BİTİŞİK NİZAM BETONARME YAPILARDA ÇARPIŞMA ETKİSİ VE ZAMAN-FREKANS ALANINDA PERFORMANS ANALİZLERİ

Ömer Fatih SAK[1] ve Kemal BEYEN[2]

[1] *İnş. Yük. Müh., İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
[2] *Doç. Dr., İnşaat Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli*
Email: omerfatihsak@gmail.com

ÖZET:

Şehirlerimizde birbirine bitişik şekilde inşa edilmiş çok sayıda betonarme yapı bulunmaktadır. Bu yapıların bir kısmında deprem derzleri olmasına rağmen bir kısmı tamamen bitişik olarak inşaa edilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY2007) bu tip yapılar için belirli yükseklikler için belirli mesafelerde deprem derzleri konulması şartıyla hesap yapılmasını öngörmektedir. Bu deprem derzlerinin çarpışma etkisinin önüne geçeceği düşünülmektedir. Ancak tamamen bitişik olarak imal edilen ya da kat ötelemelerinin deprem derzlerini geçerek çarpışmaya sebep olması durumunda yapısal performansların ne şekilde değişeceği merak konusu olmuştur. Örnek olarak ele alınan farklı yüksekliklerdeki yapıların ayrık ve bitişik nizam olmak üzere zaman tanım alanında analitik olarak doğrusal olmayan yöntemlerle aynı deprem kuvvetleriyle analizleri yapılmış ve çarpışma olması durumunda yapısal performansların ne şekilde değiştiği tartışılmıştır. Yapıdan elde edilen kinematik parametreler zaman-frekans tanım alanında dalgacık ve Hilbert dönüşümleriyle incelenmiştir. Yapı durum değerlendirmesi ve hasar tanılama çalışmaları yapılarak elemanlar üzerindeki çarpışma hasarları tartışılmış ve ideal düşey deprem derzi önerilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Bitişik Nizam Yapılar, Çarpışma Etkisi, Zaman-Frekans Alanında Analiz, Düşey Derz, Dalgacık Analizi, Hilbert Dönüşümü.

COLLISION EFFECT OF ATTACHED RC STRUCTURES AND PERFORMANCE ANALYSIS IN TIME-FREQUENCY DOMAIN

ABSTRACT:

In our cities, there are many reinforced concrete structures built adjacent to each other. Although some of these structures have earthquake joints, some of them have been constructed completely adjacent. Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones (DBYBHY2007) proposes that calculations should be made for certain types of constructions. Earthquake joints are installed at certain distances for certain heights. It is thought that these earthquake joints will prevent the collision effect. However, it has been a matter of curiosity how structural performances will change if they are produced fully adjacent or when story drifts cause collision through earthquake joints. As a case study, series of structures with different heights are analyzed in time domain for specifically selected earthquake input motions. Structural performances inferred from nonlinear analytical runs of the separate and adjacent constructions are discussed. Kinematic parameters obtained from the structures were also examined in the time-frequency domain by the wavelet transform and Hilbert transform. Condition assessment and damage identification studies were carried out to discuss the effects of the seismic joints and adequacy of the seismic joints is proposed.

KEYWORDS: Attached RC Structures, Collision Effect, Time-Frequency Analysis, Vertical Seismic Joints, Wavelet Analysis, Hilbert Transforms.

1. GİRİŞ

Türk deprem yönetmeliğindeki deprem derzleriyle ilgili olan bölümde bitişik nizam olarak inşa edilen yapılar arasında yüksekliğe bağlı olarak belirli mesafelerde düşey deprem derzleri konulması gerektiği belirtilmektedir. Madde 2.10.3.2'ye göre bırakılacak minimum derz boşluğu, 6 m yüksekliğe kadar en az 30 mm olacak ve bu değere 6 m'den sonraki her 3 m'lik yükseklik için en az 10 mm eklenecektir. Bu derzler deprem sonrası inşa edilen yapılarda bırakılmışken deprem öncesi mevcut birçok yapı birbirine tamamen bitişik olarak imal edilmiştir. Böyle bitişik olarak imal edilen ya da farklı periyotlara sahip binaların aynı anda zıt yönlü salınımları neticesinde kat ötelemelerinin deprem derzlerini geçerek çarpışmaya sebep olması durumunda yapısal performansların ne şekilde değişeceği merak konusu olmuştur. Deprem derzlerinin yeterliliği ve tamamen bitişik olarak yapıların davranışı analitik model üzerinden 1999 Kocaeli depreminin etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleriyle incelenmiştir. Yapısal performansların değişimi yapının ayrık ve bitişik olması durumunda mukayese edilmiştir. Sonuçlar zaman-frekans alanında dalgacık analizi ve Hilbert Huang dönüşümü metoduyla analiz edilmiştir.

Bitişik binalarda çarpışma ile ilgili temel çalışma Anagnostopoulos (1988) tarafından gerçekleştirilmiştir. Analizde yapılar tek dereceli serbestlik sistemleri ile modellenmiş ve çarpma kuvvetinin doğrusal viskoelastik modeli yardımıyla çarpışmalar simüle edilmiştir. Her katın kütlesi kat seviyesinde toplanmış olan çok serbestlik dereceli (ÇSD) modeller, farklı yüksekliklerin binalardaki depreme dayalı çarpışmayı daha ayrıntılı olarak analiz etmek için kullanılmaktadır. Analitik analizler arasında Davis (1992) tarafından kullanılan ve doğrusal olmayan Hertz çarpışma modeli esas alınarak çarpışmalar tek serbestlik dereceli osilatör ile rijit bir engel arasında doğrusal olmayan çarpma etkisi olarak modellenmiştir. Çarpışma etkisinin doğrusal olmayan alanda hesaba katılması hesaplamalarda daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Maison and Kasai (1992), farklı yapı çarpışmaları için hareketin serbestlik derecesi eşitliğini oluşturmuştur. Bu teoriyle, bilgisayar ortamında 15 katlı bir binanın davranış özelliklerini incelemiştir. Filiatrault ve diğ. (1995), 1940 El-Centro depreminin zaman tanım alanında bitişik üç ve sekiz katlı çelik çerçeveler arasındaki çarpışmalar için titreşim tablası testleri gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlar iki bilgisayar programı tarafından verilen öngörülerle karşılaştırılmıştır. Papadrakakis ve Mouzakis (1995), sinüsoidal ve rastgele hareketlere tabi tutularak, sıfır aralıklı iki katlı betonarme bina arasında çarpışma için sarsma tablo deneyleri yapmışlardır ve deneysel sonuçları Lagrange çarpanı metodu (1996) ile yapılan tahminlerle karşılaştırılmıştır.

Depremler sırasında iki yapı arasındaki göreli yer değiştirmeyi belirlemek için başka yaklaşımlar da önerilmiştir. Örneğin, Stavroulakis ve Abdalla (1991) pseudo-statik yöntemi kullandı, Filiatrault ve Cervantes (1995) doğrusal olmayan zaman hikayesi analizini kullanmıştır ve Lin (1997) rastgele titreşime stokastik yöntemi önermiştir. Fikirlerdeki tüm bu farklılıklara rağmen, sismik çarpışma için mevcut yapı kodu hükümlerinin çok koruyucu olduğu konusunda fikir birliği vardır. Darbelere uzaysal yer hareketi etkisi Jeng ve Kasai (1996) ve Hao ve Zhang (1999) tarafından değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların çoğunda, binalar arasındaki vurma kuvvetini modellemek için doğrusal sertlik veya bilinear sertleşme sertliği olan bir amortisör yay modeli kullanılmıştır. Bununla birlikte, yapılar arasındaki veya bir yapının çeşitli bileşenleri arasındaki gerçek darbe kuvvetleri genelde doğrusal değildir. Pantelides ve Ma (1998), tek serbestlik dereceli ve sönümlü bir yapı ile rijit engel arasında olşan çarpışmaları 1940 El Centro, 1971 San Fernando, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremlerinin zemin hareketleriyle incelemiştir. Chau ve Wei (2000), iki adet tek serbestlik dereceli osilatör arasındaki doğrusal olmayan çarpışmaları incelemiştir. Rahman ve diğ. (2001), farklı dinamik özelliklere sahip 12 katlı ve 6 katlı iki binanın çarpışmasını zemin özelliklerini de göz önünde bulundurarak incelemiştir. Muthukumar (2003), 1999 Kocaeli depreminde Gölcük'teki altı katlı bir binanın iki katlı komşu binayla çarpışması sonucu altı katlı binanın üçüncü kat döşemesi üzerinde kalan kolonun büyük ölçüde hasar gördüğünü

ve iki katlı binanın da oluşan kesme kuvvetleri sebebiyle yıkıldığını ortaya koymuştur. Gong and Hao (2005), çift yönlü yer hareketine maruz kalan simetrik olan ve olmayan bir katlı sistemler arasında burulma etkilerini analiz etmiştir. Wang ve Chau (2008), simetrik olmayan iki bina arasındaki burulma çarpışmasını lineer olmayan Hertz modeli tekniğini kullanarak modellemiştir. Yapılan çalışmalar sonucu, genel olarak burulma etkisinin ötelenme etkisine göre karmaşık olduğunu ifade etmiştir. Pant ve diğ. (2010), malzemeyi ve geometrik doğrusal olmayan yapıları dikkate alarak, betonarme moment dirençli çerçeve binaları arasındaki sismik çarpışmaların üç boyutlu simülasyonunu sunmuşlardır.

Çetinkaya (2011), farklı rijitliklere sahip iki komşu binanın çarpışmasını 4 farklı yay modeli için analiz etmiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. Binalar arasındaki etkileşimin en net görüldüğü modelin Hertz (lineer olmayan elastik yay) modeli olduğu sonucunu elde etmiştir. Mahmoud ve diğ. (2012), deprem etkisi altında eşit yükseklikteki iki lineer olmayan yapının çarpışmasının yanı sıra, zemin esnekliğinin de bu iki yapıya etkisini incelemiştir. Analizler sonucunda zeminin döngüsel ve yatay hareketlerinin iki binanın çarpışmasına etki ettiğini gözlemlemiştir. Mate ve diğ. (2012), üç bitişik tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli doğrusal elastik yapılarda çarpışma için mevcut çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan simülasyon modellerinin karşılaştırmalı bir çalışmasını sunmuştur. Bu çalışma, çarpma sonucunun zemin hareketi özelliklerine ve binalardaki birinci periyotlar arasındaki ilişkiye bağlı olduğunu göstermiştir. Beyen (2017), yapı tanılama sonuçlarının mevcut yapıların önemli bir deprem sonrası yapı sağlığı kontrollerinde durum analizlerine katkı verebileceğini belirtmiştir. Bitişik nizam yapılarda da deprem sonrası durum tespiti için analitik yapı modellerinin güncellenmesi ve gerçeğe uygun olarak tanılanması önem arzetmektedir.

2. ÇARPIŞMA MODELİ

Bu modelde çarpışma kuvveti ile yerdeğiştirme ilişkisini temsil edebilmek için Hertz temas yasasından yararlanılmıştır. Lineer olmayan elastik yay, binalar arasındaki boşluğun (d) kapanmasıyla devreye girmektedir. Çarpışma kuvveti, $u(t) = u_i(t) – u_j(t)$ olmak üzere aşağıdaki şekilde temsil edilmektedir;

$$F_{ç} = k_G[u(t) - d]^{3/2} \quad u(t) - d > 0 \quad (çarpışmanın\ olduğu\ durum) \tag{2a}$$

$$F_{ç} = 0 \quad u(t) - d \leq 0 \quad (çarpışmanın\ olmadığı\ durum) \tag{2b}$$

Burada; $u_i(t)$ ve $u_j(t)$ komşu binaların aynı doğrultudaki rölatif yerdeğiştirmeleri, d iki bina arasındaki boşluğu, k_G lineer olmayan elastik yay sabitini, $F_ç$ çarpışma kuvvetini temsil etmektedir. Çarpışan yapıların kütle yoğunluuğu ρ ve yarıçap R_i yaklaşımı aşağıdaki denklemden bulunabilir. [Goldsmith (1960)]:

$$R_i = \sqrt{\frac{3m_i}{4\pi\rho}}, \qquad i = 1,2 \tag{2c}$$

Doğrusal olmayan yay gerginliği k_h, aşağıdaki formüle göre çarpışan yapıların malzeme özelliklerine ve yarıçaplarına bağlıdır: burada, h_1 ve h_2 formülü ile tanımlanan malzeme parametreleridir:

$$k_h = \frac{4}{3\pi(h_1 + h_2)}\left[\frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}\right]^{1/2} \tag{2d}$$

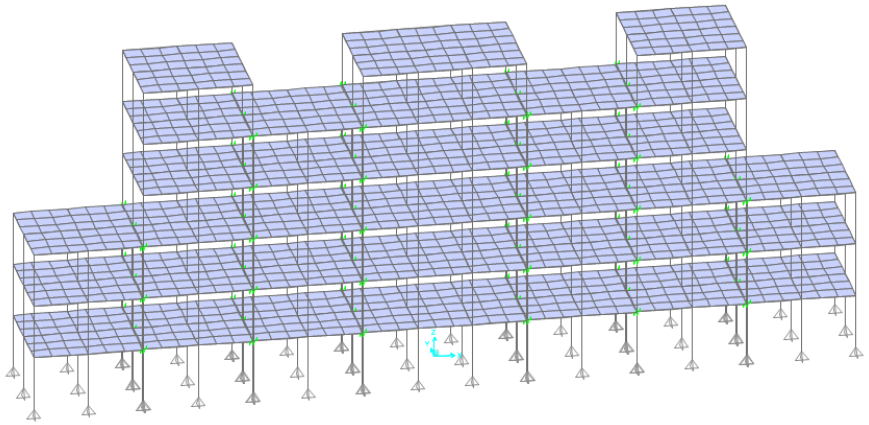
$$h_i = \frac{1 - \gamma_i}{\pi E_i} \qquad i = 1,2 \tag{2e}$$

Burada, γ_i ve E_i sırasıyla Poisson oranı ve elastisite modülüdür. K_h katsayısı, çarpışan cisimlerin malzeme özelliklerine ve geometrisine bağlıdır. Hesaplamalarda kütle yoğunluğu ρ=2500 kg/m^3, Poisson oranı γ_i = 0,2, elastisite modülü E_i = 2,8x10^{10} N/m^2 ve Hertz modeli k_G = 1,13x10^9 N/m$^{3/2}$ olarak alınmıştır.

3. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

TS500 ve DBDYHY2007'ye uygun olarak modellenen dört, beş ve altı katlı analitik yapılarda kolonlar 30x60, kirişler 25x50 olarak seçilmiştir. X yönlü açıklıklar 3m, kat yüksekliği 3'dir. Analitik yapılar deprem standardına göre yeterli görülen deprem derzi konulmuş, tamamen bitişik ve tekil olarak 1999 Kocaeli depremi ile doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz edilmiş ve hasar parametreleri tespit edilmiştir. Hasar tespiti mafsallardaki deformasyon dağılımlarından ve yapı üzerinden alınan ivme kayıtlarından yola çıkılarak dalgacık dönüşümü ve hilbert huang dönüşümü ile yapılmıştır. Ayrıca yapıdaki temele bağlanan kolonlar ankastre ve sabit mesnet olmak üzere modellenmiş ve aynı deprem etkisinde hasar dağılımındaki değişimler de gözlemlenmiştir.

Yapı periyodu, yumuşak kat, zayıf kat, burulma düzensizliği durumu, göreli kat ötelemesi ve 2. Mertebe gösterge değeri kontrolleri DBYBHY2007'ye göre uygun aralıklarda çıkmıştır. Yapının modal parametreleri sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir.



Şekil 1. Bitişik Nizam Yapıların 3B Görünümü

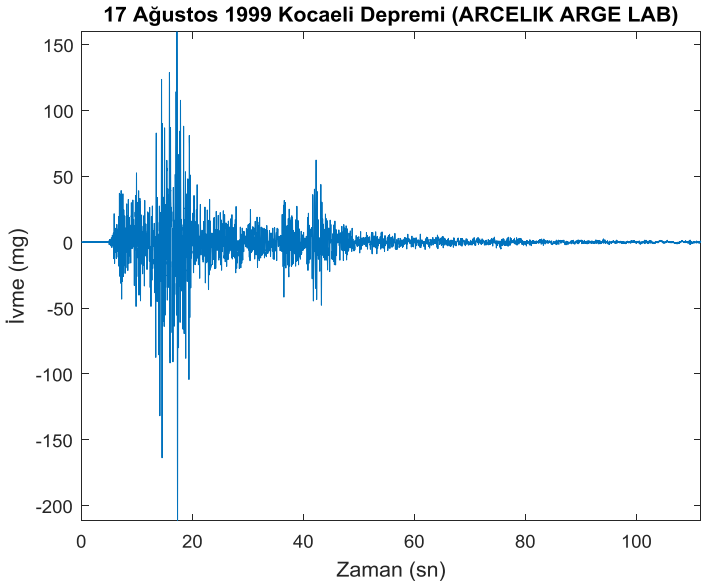
Tablo 1. Hasarsız (Modal) ve Hasarlı (Modal-NL) Derzli Yapı Parametreleri

TABLE: Modal Periods And Frequencies (Derzli Yapı)						
OutputCase	**StepType**	**StepNum**	**Period**	**Frequency**	**CircFreq**	**Eigenvalue**
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,727888	1,3738	8,6321	74,513
MODAL	Mode	2	0,707178	1,4141	8,8849	78,941
MODAL	Mode	3	0,707178	1,4141	8,8849	78,941
MODAL	Mode	4	0,611898	1,6343	10,268	105,44
MODAL-NL	Mode	1	0,786792	1,271	7,9858	63,773
MODAL-NL	Mode	2	0,707184	1,4141	8,8848	78,94
MODAL-NL	Mode	3	0,707184	1,4141	8,8848	78,94
MODAL-NL	Mode	4	0,61191	1,6342	10,268	105,43

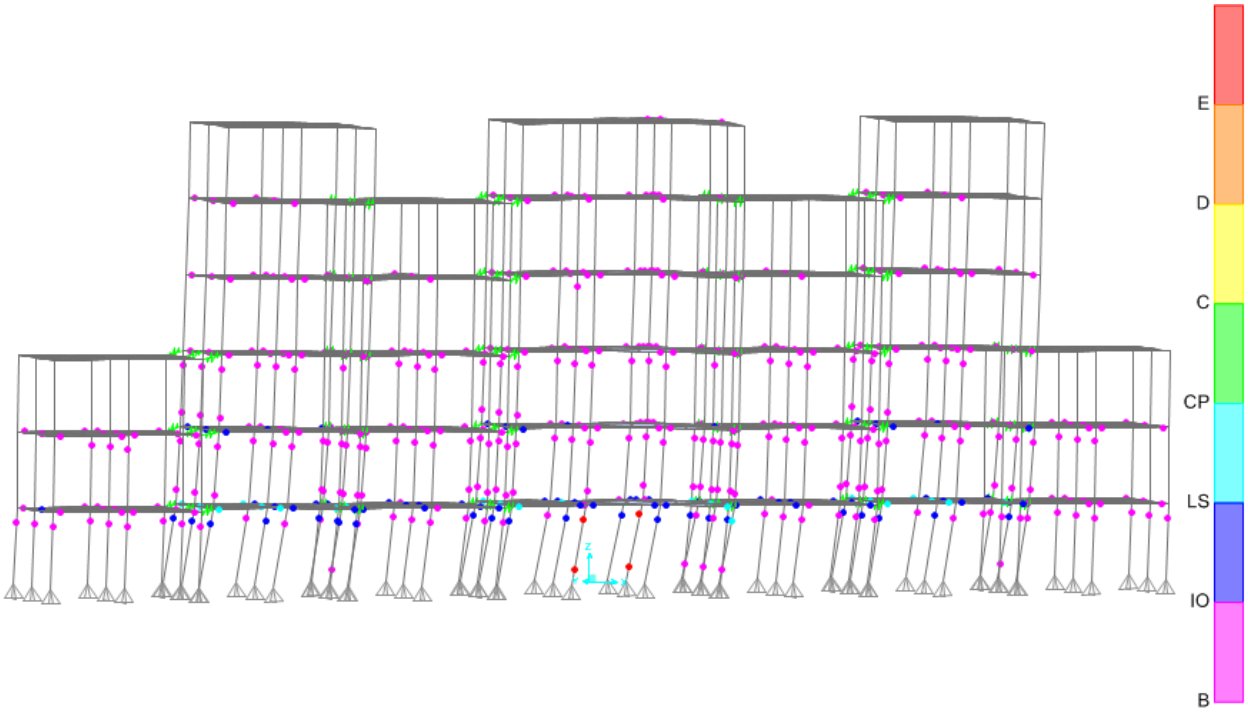
X yönü için hakim modun periyodu hasarsız modelimizde 0,72 sn iken hasarlı modelde 0,79 sn'ye yükselmiştir. Deprem yönü x yönlü olarak etkitildiğinden y yönlü periyot değerleri kayda değer seviyede değişmemiştir.

3.1. Yapı Deprem Performansının Deprem Kayıt Hareketi İle Doğrusal Olmayan Metotla Belirlenmesi

Yapının modal parametreleri kuvvetli deprem kuvveti ile doğrusal olmayan analiz ile SAP2000 programıyla analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır. Kuvvet kaydı olarak olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kullanılmıştır.

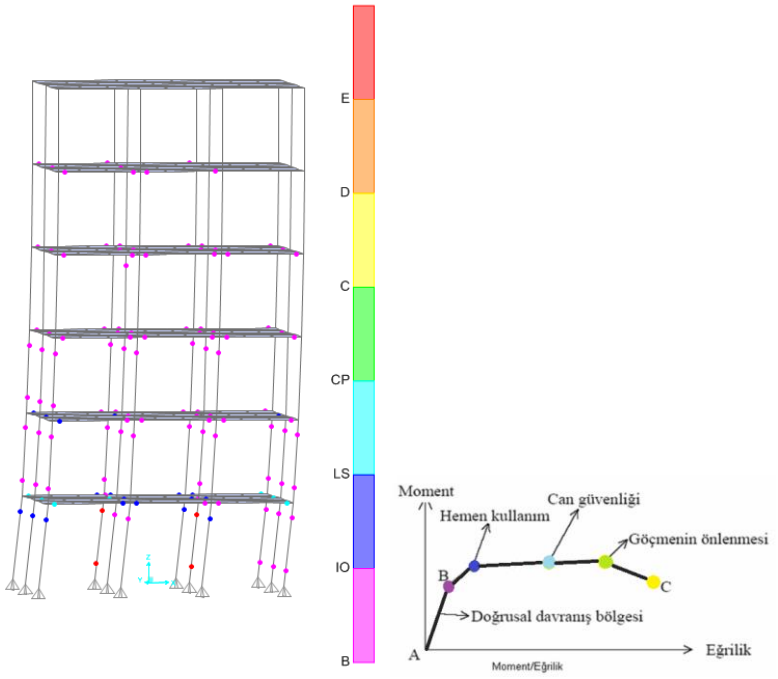


Şekil 2. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi Arçelik Arge Laboratuvarı İvme Kaydı



Şekil 3. Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Derzli Yapılar İçin Mafsallaşma Grafiği

Yapıdaki kolonların mafsallaşması incelendiğinde 1. Katta ileri hasar seviyesine bir takım elemanların göçme öncesi performans seviyesini aştığı gözlemlenmiştir. Buradaki referans şekil değiştirme parametrelerinde DBYBHY2007 değerleri baz alınmıştır.



Şekil 4. Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Tekil Yapı İçin Mafsallaşma Grafiği

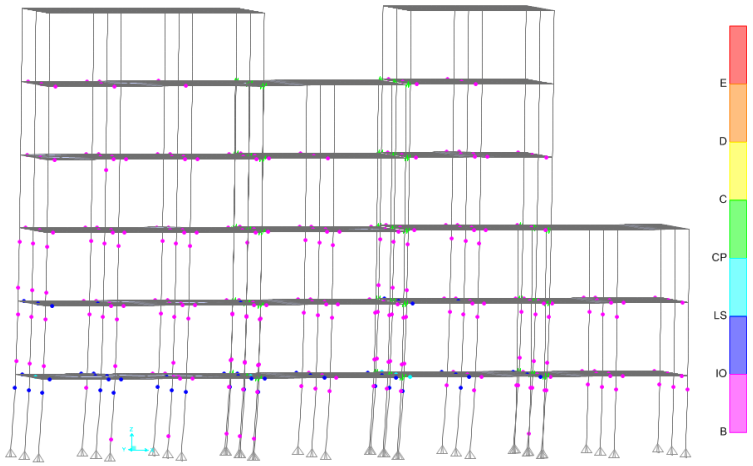
Tablo 2. Hasarsız (Modal) ve Hasarlı (Modal-NL) Tekil Yapı Parametreleri

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	**StepType**	**StepNum**	**Period**	**Frequency**	**CircFreq**	**Eigenvalue**
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2
MODAL	Mode	1	0,727888	1,3738	8,6321	74,513
MODAL	Mode	2	0,518311	1,9293	12,122	146,95
MODAL	Mode	3	0,4913	2,0354	12,789	163,56
MODAL	Mode	4	0,221551	4,5136	28,36	804,29
MODAL-NL	Mode	1	0,764527	1,308	8,2184	67,542
MODAL-NL	Mode	2	0,537851	1,8593	11,682	136,47
MODAL-NL	Mode	3	0,506025	1,9762	12,417	154,18
MODAL-NL	Mode	4	0,227994	4,3861	27,559	759,47

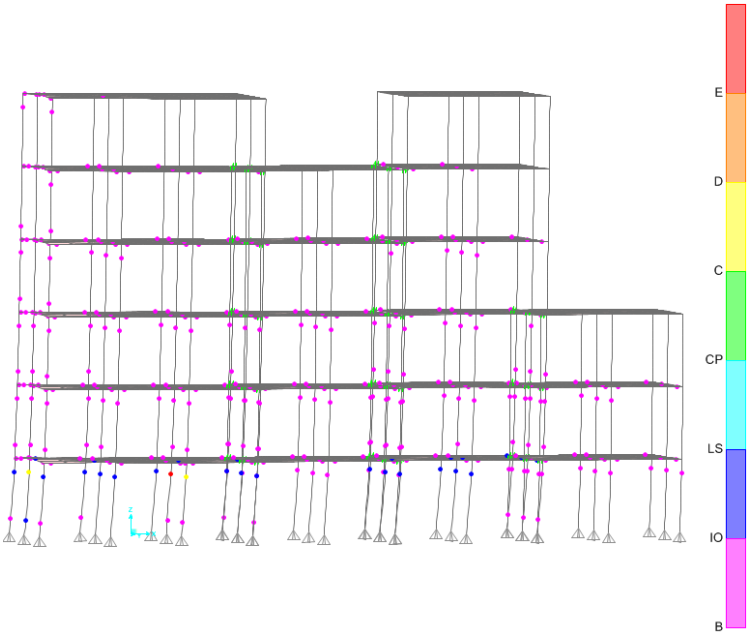
X yönü için hakim modun periyodu hasarsız modelimizde 0,72 sn iken hasarlı modelde 0,76 sn'ye yükselmiştir. Deprem yönü x yönlü olarak etkitildiğinden y yönlü periyot değerleri kayda değer seviyede değişmemiştir. Ayrık yapıdaki frekans değişimi derzli yapıya nazaran daha düşük seviyede olmaktadır. Hasar

mertebelerine bakıldığında ise yapısal elemanlardaki performans seviyesinin kayda değer mertebede değişmediği görülmektedir. Buradan deprem yönetmeliğinde öngörülen deprem derzi mesafesinin analitik model için yeterli olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir.

Deprem derzi 1 cm alınarak yönetmeliğe göre yetersiz bırakılan yapıyı ele aldığımızda aynı deprem kuvvetleri karşısında yapı ileri seviyede hasar almakta 18. saniyeden itibaren analiz kesilmektedir. Aynı zaman diliminde yeterli derz mesafesi bırakılan yapı ile mukayese edildiğinde yönetmelikte öngörülen mesafelerin yeterli ve gerekli olduğu anlaşılmaktadır.



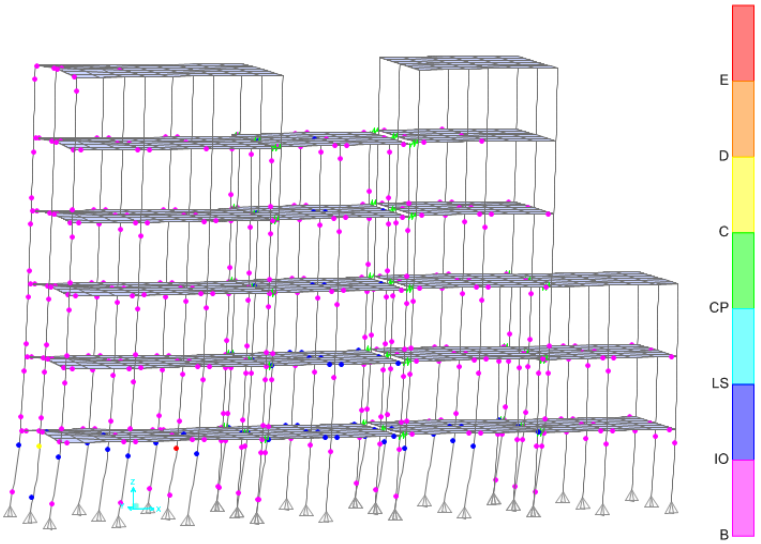
Şekil 5. Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Yeterli Derz Bırakılan Yapılar İçin 18. Saniyedeki Mafsallaşma Grafiği



Şekil 6. Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Yeterli Derz Bırakılmayan Yapılar İçin 18. Saniyedeki Mafsallaşma Grafiği

Özellikle birinci yapı ele alındığında göçme bölgesine kadar ilerleyen hasar mertebeleri görülmektedir.

Yetersiz derz bırakılan yapılardan birinci binaya bitişik olan yapıdaki kolonlar 30x60'dan 100x100'e çıkarılarak rijit yapı etkileşimine bakıldığında da benzer bir hasar dağılımı elde edilmektedir.

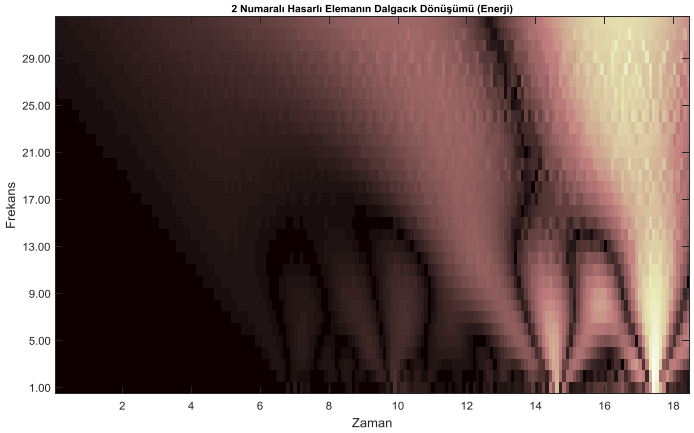


Şekil 7. Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Yeterli Derz Bırakılmayan Rijit Komşulu Yapı İçin Mafsallaşma Grafiği

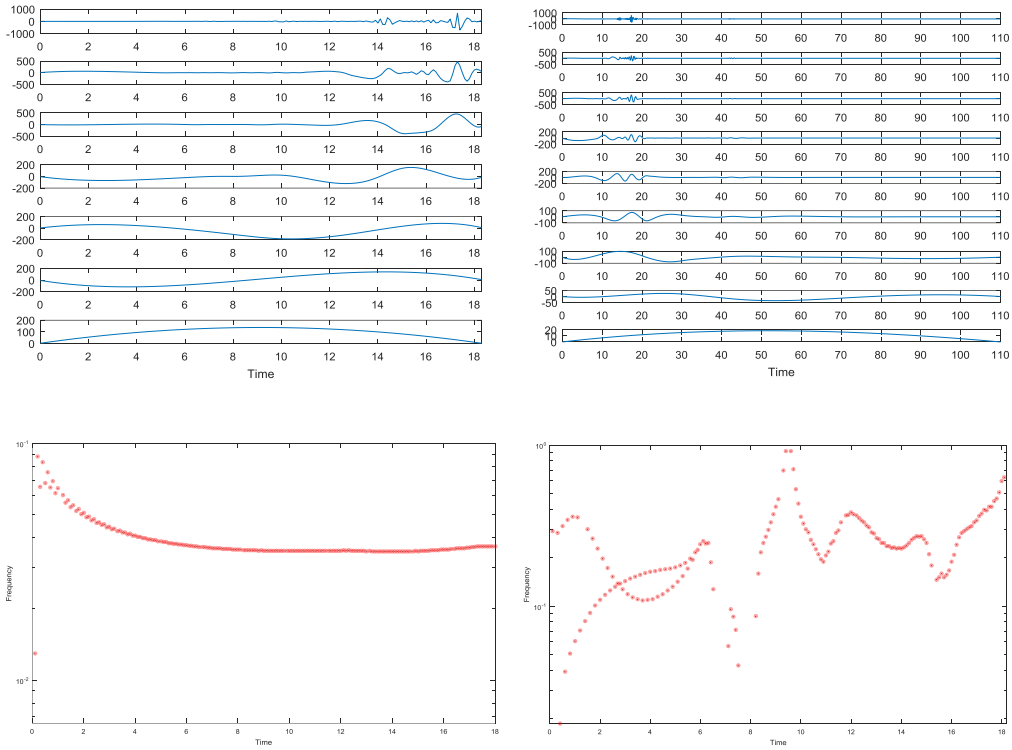
Derz boşluğu yetersiz bırakılan yapıya komşu binanın rijit olması hasar mertebelerini bir miktar azaltmakta ancak sonuç itibariye yapısal performans seviyeleri öngörülen mertebelere ulaşamamaktadır.

3.2. Hasarlı ve Hasarsız Parametreler Üzerinden Dalgacık Analizi Metodu ile Hasar Tanılama Çalışması

İleri seviyede yapısal hasar oluşan kolon üstünden ve minimum hasar alan kolon üzerinden ivme kayıtlarına bakılarak bitişik ve ayrık yapılar için zaman-frekans operasyonel modal parametrelerindeki değişimleri Db4, Morlet, Mexican Hat ve Symlet dalgacık filtreleri ile incelenerek iki durum arasındaki farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için gerekli kodlar MATLAB programıyla yazılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Morlet dalgacık modellerinin analiz yapısı için uygun ve yeterli olduğu görülmüştür. Burada hasar alan elemanlardan birisinin hasarlı ve hasarsız kayıtlarından yola çıkılarak dalgacık ve Hilbert Huang dönüşümündeki belirgin farklara bakılmıştır.



Şekil 8. Kuvvetli Depremde Hasar Alan Elemanın Dalgacık Dönüşümü



Şekil 9. Hasarsız (sol) ve Hasarlı (sağ) Elemanların Hilbert Huang Dönüşümü

Grafiklerde görülebileceği üzere dalgacık dönüşümünde hasar oluşum zamanında frekans mertebesi değişmektedir. Ancak Hilbert Huang dönüşümünde hasarsız elemanın frekans değişimi belirgin seviyede değilken hasarlı elemanda zamana bağlı olarak değişmektedir. Dalgacık ve Hilbert Huang dönüşümlerinde hızdan elde edilen enerji parametreleri kullanılmıştır.

4. SONUÇ

Çalışmamızda gösterildiği gibi DBYBHY2007'de belirlenen düşey deprem derzleri bitişik nizam yapılar için gerekli ve yeterlidir. Deprem derzlerinin bırakılmadığı yapılarda hedefleren yapısal performans seviyeleri karşılanamamaktadır. Bitişik nizam yapılarda komşu binanın rijit olması yapısal hasarları bir miktar azaltmakla birlikte hedeflenen performans seviyesi karşılanamaktadır. Bu sebeple düşey deprem derzlerinin yönetmelikte belirlenen miktarda bırakılması binaların deprem performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

Yapısal elemanlarda dalgacık ve Hilbert Huang dönüşümü ile hasar tespiti etkili bir metot olarak kullanılabilmektedir. Hasar gören elemanlarla hasar görmeyen elemanlar dalgacık spektrumlarındaki zamanla değişen frekans muhteviyatından yola çıkılarak anlaşılabilmektedir.

Güncellenecek olan deprem yönetmeliğinde yapısal sağlık izleme metotlarına bu çalışmamızda kullanılan zaman-frekans alanında çözünürlük veren dönüşüm metotları kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Davis, R.O. (1992). Pounding of buildings modelled by an impact oscillator. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1992*; 21:253–274.

Pantelides, C.P. and Ma, X. (1998). Linear and non-linear pounding of structural systems. *Computers and Structures*; 66:79–92.

Chau, K.T. and Wei, X.X. (2000). Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 30:633–651.

Papadrakakis, M. and Mouzakis, H. (1995). Earthquake simulator testing of pounding between adjacent buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 24:811–834.

Papadrakakis, M., Apostolopoulou, C., Zacharopoulos, A. and Bitzarakis, S. (1996). Three-dimensional simulation of structural pounding during earthquakes. *Journal of Engineering Mechanics*; 122:423–431.

Filiatrault, A., Wagner, P. and Cherry S. (1995). Analytical prediction of experimental building pounding. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 24:1131–1154

Stavroulakis, G.E. and Abdalla, K.M. (1991). Contact between adjacent structures. *Journal of Structural Engineering*; 117:2838–2850.

Filiatrault, A. and Cervantes, M. (1995). Separation between buildings to avoid pounding during earthquakes. *Canadian Journal of Civil Engineering*; 22:164–179.

Lin, J.H. (1997). Separation distance to avoid seismic pounding of adjacent buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 26:395–403.

Hao, H. and Zhang, S.R. (1999). Spatial ground motion effect on relative displacement of adjacent building structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 28:333–349.

Jeng, V. and Kasai, K. (1996). Spectral relative motion of two structures due to seismic travel waves. *Journal of Structural Engineering*; 122:1128–1135.

Maison, B. and Kasai, K. (1992). Dynamics of pounding when two building collide. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*;Vol. 21:771-786.

Rahman, A.M., Carr, A.J. and Moss, P.J. (2001). Seismic pounding of a case of adjacent multiplestorey buildings of differing total heights considering soil flexibility effects. *Bull NZ Soc Earthq Eng*;34:140–159.

Gong, L. and Hao, H. (2005). Analysis of coupled lateral-torsional-pounding responses of onestorey asymmetric adjacent structures subjected to bi-directional ground motions Part I: Uniform ground motion input. *Advances in Structural Engineering* 8;5: 463-479.

Wang, L.X. and Chau, K.T. (2008). Chaotic Seismic Torsional Pounding between two Singlestory Asymmetric Towers. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China

Çetinkaya, G. (2011). Deprem Yer Hareketine Maruz Komşu Binalarda Çarpışma Analizi. Yüksek Lisans Tezi; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Mahmoud, S., Elhamed, A.A. and Jankowski, R. (2013). Earthquake-induced pounding between equal height multi-storey buildings considering soil-structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*;1-28.

Anagnostopoulos, S. A. (1988). Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16, 443-456.

Pant, R. and Wijeyewickrema, A. C. (2010). Seismic pounding between reinforced concrete buildings: A study using recently proposed contact element models. Proc. of Fourteenth European Conference on Earthquake Engineering. Ohird, Republic of Macedonia.

Mate, N. U., Bakre, S. V. and Jaiswal, O. R. (2012). Comparative Study of Impact Simulation Models for Linear Elastic Structures in Seismic Pounding. The 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.

Muthukumar, S. (2003). A Contact Element Approach with Hysteresis Damping For The Analysis and Design of Pounding in Bridges, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia.

Beyen, K. (2017). Titreşim verisiyle güncellenmiş sonlu eleman modeliyle hasar simulasyonu (Damage simulation by finite element updating using vibration characteristics). 10.17341/gazimmfd.322165, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32:2, 403-415