Yüksek Yapı Davranışında Yakın ve Uzak Alan Kaynaklı Depremlerin Etkisi

Kemal Beyen

Dr. Deprem Müh. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe, Kocaeli, Türkiye
Email: kbeyen@kocaeli.edu.tr

Özet

Yakın ve uzak alan kaynaklı depremlerin yapısal davranış ve ürettikleri tepkiler üzerine etkilerinin yürütüldüğü çalışmalar gündemin sıcak konularıdır. Benzer şekilde yakın ve uzak kaynaklı deprem şartlarında yüksek yapı davranışının kayıtlarla araştırılması bir başka önemli konudur. Yakın alan kaynaklı yer hareketinin deprem merkezi civarında yüksek yapılara kıyasla az katlı olan konvansiyonel alışkanlıklarla inşaa edilmiş konutlarda hasarların ağır hasardan göçmeye kadar giden bir yayılım içinde dağılım gösterdiği bilinmektedir. Genellikle yakın alan depremler kararlı yer deplasmanı ve yüksek freakans içeriğiyle kısa süreli itkilerle depremin başında yapıya yüksek enerji girişi verirler. Dahası, açık alan yer hareketinin yapı temel seviyesinde büyük oranda değişimi ise yapı-zemin etkileşimini tartışmaya açabilmektedir. Aslında, her yakın-alan kaynaklı deprem kaydı kendine özgün frekans ve dalga yayılım farklılıkları içermektedir. Yerel şartlarda oluşan değişik alan kaynaklı depremler birbirlerinden farklı olup deprem oluşum mekanizmalarının, kaynaklanma, yırtılma, yönelme ve yayılım özellikleri açısından her biri taşıdıkları kendi özgün karekteristiklerini sergilerler. Bu açıdan, sunulacak çalışma yakın ve uzak alan kaynaklı depremler altında yüksek yapının davranışını incelemeyi amaçlamaktadır. Yakın ve uzak alan kaynaklı depremlerin karekteristik özelliklerinin çalışma bölgesinde gösterilmesi, sunduğu yer hareketi açısından farklılıkları ve yüksek yapı tepkisinde gözlenen temel farklılıkları bu çalışmada etraflıca tartışılmaktadır. Bu çalışmada yapı sağlığı izleme programı içinde bulunan bir yüksek yapı ağından temin edilen veriler kullanılmıştır. Bir dizi sinyal işleme ve yapı tanı algoritmaları uygulanarak önemli tepkisel karekteristikler ve ilgili yapısal davranışı açıklayan deplasman, hız ve ivme zaman grafikleri her iki tür depremler için elde edilmiştir. Değişik seviyedeki katlar ile temel ve giriş katları arasında elde edilen transfer fonksiyonları yakın ve uzak alan kaynağa sahip depremler altında yapıda ürettiği tepkisel davranışlar kinematik değişimler içinde sunulmuştur. Bunların yanı sıra, yerel zemin tepki davranışları ve çalışılan yüksek yapının global davranışı yakın ve uzak alan depremler altında gösterdiği benzerlikler ve farklılıklar sonuçlarıyla beraber tablo ve grafikler eşliğinde tartışılmıştır. İncelenen yakın alan kaynaklı depremlerde maksimum deplasman yön dağılımı fay normali ve fay dik yönleri ile bir tutarlılık göstermediği izlenmiştir. İncelenen yapılar gibi lineer elastik davranış sergileyen mühendislik yapılarında maksimum yerdeğiştirmeler hakim hız itki frekanslarıyla yapı hakim frekanslarının yakın olduğu durumlarda izlenmiştir. Rezonans potansiyeline yakın şartlarda geometrik veya eleman kapasite aşımından kaynaklı doğrusal olmayan davranışın periyotları büyüterek senkronizasyonu bozması ve rezonans çanağına düşmesi beklenebilir. Yapı yüksekliklerinin kilometreye ulaştığı günümüz mühendislik dünyasında, yapıdan istenen sismik talepler açısından ilk modlarda yakın alan kaynaklı depremlerin gökdelenlerde artan periyotla beraber hız taleplerini ve deplasman taleplerini yükseltiği, buna mukabil uzak alan kaynaklı depremlerin düşük genlik altında dahi kararlı salınımlarla yapı titreşimini saate ulaşacak sürelere uzattığı izlenmiştir. Uzayan transient davranış özellikle düşük sönüm özelliği olan yüksek yapıların, yerel zemin hakim periyotlarının büyük olduğu veya yapı periyot bandında kaldığı koşullarda gerçekleşmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yakın-alan Deprem, Uzak-alan Deprem, Veri İşleme, Yapı Tanılama, Göreceli Davranış, Yüksek Yapı.

1. Giriş

Farklı özellikler sergileyen yakın alan kaynaklı depremlere mühendislik yapılarının sergilediği tepkiler uzak alan kaynaklı depremlerin ürettiği tepkilerle mukayese edildiğinde önemli çarpıcı farklılıkların öne

çıktığı gözlenmektedir (M. Davoodi, M. Sadjadi, 2015). Genel olarak deprem kaynağını oluşturan fay düzlemine parallel ve normal yönlerde ortama yayılan yer hareketi sismik kaynağın kırılma-üretme özelliklerinden, kaynaktan çalışılan sahaya dalga yayılma ortamının etkilerinden ve yerel şartlar olarak nitelendirilen alt katman ve üst topoğrafik düzensizlikleriyle yerel zemin özelliklerinden etkilenerek yer hareketini şekillendirir (Beyen, K. ve Tanırcan, G., 2015, Beyen, K., 2019). Dalga yayılımının seyahati boyunca aldığı bu etkilerden dolayı kaynağa yakın çevredeki yer hareketi özellikleri uzak alanlara seyahat ederken değişir ve hasar potansiyeli bazı yapılar için yükselirken bazı yapılar için tehlike olmaktan çıkar. Deprem kaynağına yakın alanlarda yer hareketi yüksek genlik ve büyük periyot ivme ve hız itkileriyle (pulse) fay normalinde oluşur. Yönelim-yayılım etkisi, kalıcı yer değiştirme ve parçalı kopma etkisinde (fling step effect) yüksek frekans zenginliğiyle kayıtlarda görünür (Beyen, K. ve Tanırcan, G., 2015, Beyen, K., 2019). Fay kırılma mekaniği incelenecek olursa yırtılma/kırılma enerjisinin ürettiği dalga yayılımı ($V_{kırılma}$) ortamın kayma dalga yayılım hızı (V_s)'e yaklaştıkça (örneğin, $V_{kırılma} \sim 0.8V_s$) super kayma (super shear, $V_{kırılma} \approx V_s$) hızına yaklaştıkça önündeki yakın sahaya fay enerjisinin büyük bir miktarını kısa sürede büyük genlik ile transfer eder. Bu parallel fay davranışı fay normalinde deprem hız kayıtlarında başlangıçta görülür. Uzak alan kaynaklı deprem yer hareketi ise kayıtlarda mutedil zaman uzunluklarında büyük periyotlu salınımlar içinde görünür. Fay-kırılmasının ürettiği dalgaların yüksek frekans bileşenleri ince, kalın veya mercek yer katman ortamı içinde yayılır ve katman sınırlarında yansıma ve kırılma şartlarında süzülür ve uzak alanlara büyük periyot ve uzun süreli salınım genlikleri ulaşır.

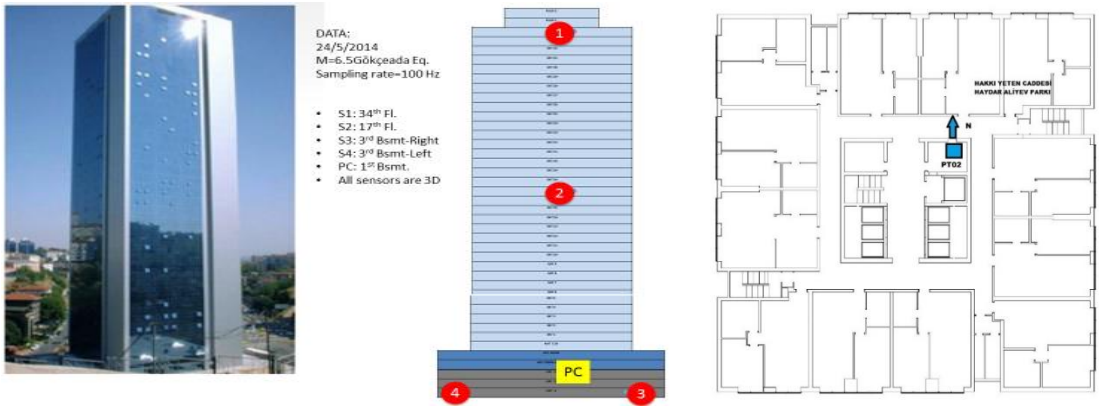
2. Yakın ve uzak alan kaynaklı depremlerin yapısal davranışa etkisi

Yapılar için hala çözülemeyen bir mühendislik tasarım problemi olarak yakın-alan büyük periyotlu darbe (pulse) benzeri yüksek yer hızı ve yayılım-yönelim etkisi ciddi saha kayıtlarıyla desteklenmek zorundadır. Benzer şekilde yatay yer düzlemindeki yer hareketinin bizati kaydedilmiş fay-normali ve fay-dik yönlerdeki dalga yayılımlarının veya döndürülmüş fay-normal ve fay-dik bileşenlerinin yüksek yapı tasarımında her zaman en büyük kritik sismik talebi veremeyeceği veya maksimum yer hareketini veren istikametteki hakim tepe genlikleri ve tepe frekanslarıyla yüksek yapının temel karekteristik frekansları yapıda kritik yapısal yer değiştirmelerin tahmininde tutarlılık düzeylerinin sorgulanması problemin çözümünde faydalı olacaktır (Archila, M., Ventura, C. E. vd., 2014). Gerçekte yönelim etkisinin yüksek yapılarda doğuracağı kritik yerdeğiştirme tepkilerini önden kestirmenin hale hazırda uygulanan bir yöntemi de yoktur. Klasik yaklaşım içinde ciddi vakit harcanan bir yöntem olarak; yapının plandaki eksenlerine göre belirli açı artımıyla sistematik olarak döndürülen yer hareketinin her bir bileşeninin yapıda üreteceği maksimum deplasman tepkilerinin zarfından üretilen deplasman spektrumu kullanılarak tasarım için nümerik analiz yürütülmektedir (Manuel Archila, 2014). Tartışılan kritik sismik talep ve yönelim yönüyle ilgili karar verme güçlüğüne bir çözüm olarak bu çalışmada cihazlandırılan mecvut bir yüksek yapının son bir kaç yılda maruz kaldığı yakın ve uzak alan kaynaklı depremler incelenerek yapı davranışını etkileyen yön ve değerleri tartışılmıştır. Bu tartışmaya ışık tutması açısından farklı alan kaynaklı farklı yayılım şartlarında etkiyen depremlere örneğin yapının ana eksenleri üstünden izlenen ivme ölçerlerle kaydedilen tepki kayıtları kullanılarak 3 boyut için tartışılmıştır.

Reyes ve Kalkan (2012)' ın bir çalışmasında yapı tepkilerinin hesaplanmasında yer hareketinin özellikle yakın alan deprem etkisinde (aktif faya 5Km ile 60 Km mesafelere kadar) faya parallel ve fay normal bileşenleriyle veya maksimum yönde (CBSC, 2010) mühendislik parametrelerinin sismik talebinin hesaplanmasının avantajları tartışılmıştır. Yakın alan deprem etkilerinin izlendiği mesafeler ise gözlemlere bağlı olarak tartışma konusu olup tam bir mutabakat yoktur. Örneğin California Yapı Yönetmeliği-Bölüm 1615A.1.25 (CBSC, 2010) 5Km'yi sınır olarak verirken bir diğer saha çalışması 60Km'lere kadar etkilerin izlendiğini paylaşmaktadır (Stewart v.d., 2001). Fay normal ve fay parallel bileşenlerinin veya maksimum yönde etkiyen yer hareketinin doğrusal olmayan analizlerde beklendiği gibi mühendislik parametrelerinde kritik sınır değerlere ulaşılmadığı sonucu çıkarsanmış ve yeni tasarım için güvenli tarafta kalacak bir klasik yaklaşım olarak tasarım tutarlılığının sınanması amacına uygun olabileceği Reyes ve Kalkan (2012) tarafından ifade edilmiştir. Zaman tanım alanında davranış çalışılan çok serbestlik dereceli doğrusal elastik simetrik ve asimetrik plana sahip yapıya uygulanan bir seri döndürülmüş açılar altındaki girdi bileşenleri örneğin yapı simetri eksenleri boyunca uygulanan yük

şartlarındaki değerlerine göre mühendislik talep parametrelerini % 80 daha fazla değerlerle verdiğini Athanatopoulou (2005) ifade etmektedir. Her bir depremin kendine özgün karekteristik özellikleri vardır. Frekans içeriğinden zaman tanım alanındaki büyüklüklere gelinceye kadar örneğin tepe yer ivmesi (PGA), tepe yer hızı (PGV) ve tepe yer değiştirmesi (PGD) gibi değerlerin farklı olmasının yanısıra tepe frekansları değişir veya benzer frekanslı sinyal zaman kayıt hikayesinde bir kaç farklı zaman anında görülebilir ve bu farklıkların yapısal tepkileri ne seviyede etkileyeceği önden tahmin edilemez. Dolayısiyle analizi yapılacak bir yapının niteliğine göre deprem kaydının seçilebilmesi için saha ve yapıya özel çalışmaların yapılması kaçınılmazdır. Günümüzün yönetmelikleri yapıların analiz ve tasarımını performans yaklaşımıyla hesaplatmaktadır. Dolayısiyla, yapı için öncelikle belli bir deprem seviyesinin tanımlanması ve farklı deprem düzeyleri için yerel deprem spektrumları kullanılarak belli yer değiştirme veya dönme limitlerinin aşılmaması koşulunun sağlanması istenir (TBDY, 2018). Önemli bir sonuç olarak, yakın alanda yayılım-yönelim etkilerine maruz kalan bir yapı aktif fay alanında olmayan yapının taban kesme mukavemetine göre daha yüksek değerlerde tasarlanmak zorundadır. Bu gerçek bazı tasarım parametrelerinin özellikle 1994 Northridge depreminden sonra yönetmeliklerde yer almasını kaçınılmaz kılmıştır. Örneğin, Somerville vd. (1996)'da ilk önerdiği ve Somerville, (2003) yayınında tartıştığı gibi yakın-fay-faktörü olarak 1.5 değeriyle UBC-1997 (Uniform Building Code, 1997) önerdiği spektrumunu genişleterek yönelim-yayılım etkisinin izlendiği daha uzun periyotlarda fay normali yer hareketlerinin tasarımda göz önüne alınmasını sağlamıştır. Deprem kaynağına 7.5 Km mesafede 20 ve 30 katlı betonarme iki test bina modeli planda simetrik kayma perdeleri ve düsey yüklere göre tasarlanmış kolon sistemlerden oluşan taşıyıcı sistemlerde de benzer yakın fay faktör değeri Smyrou, E., (2014) çalışmasında doğrulamıştır. Yayılım-yönelim etkisinin yoğun olduğu yakın alan kaynaklı depremler yüksek yapılardan büyütülmüş yerdeğiştirme ve hız talepleri isterken, ivmeye hassas spektrum bölgesinde ise periyotlar uzar ve deprem yapıdan ileri periyotlarda dahi talebini sürdürür. Yer hız kayıtlarındaki itki (pulse) periyotlarıyla yapı hakim periyotlarına oranı olan kritik değer yapı tepkisi için önemlidir. Özellikle yüksek yapılarda elastik teoriyle hesaplanan hakim modal periyotlar deprem esnasında operasyonel şartlar altında elastik ötesi davranışlarla değişir ve büyürler. İtki periyotlarının bu periyot bandında yapı üstündeki yayılımı ise geniş yerdeğiştirmelere ve üst katlarda büyük kesme kuvvet talebine neden olur (Champion, C., Liel, A., 2012).

Yakın alan kaynaklı depremlerin Fourier spektrumları incelenecek olursa dar bir frekans bölgesinde belirgin bir tepe periyodunda bir hakim tepe genellikle izlenir. Bu özellik diğer uzak alan kaynaklı depremlerde görülmez. Dar frekans bandında izlenen yüksek tepe genlikli dalganın yüksek yapının ilk modal frekansıyla rezonansı dalga pasajının etkisine giren yapının salınımları yayılan dalgayla uyumlu deformasyonlar geliştirecektir. Bu ise çok büyük kat ötelenmelerine neden olacağı gibi, P-Delta etkilerini de tetikleyecektir. Bu kısa süreli ani itki (pulse) büyük miktar kinetik enerjinin yapıya transfer edilmesini haklı olarak akla getirir. Arias şiddet eğrileriyle izlenebilecek toplam enerjinin %5'den %95'e yükselme süresi yakın alan kaynaklı depremlerin tanınmasında bir diğer ayırt edici parametredir ve $T_{\%5-\%95}$ diğer depremlere göre çok daha kısa olduğu farkedilecektir. Diğer bir önemli ayırt edici özellik olarak depremin aletsel büyüklüğü ile ilişkinin etken olmadığı Heydari ve Mousavi, (2015)'nin



Şekil 1. Yüksek yapı genel görünümü ve Yapı yüksekliği boyunca 1. Bodrum, 17. Kat ve 34. Katlarda 3 bileşen kayıt cihazların konumları ve normal kat planında görünümü.

bir çalışmasında gösterilerek yapı hakim periyoduyla itki periyodunun oranı ile katlar arası göreceli yatay yerdeğiştirmenin arasındaki ilişkinin gücü gösterilmiştir. Diğer taraftan, uzun periyotlu yapıların uzak alan kaynaklı depremlere verdiği tepkiler ve aldığı hasarlar geçmişte kısıtlıda olsa izlenmiştir. Çelebi vd. (2014) çalışmasında, M_w 7.3 Kern County depremi (1952) 150 km uzakta Los Angeles'da bir çok yüksek yapıyı uzun süreli salladığını aktarmaktadır. 1970 M_w 7.1 Gediz depremi 135 km uzakta Bursada araba fabrikasının çökmesine neden olmuş, 1985 M_w 8.0 Mexico depremi 400 km uzakta bulunan göl yatağına kurulmuş olan Mexico şehrinde büyütme ve rezonans sonucu deprem merkezine göre çok büyük hasar ve can kaybı verdirmiştir. Teknolojik yetersizlikler yüzünden geçmiş depremlerde cihazlandırılmış yüksek yapılar ve uzak alan kaynaklı deprem etkileri aletsel olarak çalışılamamıştır. Uzak alan kaynaklı depremlerin yüksek yapılar üzerindeki etkileriyle ilgili önemli bir çalışma olarak burada Çelebi vd., (2014)'nin son çalışmasındaki sonuçlar paylaşılabilir. 11 Mart 2011 tarihinde M_w 9.0 büyüklüğünde olan büyük Doğu Japon (Tohoku) depreminde 770 km uzakta bulunan 256m yüksekliğindeki yapı üzerinde bulunan istasyonların kaydettiği tepkiler kullanılarak yüksek bir yapının uzak alan kaynaklı uzun periyotlu yer hareketine verdiği tepkiler tartışılmıştır. Yapı yakınında kaydedilmiş kuyu kayıtlarında en büyük tepe genliğinin büyüklüğü %3g değerinde olan ve kuvvetli salınım süresinin 140 sn'yi bulduğu ve sonrasında 300 sn – 1000 sn'ye ye ulaşan insanın (hissetme) yaşam konforu eşik değerlerini (Beyen, K. 2017) aşan salınımların nihayet sonlanabildiği ifade edilmiştir (Çelebi vd., 2014). Salınım süresinin rahatsızlık veren seviyelerde kalması ve uzamasının yerel zemin hakim frekansıyla yapı hakim frekansının rezonansa girmesi ve sönümün yüksek yapılarda esnek geometriden dolayı çok düşük olmasıyla açıklanabilmektedir (Çelebi vd., 2014).

3. Çalışmanın amacı

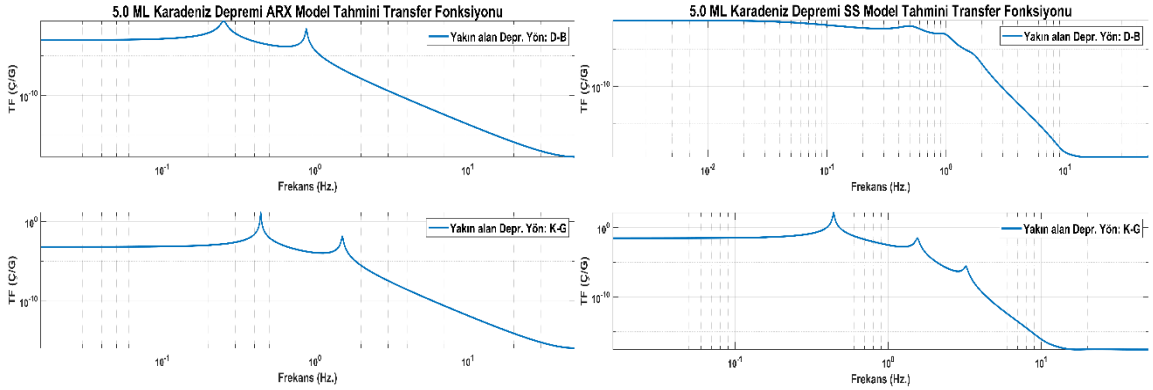
Deprem çalışılan merkezlerde yakın alan kaynaklı büyük depremlerin serbest alan istasyonlarda kaydedilmiş veri sayısı 1995 Kobe depremi, 17 Ağustos 1999 7.4 Mw Kocaeli depremi ve takip eden 12 Kasım 1999 7.2 Mw Düzce ve 1999 Taiwan Chi chi depremleriyle bilimsel çalışmalar için önemli sayılara ulaşmış ve yakın alan kaynaklı deprem arşivi zenginleşmiştir. Cihazlandırılmış yüksek yapılar üzerinden alınan yakın ve uzak alan kaynaklı depremlere karşı yapısal tepki kayıtları çok sınırlıdır. Bu çalışmada konut amaçlı inşaa edilmiş olan 152 metre yüksekliğinde Şekil 1'de boy kesiti ve üç seviyede izleme ağının bulunduğu katların plan çizimi görülen yüksek yapının kaydettiği bölge depremlerinden yakın ve uzak alan kaynak farkının yapı tepkilerindeki etkileri çalışılmıştır. Çalışma yapısı üzerinde izlenen depremlerden bütün istasyonların kaydettiği çalışılmaya değer depremler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışma yapısı üzerinde izlenen depremler

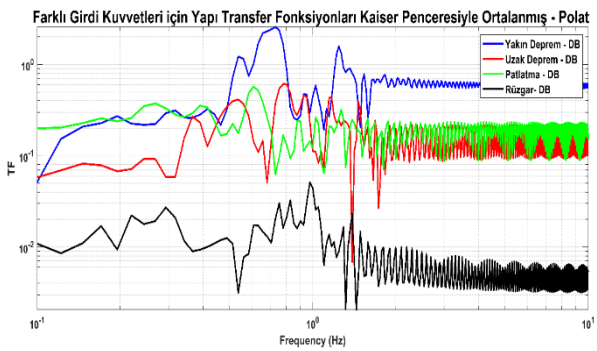
Kule İzleme Ağı Deprem Kayıtları									
	Tarih	**Zaman**	**Zaman**	**Enlem**	**Boylam**	**Derinlik**	**Büyüklük**	**Mesafe**	**Bölge**
No	**(yyyyaagg)**	**(Ulusal)**	**(Uluslararası)**	**(derece)**	**(derece)**	**(km)**	**ML**	**(km)**	
1	20130730	08:33:08	05:33:08	40,3037	25,7803	9,8	5,3	287	Kaleköy-Gökçeada
2	20131124	22:49:37	19:49:37	40,7843	31,876	8	4,8	240	Ulu Mescit (Bolu)
3	20131127	06:13:37	04:13:37	40,851	27,9198	9,6	4,7	96.6	Marmara açıkları (Tekirdağ)
4	20140130	04:54:33	02:54:33	40,6733	29,2688	8,5	3,1	49.89	Yalova
5	20140205	03:56:43	01:56:43	41,3768	28,622	16	3,8	46.0	Karaburun-Arnavutköy
6	20141122	21:14:15	19:14:15	45,742	27,2147	27,9	5,6	526.0	Romanya
7	20150117	02:42:34	00:42:34	39,8848	30,3955	5,5	4,3	175.0	Karaçobanpınarı Eskisehir
8	20150119	13:10:43	11:10:43	40,8648	28,6787	16	3	40.3	Marmara Denizi
9	20150122	18:47:04	16:47:04	40,6233	29,1082	12,3	2,5	51.0	Çınarcık (Yalova)
10	20150123	12:19:42	10:19:42	40,0647	28,587	5	4,5	119.0	Uğurlupınar (Bursa)
11	20150201	12:46:31	10:46:31	40,7125	27,4973	6	3,5	135.0	Güzelköy-Tekirdağ
12	20150202	06:41:03	04:41:03	40,3412	26,0567	13,4	4,1	264.0	Saros Körfezi (Ege D.)

4. Çalışma Yapısının Karekteristik Özellikleri

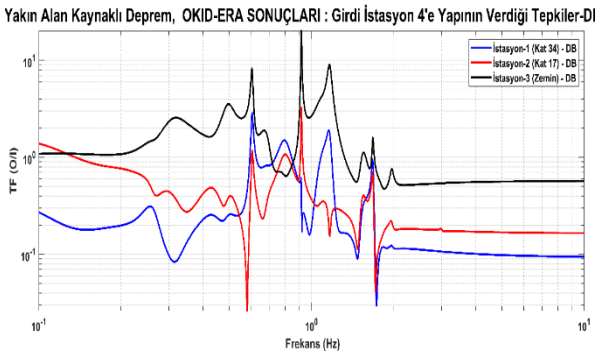
Yapının kaydettiği Tablo 1'de listelenen deprem kayıtlarından tipik olanlarla yürütülen tanılama çalışmalarında eşzamanlı kaydedilen bodrum kat (girdi) ve 17. ve 34. katlara (çıktı) ait yapı tepki verileri girdi-çıktı (G-Ç (I-O)) ilişkisi içinde farklı yöntemlerle frekans ve zaman tanım alanında çözülerek sonuçların tutarlılık seviyesi test edilmiştir. Sinyal analizlerinde genel yapısal davranışın anlaşılmasına katkı vermeyen gürültü 0.05Hz öncesi ve Nyquist frekans olan 50Hz sonrası ham veriden süzdürülerek yapı tanılama çalışılmıştır. Frekans tanım alanında Fourier dönüşümleri kullanılarak elde edilen güç spektrumları, zaman tanım alanında ise ilave girdi etkisinde otomatik regresyon (ARX – Auto Regressive eXstra Input) modeli uygulanarak Şekil 2'de ve Durum-Uzay (SS – State Space) matematik modelleriyle tanımlanmış farklı parametrik modeller farklı pencereleme (Hanning, Kaiser windows) teknikleriyle ortalanarak (yumuşatılarak (smoothing)) elde edilen yapı transfer fonksiyonları ise Şekil 3'de verilmiştir. Ayrıca Gözlemci Kalman Tanılama–Eigen Özdeğer Gerçekleşme Algoritması (Observer Kalman Identification-Eigen Realization Algorithm-OKID-ERA) Matlab (2017)'de yazılarak Şekil 4'de gösterilen sonuçlar ile sonuçların güvenilirlilik seviyesi test edilmiştir. Dinamik davranışı tam bilinmeyen yapıda kaydedilmiş titreşim sinyalleriyle yürütülen analizlerde aynı ortak sonuçlar sağlanmıştır. DB (EW) yönünde yapının doğal hakim frekanslarını 0.25Hz, 0.9Hz; KG (NS) yönünde 0.4Hz, 1.4Hz ve yaklaşık 3Hz'lerde global tepki tepelerinin bütün kayıt istasyonlarında ortak olarak harekete iştirak ettikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 5'de verilen grafiklerde ise uygun ana dalgacık ailesiyle dalgacık (wavelet) analizleri yürütülerek zaman ekseninde frekans değişkenliği uzak, yakın depremlerde, patlatma kayıtlarında ve fırtına şartlarında stasyoner lineer özellik gösterdiği anlaşılmıştır (Beyen, K., 2017).



Şekil 2. Yakın deprem Kat 34 EW bileşen tepkisi için ARX parametrik TF (sol) ve Durum-Uzay (SS) parametrik TF (sağ).



Şekil 3. Girdilerin DB bileşenlere Kat34 tepki güç spektrumundan hesaplanmış TF (Beyen, K., 2017).

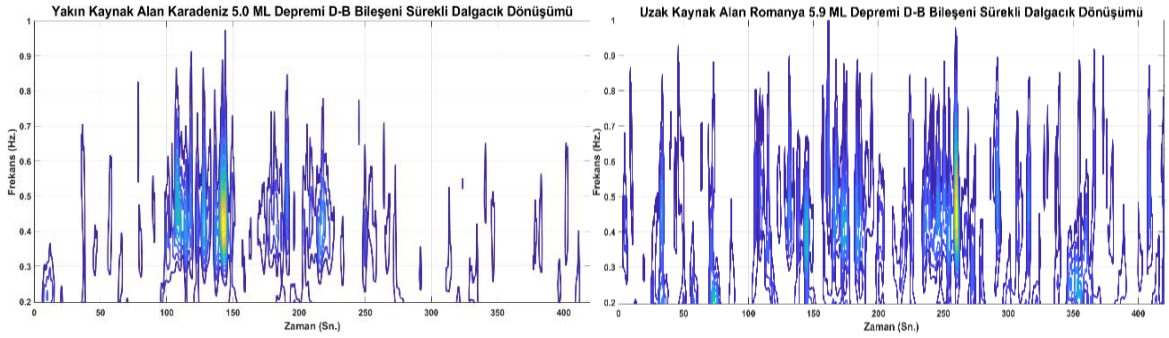


Şekil 4 Yakın-alan kaynaklı (Karadeniz ML 5.0) DB depremi OKID-ERA analizi TF Fonksiyonu.

5. Yakın ve uzak alan kaynaklı depremler ve yapı tepkisi

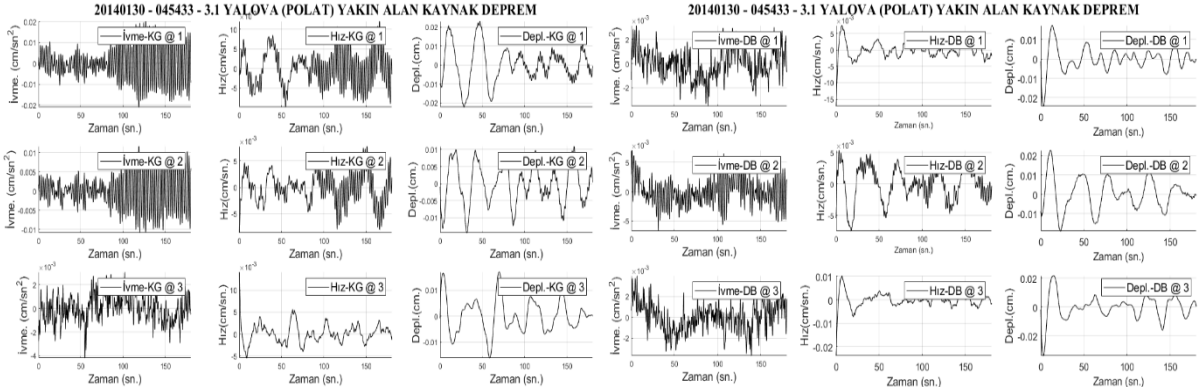
Yakın alan kaynaklı depremlerin kayıtları incelendiğinde diğer depremlerden farklı bir özellik zaman hikayelerinde Şekil 6'da görüldüğü gibi farkedilir. Şekil 6'da yakın alan kaynaklı ML 3.1 büyüklüğünde ocak derinliği 8.5 Km olan Yalova depremine 49.9 Km uzaklıktaki yüksek yapının verdiği tepkilerin

bodrum katı (3), 17. Kat (2) ve 34. Kat (1) seviyesinde ivme, hız ve deplasman zaman geçmişlerinin KG (soldaki 3x3 çizimleri) ve DB (sağdaki 3x3 çizimleri) bileşenleri incelendiğinde bodrum kat (3) istasyonuna gelen hız ve deplasman itkilerinin büyük periyotlu ve büyük genlikli tek bir itkiyle DB bileşeni yapıya ulaşıyor. Fay normali olan DB yönünde yayılan yüksek kırılma enerjisi ortamın kayma hızına yaklaşarak tek periyotluk büyük bir itkiyle Şekil 6 istasyon 3'de DB hız hikayesinde görüldüğü gibi yaklaşık 35 saniye periyotluk tek pals ile boşalıyor. Sonrasında arkalanmış ve boşalmış fay kırılımının



Şekil 5. Yakın (Karadeniz 5.0ML) (sol) ve uzak (Romanya 5.9ML) (sağ) depremlerin EW bileşen Sürekli Dalgacık Dönüşümlü zaman-frekans (Z-F) güç spektrum kontürleri.

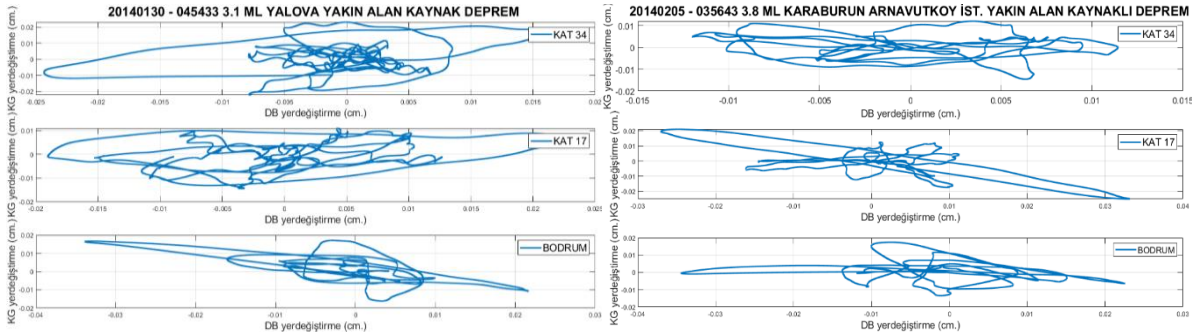
azalmış enerjisi küçük genlikler içinde mutedil salınımlarla sonlanıyor. KG yönünde (fay düzlemi boyunca yayılan ortalama hız) binaya ortalama benzer palsların (itkilerin) hüküm sürdüğü bir deprem girişiyle ulaşıyor. Diğer taraftan ML 3.1 gibi küçük bir deprem olmasına rağmen yüksek yapının geometrik boyutları göz önüne alındığında elastik davranış içinde yapı esnekliğiyle serbest uç (tepe 1) istasyon kaydından da görüleceği gibi yapısal tepki giren hareket ile benzer formda bir salınım üretmektedir. Şekil 7'de 3 kat için kat yatay yer değiştirmeleri çizilmiştir. Basit bir varsayım ile yerle beraber hareket edeceği kabül edilebilecek bodrum katının maksimum yer değiştirmesi KD – GB yönünde 45°' lik bir açıyla başlayıp yapı yüksekliğinin yarısında DB yönüne ve en üst katta KB – GD yönünde 90°' lik bir açıyla bodruma göre dönerek maksimum yerdeğiştirmeye ulaşması yüksek yapı tasarımında etkiyecek deprem yükünün yönünü tartışmalı hale getirmektedir. ML 3.1 büyüklüğündeki Yalova depreminin yakın alanda yüksek yapıyı burulmalı yer değiştirmeye zorladığı anlaşılmaktadır. Depremin yapıdan düktülite talebinin katlar arasında uniform olmadığı ve maksimum yer değiştiren yönün açısının değiştiği anlaşılmaktadır.



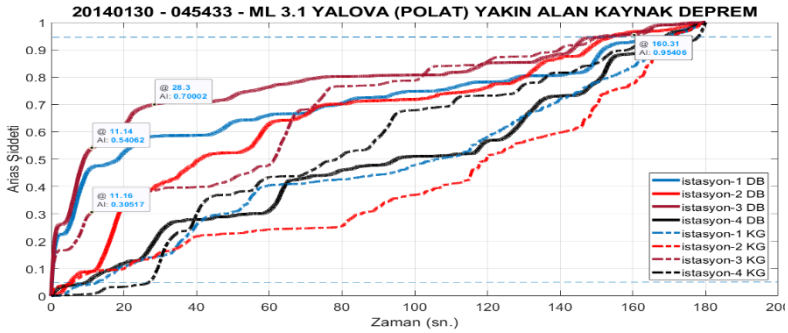
Şekil 6. Yakın alan kaynaklı 3.1 Yalova depremine yüksek yapının verdiği tepkilerin bodrum katı (3), 17. Kat (2) ve 34. Kat (1) seviyesinde ivme, hız ve deplasman zaman geçmişinin KG (sol 3x3) ve DB (sağ 3x3) bileşenleri.

Yakın alan kaynaklı deprem etkisinde DB bileşen (fay normali) ilk 3 istasyonda nihayi kinetik enerji değerinin %70'ne ilk 20 saniyede ulaşırken KG (faya parallel) bileşenler yavaş bir eğim ile uzun süre alan bir davranışda ulaşıldığı Şekil 8' de görülmektedir. Örneğin bodrum kat (3 numaralı) istasyon Arias şiddetinin yaklaşık %55'ine 11 saniyede DB bileşeninde ulaşırken aynı sürede KG bileşeni ancak %30'larda kalıyor. Yakın alan depremlerin faya normal bileşeninin yüksek yapılardan sismik

performans talebi depremin çok başlarında çalışma örneğimizde olduğu gibi 180 saniyelik kayıt süresi içinde ilk 10 saniyede %50' lerde gerçekleşiyor. Şekil 9' da verilen bodrum kat istasyonu ML 3.1 Yalova deplasman, hız ve ivme spektrumları incelendiğinde yapının ilk iki doğal hakim periyotlarının DB (fay normali) yönde 4 sn ve 1.1 sn ve ilk üç doğal hakim periyotlarının KG (fay parallel) yönde 2.5 sn, 0.7 sn ve 0.33 sn olduğu düşünüldüğünde yapının DB yönünde iki bileşenin deplasman, hız ve ivme talepleri

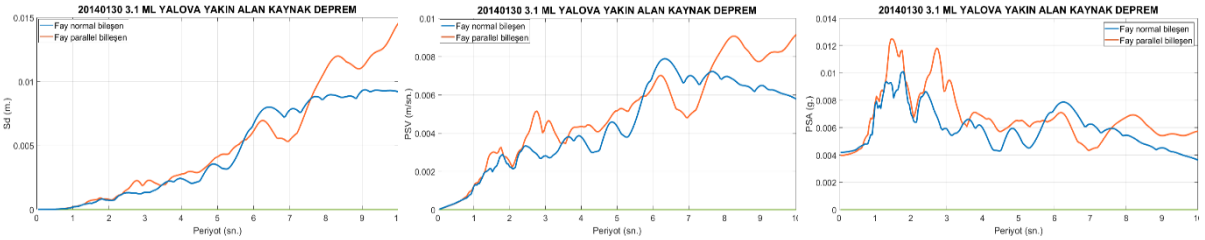


Şekil 7. Yakın alan kaynaklı 8.5 Km ocak derinliği olan 3.1 ML Yalova depremine (sol) ve 16 Km ocak derinliği olan 3.8 ML Karaburun-İst. Depremine (sağ) yüksek yapının verdiği tepkilerin katlar seviyesinde yatay yer değiştirmeleri.

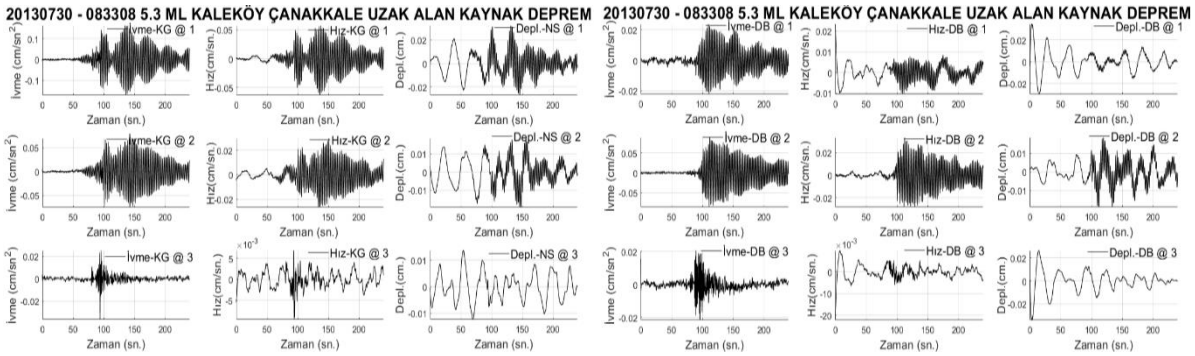


Şekil 8. Yakın-alan kaynaklı 3.1 Yalova depreminin DB ve KG bileşenlerinin Arias şiddeti.

ilk iki modda yapıdan yakın değerlerde olurken yapının KG yönünde de depremin iki bileşeni benzer yakın değerlerde sismik taleplerde bulunacaktır. Diğer depremlerde iki bileşenin de sismik talep seviyesi aynı seviyelerde ortaya çıkmayabilir ve bir bileşen diğerine göre önemsiz seviyede sismik talep istemi gerçekleştirebilir. Her yakın alan kaynaklı deprem kendine özgün karekteristiğini ürettiği ve yapı tepkisinin yapıya özgün geliştiği unutulmamalıdır. Bir diğer yakın alan deprem ocak derinliği 16 Km olan ML 3.8 büyüklüğüyle yapıya 46 Km mesafede gerçekleşen Karaburun-Arnavutköy depremi bu yaklaşım içinde incelenecek olsa daha farklı sismik taleplerin çıkacağını Şekil 7 sağ grafikden görülebilir. 9.8 Km ocak derinliğinde izlenen yapıya 287 Km uzakta ML 5.3 büyüklüğünde Kaleköy Çanakkalede olan bir sığ depremin ivme, hız ve deplasman girdi hikayelerini 3 nolu bodrum istasyonunda KG (sol 3x3) ve DB (sağ 3x3) olarak Şekil 10' un en alt sırasında görülmektedir. Hız hikayelerinin her iki bileşende de yakın genlikde mutedil itkilerle devam ettiği izlenebilir. Uzak alan depremlerinin yüksek yapılarda doğurduğu tepkiler yapı narinliğine bağlı olarak uzun süreli (500sn-1000sn) olup grafikde yüksek yapı tepki salınımları 250sn. zaman penceresinden kesilerek gösterilmiştir. Yakın alan kaynaklı depremlerde olan büyük genlikli ve büyük periyotlu tek hız palsı depremin başlangıcında artık yoktur. Kat deplasman tepkileri 17. ve 34. katlarda yapı yüksekliği boyunca yukarıya doğru yayılan deprem dalgalarıyla üst noktadan aşağıya doğru geri yansıyan dalgalar yapı deplasmanlarıyla girişime uğradığı görülmektedir. Bodrum kat istasyon 3'de izlenen depremin yer değiştirme talebi özellikle KG yönünde yapı davranışıyla etkileşimdedir. Yerel moment büyüklüğü ML 5.3 olan sığ bir depremin yüzlerce kilometre uzaktan yayılarak gelip yüksek yapılardan talep ettiği

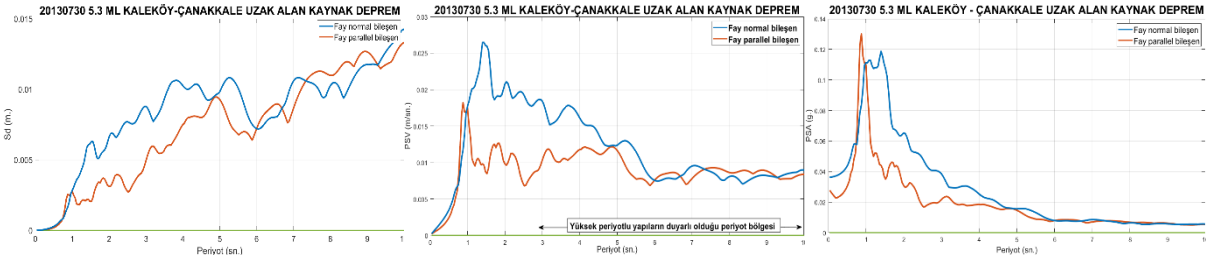


Şekil 9. Yüksek yapı altında bodrum kat istasyonu 3.1 ML Yalova deplasman, hız ve ivme spektrumları

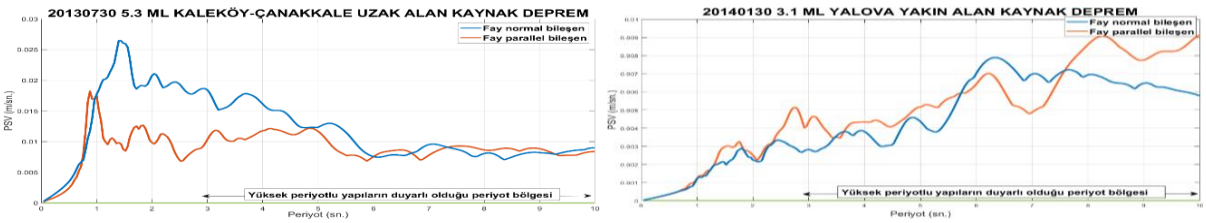


Şekil 10. Uzak alan kaynaklı 5.3 ML Kaleköy-Çanakkale depremine yüksek yapının verdiği tepkilerin bodrum katı (3), 17. Kat (2) ve 34. Kat (1) seviyesinde ivme, hız ve deplasman zaman geçmişinin KG (sol 3x3) ve DB (sağ 3x3) bileşenleri.

performansı açıklamak için Şekil 11 ve mukayeseli olarak Şekil 12'de verilen elastik tepki spektrumları incelenebilir. Yapının DB (fay normali) yönde 4 sn ve 1.1 sn olan doğal modlarını ve KG (fay parallel) yönde 2.5 sn, 0.7 sn ve 0.33 sn olduğu düşünüldüğünde Şekil 11 ve 12' de yapının ivme hakim bölgede, hız hakim bölgede ve deplasman hakim bölgede fay normal (DB) bileşeninin etkin olduğunu deplasman, hız ve ivme taleplerinin yapısal mod bandında modal periyotlar civarında yükselebileceği tepki spektrumlarında görülmektedir. Uzak alan kaynaklı depremler yapının her iki ana ekseninde yakın benzerlikde sismik talep istemektedir.



Şekil 11. Yüksek yapı altında bodrum kat istasyonu 5.3 ML Kaleköy-Çanakkale uzak alan depreminin deplasman, hız ve ivme spektrumları.



Şekil 12. Yüksek yapı altında bodrum kat istasyonu 5.3 ML Kaleköy-Çanakkale uzak alan depreminin ve 3.1 ML Yalova yakın alan depreminin hız spektrumları.

Şekil 12' de yakın ve uzak kaynak alan depremlerinin hız spektrumları belirgin farklılıklar içermektedir. Uzak alan depremde ezbere bilinen hızın hakim etken olduğu periyot bölgesi normal ötesi uzamış ve 10sn.' lere ulaşmıştır. Fay normali (DB yönü) spektral hızlar çok büyürken hakim tepe 1.5sn.'de

oluşmuş ve göreceli olarak azalmış 6sn ve sonrası kararlı salınımlara girmiştir. Parallel bileşen 1sn. civarında yarı genliğe yakın tepe vererek, sonrasında kararlı gittiği görülmektedir. Yapının hakim modları uzak alan depremin her iki bileşeninin (normali parallelin 2 katı) etkisi altındadır. Yakın alan kaynaklı deprem spektrumu büyüyen periyotla beraber birbirini yakın izleyerek artan hız talebini göstermektedir. Parallel bileşen büyüyen periyot ile genelde grafiğin maksimumlarını oluşturacak şekilde büyümektedir. Çalışma yapısının ilk iki periyodu DB yönünde 4sn ve 1.1sn ve KG yönünde ilk üç doğal hakim periyotları 2.5sn, 0.7sn ve 0.33saniyedir. Yapı yüksekliklerinin yüzlerce metrelerden kilometreye yükseldiği düşünüldüğünde, yapıdan istenen sismik talepler açısından ilk modlarda yakın alan kaynaklı depremlerin gökdelenlerde artan periyotla beraber hız taleplerini ve deplasman taleplerini yükseltiği uzak alan kaynaklı depremlerin ise kararlı salınımlarla yapı titreşimini saatlere ulaşacak sürelere uzattığı Şekil 12'den anlaşılmaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada; incelenen yakın alan kaynaklı depremlerde maksimum deplasman yönlerin dağılımı fay normali ve fay dik yönler ile bir tutarlılık göstermeyen bir dağılım sergiliyor. İncelenen yapılar gibi lineer elastik davranış sergileyen mühendislik yapılarında maksimum yerdeğiştirmeler hakim hız itki frekanslarıyla yapı hakim frekanslarının yakın olduğu durumlarda izlenmiştir. Rezonans potansiyeline yakın şartlarda (geometrik ve/veya kesit/kapasite aşımıyla) nonlinear davranışın periyotları büyüterek senkronizasyonu bozması beklenir. Çalışmaya tipik örnekleri konulan iki yakın kaynaklı depremde gözlenen maksimum yön değişimi incelenen yapıya mahsus özel bir maksimum yönün (örneğin zayıf rijidlik yönü) mühendislik parametrelerini maksimuma ulaştıracağı kanaatini garantilememektedir. Yapı yüksekliklerinin yüzlerce metrelerden kilometreye yükseldiği günümüz mühendislik dünyasında, yapıdan istenen sismik talepler açısından ilk modlarda yakın alan kaynaklı depremlerin gökdelenlerde artan periyotla beraber hız taleplerini ve deplasman taleplerini yükseltiği uzak alan kaynaklı depremlerin ise kararlı salınımlarla yapı titreşim süresini uzattığı gerçek yüksek yapı kayıtlarından tespit edilmiştir.

7. Teşekkür

Çalışmada kulanılan yapı sağlığı izleme kayıtları Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Bölümü hocalarımız sayın Prof. Dr. Erdal Şafak ve sayın Prof. Dr. Eser Çaktı tarafından verilmiştir. Müteşekkirim. Destekleri için teşekkür ediyorum.

Kaynaklar

Archila, M., Ventura, C. E. ve Finn, L. W.D. (2014) 'New Insights on effects of directionality and duration of near fault ground motions on seismic response of tall buildings', Advances in Structural Design for Seismic Regions. Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council

Archila, Manuel (2014) 'Directionality Effects of Pulse-Like Near Field Ground Motions on Seismic Response of Tall Buildings', Doktora Tezi, British Columbia Üniversitesi

Athanatopoulou, A.M. (2004) 'Critical Orientation of Three Correlated Seismic Components', Engineering Structures, v.27, p. 301–312

Beyen, K. ve Tanırcan, G. (2015) 'Strong Ground Motion Characteristics of The Van Earthquake of Turkey: Implications of Seismological Aspects on Engineering Parameters', Earthquakes and Structures, V:8, N:6

Beyen, K. (2019) 'HangingWall and Footwall Effects in the Largest Reverse-Slip Earthquake of Turkey, October 23, 2011, *M*W 7.2 Van Earthquake', Arabian Journal for Science and Engineering, 44:4757–4781; https://doi.org/10.1007/s13369-018-3547-x

Beyen, K. (2017) 'Deprem ve Çevrel Titreşimler Etkisinde Yüksek Binalarda İnsanın Algısı ve Komfor Kalitesinin Değerlendirilmesi', 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (4. UDMSK), 11-13 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

California Building Code, California Code of regulations, title 24, Part1 & 2, California Building Standards Commission (CBSC)

Champion, C., Liel, A. (2012) 'The effect of Near-Fault Directivity on Building Seismic Collapse Risk', Earthquake Engineering Structural Dynamics, 41(10):1391-1409

Çelebi, M., Okawa, I., Kashima, T., Koyama, S. and Iiba, M. (2014) 'Response of a Tall Building Far From the Epicenter of the 11 March 2011 M 9.0 Great East Japan Earthquake and Aftershocks', Structural Design of Tall and Special Buildings, 23, 427-441

Heydari, M. ve Mousavi, M (2015) 'The Comparison of Seismic Effects of Near-field and Far-field Earthquakes on Relative Displacement of Seven-store Concrete Building with Shear Wall', Current World Environment, Vol. 10 (Special Issue 1.07), 40-46

MATLAB 2019a: The MathWorks Inc., Natick, MA (2019)

M. Davoodi, M. Sadjadi (2015) 'Assessment of near-field and far-field strong ground motion effects on soil-structure SDOF system', International Journal of Civil Engineering, Vol. 13, Nos. 3&4B, Transaction B: Geotechnical Engineering, September & December 2015

Reyes, Juan C. and Kalkan, E. (2012) 'Should Ground Motion Records be Rotated to Fault-Normal/Parallel or Maximum Direction for Response History Analysis of Buildings?', Open-File report 2012, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia

Stewart J P, Chiou S J, Bray J D, et al. (2001) 'Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design', California: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. 01-09, 63-67

Smyrou, Eleni (2014) 'Near-Field Effects on Tall Structures', Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, İstanbul, August 25-29

Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., Abrahamson, N.A. (1997) 'Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity', Seismoligical Res. Lett., 68(1), 199-222

Somerville, P.G. (2003) 'Magnitude Scaling of the Near Fault Rupture Directivity Pulse', Physics of the Earth and Planetary Interiors, 137, 201-212

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Uniform Building Code (UBC) (1997) International Conference of Building Officials, 5360 Workman Mill Roadwhittier, California, 90601-2298(800) 284-4406 S(562) 699-0541, 6th PrintingPublication, April 1997; ISSN 0896-9655.