaktır (Mohebi ve diğ., 2019). Bu yüzden bu çalışmada ZTADOA yöntemi kullanılarak hasar indeksleri ve dolayısıyla deprem performansları elde edilmiştir. Çözümlerde 3 adet yer hareketi kaydı kullanılmış ve elde edilen değerlerin mutlak değerce en büyüğü dikkate alınarak hasar indeksleri belirlenmiştir. Hareket denklemi Newmark-Beta yöntemi ile çözülmüştür ve analizin koşulsuz stabil olması için $\beta_1 = 1/4$ ve $\gamma = 1/2$ olarak seçilmiştir (Chopra, 2000).

TBDY 2018, binalarda etkin (çatlamış) kesit rijitliğini kullanmaktadır. Denklem (8) ve (9)’da TBDY 2018’in betonarme elemanlar için önerdiği etkin kesit rijitlikleri verilmiştir.

$$\text{Kirişler için; } (EI)_e = 0,35(EI)_o \quad (8)$$

$$\text{Kolonlar için; } (EI)_e = 0,70(EI)_o \quad (9)$$

4. ANALİZ SONUÇLARI

4.1. Modal Analiz Sonuçları

Modal analiz sonucu elde edilen periyot değerleri brüt kesit ve etkin kesit rijitlikleri için Tablo 5’te verilmiştir. IDARC programı 2 boyutlu analiz yaptığından, binanın uzun doğrultusunun analizi yapılarak performansı elde edilmiştir. Dolayısıyla, verilen değerler doğrudan uzun kenar doğrultusu modlarının periyotlarıdır.

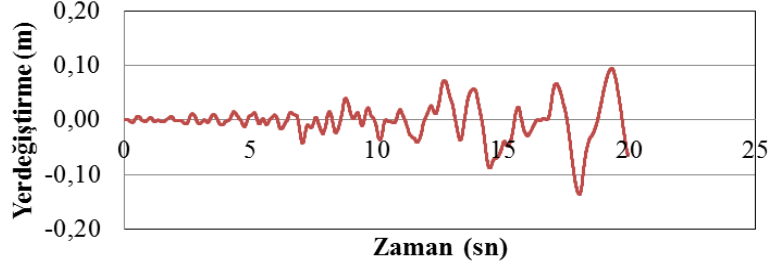
Tablo 5. Bina ilk 3 modunun doğal periyotları

Mod	Mevcut Bina Periyodu (sn)		Yeni Bina Periyodu (sn)	
	Brüt Kesit için	Etkin Kesit için	Brüt Kesit için	Etkin Kesit için
1	0,726	0,758	0,479	0,527
2	0,245	0,254	0,164	0,179
3	0,158	0,162	0,106	0,114

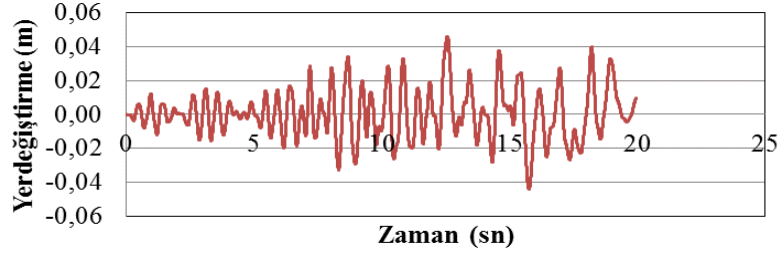
4.2. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

ZTADOA kullanılarak 3 adet deprem için sonuçlar elde edilmiştir. Veri fazlalığı olmaması açısından sadece en büyük yapı tepkilerinin elde edildiği deprem sonuçları verilmiştir. Analiz sonucu elde edilen çatı yerdeğiştirmesi - zaman geçmişi grafikleri Şekil 6’da, taban kesme kuvveti - zaman geçmişi grafikleri ise Şekil 7’de verilmiştir. Tablo 6’da tüm depremlerde oluşan çatı yerdeğiştirmesi ve taban kesme kuvveti talepleri verilmiştir. ZTADOA sonucu her iki bina için

de en büyük talepler San Fernando depremi için elde edilmiştir. Mevcut binada en büyük çatı yerdeğıştirmesi 0,14 m, en büyük taban kesme kuvveti 2316 kN, yeni binada en büyük çatı yerdeğıştirmesi 0,046 m, en büyük taban kesme kuvveti ise 5694 kN olarak elde edilmiştir.



a.

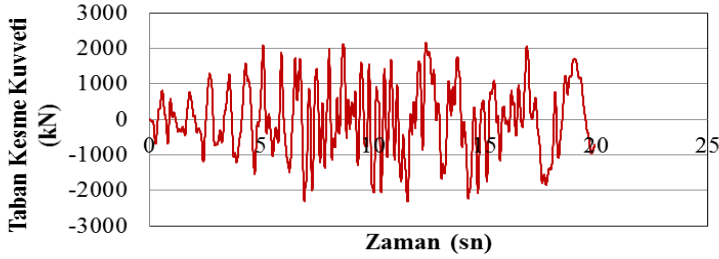


b.

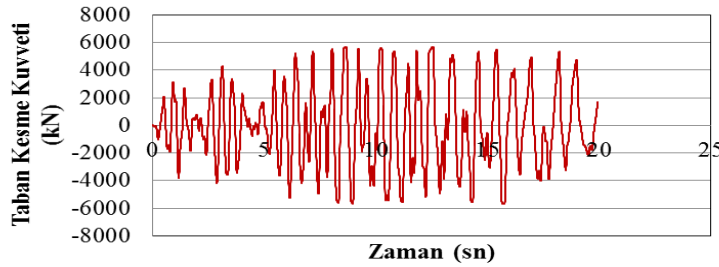
Şekil 6:

Binaların San Fernando depreminde çatı yerdeğıştirmesi – zaman grafikleri

a. Mevcut bina b. Yeni bina



a.



b.

Şekil 7:

Binaların San Fernando depreminde taban kesme kuvveti – zaman grafikleri

a. Mevcut bina b. Yeni bina

Tablo 6. Binaların çatı yerdeğiştirmesi ve taban kesme kuvveti değerleri

Depremler	Çatı yerdeğiştirmesi talebi (m)		Taban kesme kuvveti talebi (kN)	
	Mevcut Bina	Yeni Bina	Mevcut Bina	Yeni Bina
Dinar	0,07	0,030	2210	5647
Kocaeli	0,05	0,028	2231	5595
San Fernando	0,14	0,046	2316	5694

4.3. Hasar İndeksi ve Deprem Performansı

Bu çalışmada dikkate alınan binalar IDARC bilgisayar programında modellenmiştir ve DPAHİ yöntemi ile eleman, kat ve tüm bina ölçeğinde hasar seviyesi elde edilerek binaların deprem performansı belirlenmiştir. Hasar indeksi katsayıları 0 – 1 arasında sayılardır ve $HI=0$ hasarsız binayı, $HI \geq 1$ ise toptan göçmeyi ifade etmektedir. Park ve diğ. (1987) yaptıkları çalışmada Tablo 7’de verilen hasar indeksi sınıflandırmasını önermişlerdir.

Ang ve diğ. 1993’te yaptıkları çalışma ile $HI=0,8$ ’in göçmeyi temsil ettiğini belirtmişlerdir. Buna göre, bu çalışmada HI değeri 0,8’i aşan binaların toptan göçme performans seviyesinde olduğu kabul edilmiştir.

TBDY 2018’de “Sınırlı Hasar” (SH), “Kontrollü Hasar” (KH), “Göçmenin Önlenmesi” (GÖ) ve “Göçme” (G) olmak üzere 4 performans seviyesi tanımlanmıştır. Bu performans seviyelerinin tanımları dikkate alındığında, Tablo 7’de verilen az hasarın SH’yi, orta hasarın KH’yi, ağır hasarın ise GÖ’yü temsil ettiği rahatça anlaşılabilir.

Tablo 7. Hasar indeksi sınıflandırması

Hasar İndeksi	Hasar sınıflandırması
$HI < 0,1$	Hasarsız veya yerel kılcal çatlaklar
$0,1 \leq HI < 0,25$	Az hasar
$0,25 \leq HI < 0,4$	Orta hasar
$0,4 \leq HI < 1$	Ağır hasar
$HI \geq 1$	Göçme

ZTADOA sonucu her iki binanın tüm sistemi için elde edilen HI değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Yapılan analizlerde 3 adet deprem kaydı kullanıldığından, hasar seviyelerinin elde edilmesinde en büyük HI değeri dikkate alınmıştır. Mevcut binada en büyük $HI=0,859$, yeni binada ise en büyük $HI=0,028$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 8. Binaların hasar indeksleri

Depremler	Mevcut Bina	Yeni Bina
Dinar	0,437	0,021
Kocaeli	0,709	0,028
San Fernando	0,859	0,026

Yukarıda verilen hasar indeksi sınıflandırmalarına göre, tasarım depremi (50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem) için mevcut binanın performans seviyesi “Göçme”, yeni binanın performans seviyesi ise “Sınırlı Hasar” ya da HI değerinin çok küçük olmasına dayanarak hasarsız olarak belirlenmiştir. TBDY 2018, okul tipi binaların performansının en büyük deprem (50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem) için “Kontrollü Hasar” olması gerektiğini belirtmiştir fakat

tasarım depremi için dahi göçme sınırı aşılmıştır. Mevcut binanın eksikliğinin daha çarpıcı görülmesi açısından, analizler tasarım depremi için yapılmıştır. Şekil 8’de örnek olması açısından IDARC programının çıktı dosyasında tüm elemanlar için verilen hasar indeksleri gösterilmiştir. Şekil 8’de verilen değerler her eleman için HI değerlerini, parantez içindeki değerler ise sönümledikleri enerjinin, yapının toplam sönümlendirdiği enerjiye oranını göstermektedir.

1.62 (0.01)	0.06 (0.00)	0.03 (0.00)	0.03 (0.00)	0.02 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.02 (0.00)	0.01 (0.00)	0.01 (0.00)	0.04 (0.00)	0.02 (0.00)	0.04 (0.00)	1.30 (0.01)
0.12 (0.01)	0.06 (0.02)	0.06 (0.02)	0.06 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.06 (0.02)	0.07 (0.02)	0.06 (0.02)	0.05 (0.01)
1.10 (0.03)	1.09 (0.02)	0.88 (0.03)	1.25 (0.02)	1.23 (0.02)	1.22 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.22 (0.02)	1.23 (0.02)	1.22 (0.02)	1.23 (0.02)	1.22 (0.02)	1.23 (0.02)	1.30 (0.02)
0.03 (0.01)	0.02 (0.01)	0.01 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.03 (0.01)
1.04 (0.02)	1.04 (0.02)	0.81 (0.02)	1.19 (0.02)	1.19 (0.02)	1.18 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.15 (0.02)	1.18 (0.02)
0.06 (0.01)	0.04 (0.01)	0.05 (0.01)	0.06 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.06 (0.01)
0.79 (0.01)	1.16 (0.02)	1.10 (0.02)	0.47 (0.00)	0.02 (0.00)	0.01 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	0.02 (0.00)	1.09 (0.01)
0.03 (0.01)	0.06 (0.02)	1.63 (0.28)	0.06 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.07 (0.02)	0.09 (0.02)
1.20 (0.03)	1.09 (0.03)	0.84 (0.03)	1.34 (0.03)	1.33 (0.03)	1.34 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.36 (0.03)	1.35 (0.03)	1.37 (0.03)	1.35 (0.03)	1.95 (0.02)
0.02 (0.01)	0.01 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.08 (0.01)
1.10 (0.02)	1.05 (0.02)	0.78 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.24 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.23 (0.02)	1.22 (0.02)	1.23 (0.02)	1.24 (0.02)
0.05 (0.01)	0.05 (0.01)	0.05 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)	0.05 (0.01)

Şekil 8:

San Fernando depreminde mevcut binanın hasar indeksi değerleri ve enerji oranları

a. Dış çerçeve b. İç çerçeve

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, Türk Deprem Yönetmeliği 1975'e göre tasarlanmış mevcut betonarme bir okul binasının ve TBDY 2018 şartlarına göre tasarlanması durumunun deprem performansları araştırılmıştır. Çevrimsel bir yük olan deprem etkisi altında, çevrim sayısının sönümlenen histeretik enerjiyi ve dolayısıyla birikimli hasarı etkilemesi sebebiyle performans değerlendirmesinde, şekil değiştirme sünekliğini ve sönümlenen enerjinin miktarını da dikkate alan Park-Ang Hasar İndeksi yöntemi kullanılmıştır. Binalar IDARC analiz programında modellenerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan çözümler yapılmıştır. Böylelikle, birikimli hasarı da dikkate alan bir yöntem kullanılarak, modern yönetmeliklerin tasarım anlayışının, yapı performansına etkisi araştırılmak istenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Bina, mevcut durumuyla TBDY 2018'in önerdiği Kontrollü Hasar performans seviyesini sağlamamaktadır.
- Mevcut bina, kesit boyutları değiştirilmeden sadece malzeme dayanımları artırıldığında ve donatı adetleri TBDY 2018 şartlarına göre tasarlandığında, tasarım depremi için Sınırlı Hasar performans seviyesini sağlamaktadır.
- Standart performansa dayalı tasarım yaklaşımında en büyük yerdeğiştirmede elde edilen en büyük şekil değiştirme, hasar sınırı ile karşılaştırılmaktadır. Dolayısıyla yerdeğiştirmenin en büyük olduğu depremde elde edilen sonuçlar belirleyici olmaktadır. Fakat daha önce de anlatıldığı üzere, çevrimsel bir yük olan depremde çevrim sayısı ve yapıya giren enerji, hasarı etkilemektedir. Bu çalışmada, yeni bina için en büyük yerdeğiştirme talebi San Fernando depreminde olmasına rağmen, Kocaeli depreminin hasar indeksi en büyük çıkmıştır. Dolayısıyla hasar indeksi yöntemleriyle depremde giren enerji de dikkate alınarak performans hesabı daha gerçekçi sonuçlar elde etmemizi sağlayabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ang, A.H-S., Kim, W.J. ve Kim, S.B. (1993) Damage estimation of existing bridge structures, *Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation: Proc. ASCE Structures Congress*, Irvine CA, (2) 1137-1142.
2. ATC40, (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Applied Technology Council, California.
3. Banon, H., Biggs, J.M., ve Irvine, H.M. (1980) Prediction of seismic damage in reinforced concrete frames", Seismic Behavior and Design of Buildings, *Report No. 3*, MIT, Cambridge, Mass, May.
4. Banon, H., Biggs, J.M., ve Irvine, H.M. (1981) Seismic damage in reinforced concrete frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 107(9), 1713-1729.
5. Börekçi, M., Kırçıl, M.S. ve Ekiz, İ. (2018) Inelastic displacement ratios for evaluation of degrading peak-oriented SDOF systems, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(1), 33-47. <https://doi.org/10.3311/PPci.10635>
6. Carr, A.J. ve Tabuchi, M. (1993) The structural ductility and the damage index for reinforced concrete structure under seismic excitation, *2nd European conference on Structural Dynamics*, Trondheim, Norway, Haziran
7. Chopra, A.K. (2000) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Second Edition*, Prentice Hall, New Jersey.

8. Chung, Y.S., Meyer, C. ve Shinozuka, M. (1989) Modeling of concrete damage, *ACI Structural Journal*, 86(3), 259-271. <https://doi.org/10.14359/2895>
9. Cosenza, E., Manfredi, G. ve Ramasco, R. (1993) The use of damage functionals in earthquake engineering: a comparison between different models, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(10), 855-868. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290221003>
10. Diaz, S.A., Pujades, L.G., Barbat, A.H., Vargas, Y.F. ve Hidalgo-Leiva, D.A. (2017) Energy damage index based on capacity and response spectra, *Engineering Structures*, 152, 424-436. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.019>
11. EC 8 (2011) Euro Code 8, Seismic Design of Buildings, European Commission Joint Research Centre, Italy.
12. Fahjan, Y.M. (2008) Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tasarım ivme spektrumuna uygun gerçek deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklenmesi, *Teknik Dergi*, 19(3), 4423-4444.
13. Fajfar, P. (1992) Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21(10), 837-848. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290211001>
14. Fajfar, P., ve Krawinkler, H. (1997) Seismic design methodologies for the next generation of codes, *Proceedings of International Workshop held in Bled*, Balkema, The Netherlands. <https://doi.org/10.1201/9780203740019>
15. FEMA 356 (1997) Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington.
16. Ghojarah, A., Abou-Elfath, H. ve Biddah, A. (1999) Response-based damage assessment of structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(1), 79-104.
17. Ghosh, S. ve Collins, K.R. (2006) Merging energy-based design criteria and reliability-based methods: exploring a new concept, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(13), 1677-1698. <https://doi.org/10.1002/eqe.602>
18. Ghosh, S., Datta, D. ve Katakdhond, A.A. (2011) Estimation of the Park-Ang damage index for planar multi-storey frames using equivalent single-degree systems, *Engineering Structures*, 33(9), 2509-2524. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.023>
19. Hwang, T.H. ve Scribner, C.F. (1984) R/C member cyclic response during various loadings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 110(3), 477-489. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1984\)110:3\(477\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1984)110:3(477))
20. IDARC V6.1 (2006) A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings, NCEER, State University of New York at Buffalo.
21. Jeong, G.D. ve Iwan, W.D. (1988) Effect of earthquake duration on damage of structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(8), 1201-1211. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160808>
22. Katsanos, E.I., Sextos, A.G. ve Manolis, G.D. (2010) Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(4), 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.10.005>
23. Kent, D.C. ve Park, R. (1971) Flexural members with confined concrete, *Journal of Structural Division*, 97(ST7), 1969-1990.
24. Kim, T.-H., Lee, K.-M., Chung, Y.-S. ve Shin H.M. (2005) Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns, *Engineering Structures*, 27(4), 576-592.

25. Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M. ve Lobo, R.F. (1992) IDARC version 3.0: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures, *Report No. NCEER 92-0022*, National Center for Earthquake Engineering and Research, Buffalo.
26. Kunnath, S.K. ve Jenne, C. (1994) Seismic damage assessment of inelastic RC structures, *5th US National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago, 1, 55-64, July.
27. Mohebi, B., Chegini, A.H. ve Miri, A.R. (2019) A new damage index for steel MRFs based on incremental dynamic analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, 156, 137-154. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.005>
28. Negro, P. (1997) Experimental assessment of the global cyclic damage of framed R/C structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 1(3), 543-562. <https://doi.org/10.1080/13632469708962377>
29. Park, Y.J. ve Ang, A.H.S. (1985) Mechanistic seismic damage model for reinforced, *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722-739. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1985)111:4(722))
30. Park, Y.J., Ang, A.H.S. ve Wen, Y.K. (1987) Damage limiting aseismic design of buildings, *Earthquake Spectra*, 3(1), 1-26. <https://doi.org/10.1193/1.1585416>
31. PEER NGA, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>
32. Powell, G.H. ve Allahabadi, R. (1988) Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(5), 719-734. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290160507>
33. Priestley, M.J.N. (2000) Performance based seismic design, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland.
34. Roufaiel, M.S.L. ve Meyer, C. (1987) Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 113(3), 429-457. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1987\)113:3\(429\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1987)113:3(429))
35. SeismoMatch (2018) SeismoSoft Earthquake Engineering Software Solutions.
36. Stephens, J.E. ve Yao, J.T.P. (1987) Damage assessment using response measurement, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 113(4), 787-801. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1987\)113:4\(787\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1987)113:4(787))
37. TBDY (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
38. TDY (1975) Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
39. Valles, R.E., Reinhorn, A.M. ve Barron R. (1996) Seismic evaluation of a low-rise RC building in the vicinity of the New Madrid Seismic Zone, *Report No. NCEER 95*, National Center for Earthquake Engineering and Research, Buffalo.
40. Wang, M.L. ve Shah, S.P. (1987) Reinforced concrete hysteresis model based in the damage concept, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15(8), 993-1003. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290150806>
41. Zahrah, T.F. ve Hall, W.J. (1984) Earthquake energy absorption in SDOF structures, *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1772. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1984\)110:8\(1757\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1984)110:8(1757))

42. Zhang, C. ve Tian, Y. (2019) Simplified performance-based optimal seismic design of reinforced concrete buildings, *Engineering Structures*, 185, 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.108>