

Teknik Not / Technical Note

Basen ve Yakın Fay Etkilerinin Deprem Yer Hareketi Üzerindeki Etkileri, Kahramanmaraş Pazarcık Depremi Antakya Kayıtlarının Değerlendirilmesi

Basin and Near-Fault Effects on Earthquake Ground Motions: An Evaluation of the Antakya Records of the Kahramanmaraş Pazarcık Earthquake

Nihat Sinan IŞIK

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

Geliş (Received): 18 Mayıs (May) 2023 / Düzeltme (Revised): 12 Haziran (June) 2023/ Kabul (Accepted): 13 Haziran (June) 2023

ÖZ

Yeryüzünde bir sahada oluşan deprem yer hareketi, fayın kırılma mekanizmasına, sismik kabuğun yapısına ve yüzeye yakın zeminler ile yumuşak kayaların özelliklerine bağlıdır. Yüzeğe yakın zeminlerin ve yumuşak sedimanter kayaların deprem kaynağından uzak mesafelerde bile önemli ölçüde yapı hasarlarına yol açabildikleri bilinmektedir. Ülkemizde son dönemlerde yaşanan depremlerde de bu durum gözlenmiştir. 30 Ekim 2020 tarihinde Ege Denizinde Sisam Adası açıklarında meydana gelen 6,9 moment büyüklüğündeki deprem, merkez üssünden yaklaşık 70 km uzaklıkta olan İzmir Bayraklı ilçesinde yoğun hasara yol açmıştır. 06 Şubat 2023 tarihinde merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık olan 7,7 moment büyüklüğündeki deprem geniş alanlarda oldukça büyük can kaybı ve yıkıma yol açmıştır. Kahramanmaraş Pazarcık depreminin Hatay, Antakya bölgesinde oluşturduğu yer hareketlerinin tepki spektrumları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde tarif edilen tasarım tepki spektrumlarının çok üzerinde çıkmıştır. Bu çalışmada deprem yer hareketlerini etkileyen saha etkileri ve yakın fay etkileri özetlenmiş, Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesinde 7,7 büyüklüğünde meydana gelen depremin Hatay bölgesinde oluşturduğu kayıtlardan bazıları incelenmiş ve olası basen etkileri ile yakın saha etkileri açısından değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, Basen Etkisi, Yakın Fay Etkileri, Zemin Büyütmesi

ABSTRACT

Earthquake ground motion on a site depends on the fault rupture mechanism, the structure of the crust, and the properties of the near-surface soils and soft rocks. It is known that near-surface soils and soft sedimentary rocks can cause significant structural damage even at great distances from the earthquake source. This phenomenon was observed in recent earthquakes in our country. The 6.9 magnitude earthquake that occurred off the coast of Samos Island in the Aegean Sea on October 30, 2020, caused extensive damage in the İzmir Bayraklı district, which is approximately 70 km from the epicenter. On February 6, 2023, the 7.7 moment magnitude Kahramanmaraş Pazarcık earthquake caused great loss of life and destruction in large areas. The response spectra of the ground motions created by the Kahramanmaraş Pazarcık earthquake in the Antakya region of Hatay, were far above the design response spectra defined in the Turkish Building Earthquake Code. In this study, the site effects affecting the earthquake ground motions and the near-fault effects are summarized. Some of the ground motion records recorded during the 7.7 magnitude Kahramanmaraş Pazarcık earthquake in the Hatay region were examined and evaluated in terms of possible basin effects and near field effects.

Keywords: Earthquake, Basin Effect, Near-Fault Effects, Soil Amplification

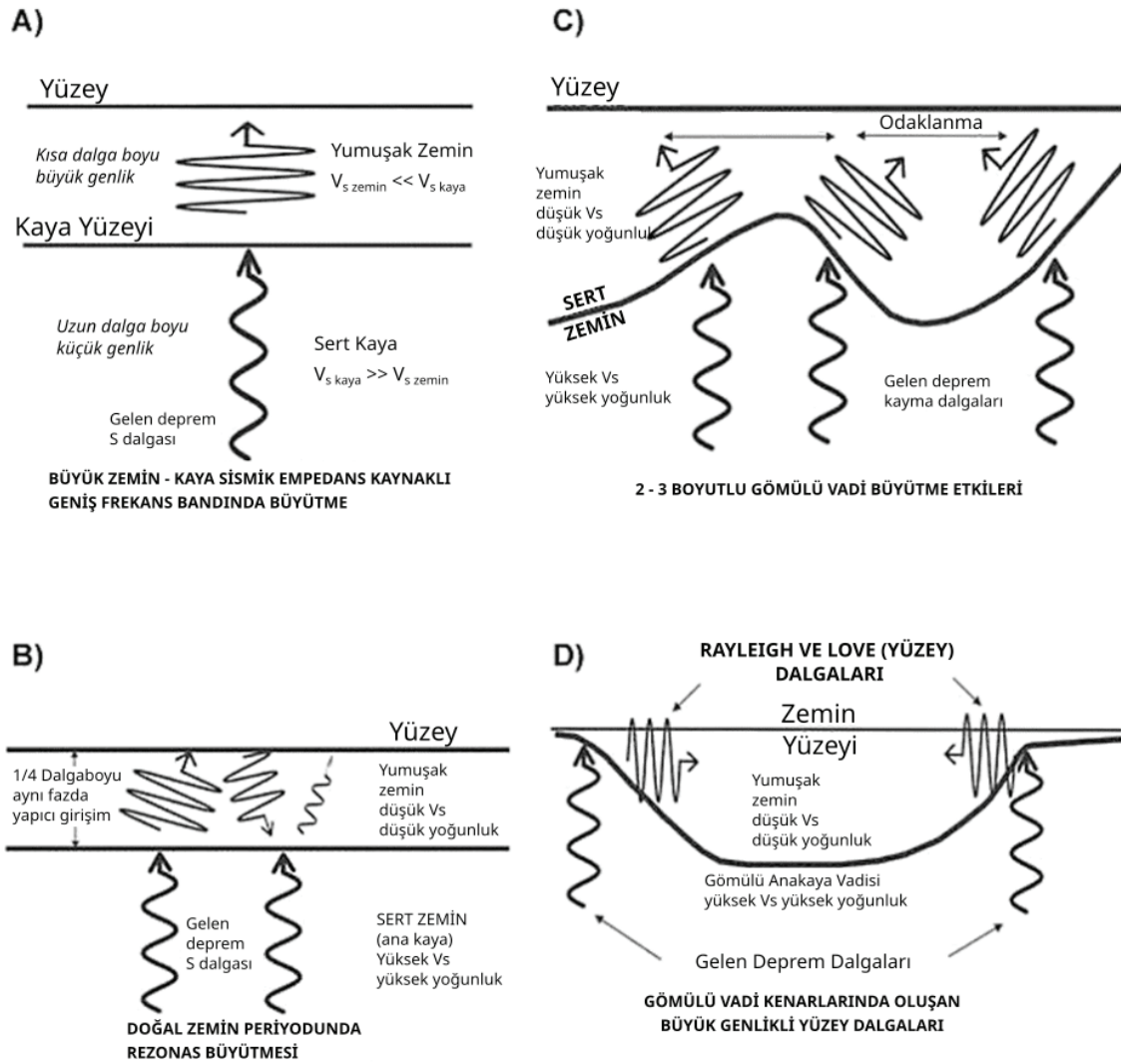
GİRİŞ

Deprem yer hareketi, fayın kırılma mekanizmasına, sismik dalgaların içerisinden geçtiği kabuğun yapısına ve yüzeye yakın zeminlerin ve yumuşak kayaların özelliklerine bağlıdır. Yüzeye yakın zeminlerin ve genç sedimanter kayaların deprem yer hareketi üzerindeki etkisi zemin büyütmesi – zemin tepkisi olarak isimlendirilmektedir. Zemin büyütmesi olayı 30 Ekim 2020 tarihinde Ege Denizinde Sisam Adası açıklarında meydana gelen 6,9 moment büyüklüğündeki depremde, merkez üssünden yaklaşık 70 km uzaklıkta olan İzmir Bayraklı ilçesinde yoğun hasara yol açmıştır. Deprem yer hareketi ayrıca faya yakın alanlarda, faya uzak alanlara kıyasla önemli farklılıklar içermektedir. Literatürde faya yaklaşık 10 km mesafede olan alanlar yakın alan olarak isimlendirilmektedir. Yakın fay alanında oluşan deprem yer hareketi kayıtlarında, maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranının yüksek olması, hız zaman kayıtlarında hız darbesinin gözlemlenmesi, kalıcı yer değiştirme etkileri (fling step) ve yer hareketlerinde burulma bileşenlerinin varlığı gibi etkiler görülebilmektedir. Bu etkiler de yakın fay alanlarında daha büyük yıkıma yol açabilmektedir. Bu çalışmada deprem yer hareketlerini etkileyen saha etkileri ve yakın fay etkileri özetlenmiş, 06.02.2023 tarihi 04.17’de Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesinde 7,7 moment büyüklüğünde meydana gelen depremin Hatay bölgesinde oluşturduğu kayıtlardan bazıları incelenmiş ve olası basen etkileri ile yakın fay etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

DEPREM YER HAREKETİ ÜZERİNDE ZEMİN BÜYÜTMESİ ETKİSİ

Deprem yer hareketi, fayın kırılma mekanizmasına, sismik dalgaların içerisinden geçtiği kabuğun yapısına ve yüzeye yakın zeminlerin ve yumuşak kayaların özelliklerine bağlıdır. Yüzeye yakın zeminlerin ve genç sedimanter kayaların deprem yer hareketi üzerindeki etkisi zemin büyütmesi olarak isimlendirilmektedir. Zemin büyütme etkileri bir boyutlu ve iki – üç boyutlu etkiler olarak sınıflandırılabilir. Bir boyutlu etkiler, birbirini izleyen farklı yoğunluk ve kayma dalgası hızına sahip tabakaların empedans farkı nedeniyle sismik dalgaların genliklerinin artması, tabakaların doğal titreşim periyotlarındaki yer hareketlerini büyütme sebebiyle oluşan kısmi rezonans etkileridir. Sedimentasyon sırasında oluşan gömülü vadiler – basenler ise genellikle yüksek yoğunluk ve kayma dalgası hızına sahip kayalar ile sınırlandırılmış, daha düşük yoğunluk ve kayma dalgası hızına sahip yapılardır. Bu tür basenlerde iki ve üç boyutlu yapılar nedeniyle ilave zemin büyütme etkileri oluşmaktadır. Şekil 1’de sağlam zemin üzerinde bulunan yumuşak zeminlerin deprem yer hareketini büyütme mekanizmaları gösterilmiştir.

Basen etkileri terimi, konveks çöküntüleri dolduran yumuşak sedimanter çökellerdeki hapsolmuş yankılanan deprem dalgalarını ifade eder (Ayoubi vd., 2021). Basen etkileri dalgaların frekans içeriğini ve süresini önemli ölçüde değiştirir. Basen kenarlarında yüzey dalgaları oluşur. Ayrıca basen geometrisinden kaynaklanan sismik dalgaların odaklanarak şiddetlendiği alanlar da oluşabilmektedir.



Şekil 1. (a), (b), (c), ve (d) Sağlam zemin üzerinde bulunan yumuşak zeminlerin deprem yer hareketini büyütme mekanizmalarının şematik gösterimi (Hunter vd., 2010'dan değiştirilerek).

Figure 1. (a), (b), (c), and (d) Schematic representation of earthquake ground motion amplification mechanisms of soft soils on solid ground (modified from Hunter et al. 2010).

Basen etkileri geçmişteki $M_w=8,0$ 1985 Michoacan Meksika, $M_w 6,9=1995$ Kobe Japonya ve $M_w=7,8$ 2015 Gorkha Nepal gibi depremlerde sarsıntı şiddeti ve süresi üzerinde önemli rol oynamıştır (Ayoubi vd., 2021). Basen etkilerinin varlığı, dünya çapındaki birkaç test sahasının deneysel verilerinden de elde edilmiştir.

Çeşitli örnekler, Kuzey Yunanistan'daki Volvi havzasındaki Euroseistest (Chavez-Garcia vd., 2000; Raptakis vd., 2000), Japonya'daki Ashigara vadisi (Kudo vd., 1988; Kudo ve Sawada 1998), Japonya'daki Ohba vadisi (Tazoh vd., 1984; Gelagoti vd., 2007) şeklinde sayılabilir.

Zemin Tepkisinin Belirlenmesi

Yüze yakın zeminlerin ve yumuşak kayaların, deprem dalgalarına etkisinin belirlenebilmesi için literatürde saha ölçümleri ve analitik - sayısal yaklaşımlar bulunmaktadır. Saha ölçümleri ve deneysel çalışmalarda gerçek depremlerde alınmış kuvvetli veya zayıf yer hareketi kayıtlarının değerlendirilmesi yapılmaktadır. Alternatif bir yöntem ise çok küçük titreşimler olarak tanımlanan mikrotremor kayıtlarının Fourier - spektral analizidir. Analitik - sayısal yöntemler ise saha etkilerin bir, iki veya üç boyutlu sayısal analiz (transfer fonksiyonları, sonlu elemanlar, sonlu farklar) yöntemleriyle incelenmesini kapsamaktadır.

Deprem kayıtlarının zemin büyütmesinin değerlendirilmesinde kullanan yaygın bir ölçüm yöntemi Borchardt (1970) tarafından önerilen spektral oran yöntemidir. Spektral oran (SSR) zemin yüzeyi kaydının Fourier spektrumunun genliğinin referans anakaya kaydının Fourier spektrumunun genliğine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Kullanılan kayıtlar aynı depremin farklı yerlerde kaydedilmiş kayıtları olmalıdır. Bu yöntem sadece iki saha arasındaki mesafenin depremin kaynağına göre merkez üstü mesafesinden çok daha küçük olduğu durumda geçerli olmaktadır. Basitliği nedeniyle oldukça yaygın kullanılan bir spektral oran yöntemi, zemin büyütmesi tahmininde sadece bir istasyondaki kaydın kullanıldığı Nakamura yöntemidir. Bu yöntemde (HVSR) zemin büyütmesinin tahmininde bir noktada kaydedilen yer hareketinin yatay genliğinin düşey genliğine olan oranı (H/V) kullanılmaktadır. Bu yöntemin temel varsayımı yer hareketinin yatay bileşenlerinin zemin özelliklerinden etkilendiği, düşey bileşenin ise zemin özelliklerinden etkilenmediği kabulüdür. Derin yumuşak

alüvyonlardan oluşan bölgelerin haricinde, bu yöntem genellikle sahanın rezonans frekansının tahmininde başarılı olmaktadır. Ancak bu frekanstaki genliğin tahmininde yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır (Nakamura, 1989). Zemin tepkisinin belirlenmek istendiği sahada yeterli sayıda ve dağılımda kuvvetli yer hareketi kaydı bulunması durumunda SSR ve HVSR yöntemleri sağlıklı sonuçlar vermektedir.

Idriss ve Seed (1968) belirli bir deprem düzeyi için elde edilmiş olan zemin tepki karakteristiklerinin daha düşük veya daha yüksek şiddetteki bir deprem için kullanılmayacağını belirtmişler ve küçük deprem kayıtlarının zemin tepkisinin belirlenmesinde kullanılmasının yanıltıcı olabileceğini ifade etmişlerdir.

Hartzell (1998) yaptığı çalışmada zeminlerin doğrusal olmayan davranışın etkin olup olmadığının belirlenmesi için sahanın zayıf ve kuvvetli yer hareketleri etkisi altındaki kayıtları ile anakaya hareketinin spektral oranını kullanmıştır. Kuvvetli yer hareketlerinden elde edilen sonuçların zayıf yer hareketlerinden elde edilen sonuçlardan farklı olması saha zeminlerinin doğrusal olmayan davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Analitik – sayısal yöntemler ise transfer fonksiyonlarının kullanıldığı viskoelastik yöntemler, transfer fonksiyonlarının kullanıldığı frekans alanında çalışan eşdeğer lineer yöntemler, karekök empedans yöntemi (SRI), zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar, sınır elemanlar ve sonlu farklar yöntemleri şeklinde sıralanabilir. Ayrıca analitik yöntemler 1D, 2D ve 3D olarak ta kullanılabilir. Karekök empedans yöntemi (SRI) zeminlerin empedans farkından kaynaklanan etkileri hesaplayabilmekte ancak tabakaların rezonans etkilerini tam olarak hesaplayamamaktadır. Bu nedenle, bu yöntem

diğer yöntemlere kıyasla daha az kesin olan bir yöntemdir (Boore, 2013). Birçok durumda yerel etkiler ve zemin büyütmesi yatay ve düşey yönde yayılan kayma dalgası varsayımına dayanan tek boyutlu dinamik analizlerle hızlı ve kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir. Yatay tabakalı zeminlerde zemin büyütmesine yol açan temel faktörler, yüzeye yakın tabakaların empedans farkları ve rezonanslarıdır (Shearer ve Orcutt, 1987). Ancak, gerçekte üç boyutlu yayılan bir dalgaanın yanal süreksizliklerden dolayı yüzey dalgalarının bir bölgede odaklanmasına yol açmasından dolayı, zemin büyütmesinin tek boyutlu analizlerle değerlendirilmesi her koşulda doğru bir yaklaşım olmamaktadır.

On yıllar boyunca, sismik yükleme koşullarında zeminlerin doğrusal olmayan davranışın önemli olup olmadığı jeoteknik mühendisleri ve sismologlar arasında itilafli bir konu olmuştur (Beresnev ve Wen, 1996). Zemin tepkisinin birim deformasyon seviyesine bağlı olması jeoteknik mühendisliği alanında standart bir kabul olagelmıştır (Finn, 1991). Bununla birlikte sismologlar kuvvetli yer hareketi kayıtlarında direk kanıt olmadığı için çoğunlukla zeminlerin doğrusal olmayan davranışlarını dikkate almamışlardır (Aki ve Richards 1980).

Zeminlerin gerilme birim deformasyon davranışlarının özellikle kayma birim deformasyonları $10^{-5} - 10^{-4}$ değerlerinden daha yüksek olduğu durumlarda doğrusal olmadığı bilinmektedir (Beresnev ve Wen, 1996). Deprem yükleri altında zeminlerin doğrusal olmayan davranışı nedeniyle artan kayma birim deformasyonlarıyla kayma modüllerinde azalma ve sönüm oranlarında artışlar oluşmaktadır. Doğrusal olmayan davranış nedeniyle zemin çökellerinin deprem sırasındaki tepkileri gerilme – birim deformasyon seviyesine, dolayısıyla deprem şiddetine bağlı olacaktır.

Aguirre ve Irikura (1997), 1995 Hyogo-ken Nanbu depremi sırasında Kobe, Port Island'daki yumuşak zeminlerin doğrusal olmayan davranışları, sıvılaşma davranışları ve hız değişimleri üzerine bir çalışma yapmışlar ve bu çalışmada ana şok öncesi ve sonrası S dalgası hız yapısının farklı olduğunu belirlemişlerdir. 1994 yılındaki Northridge (Kaliforniya) depremi, araştırmacıların kuvvetli yer hareketi kayıtlarından zeminin deprem sırasındaki davranışının doğrusal olmadığını belirlemelerine olanak sağlamıştır (Zeng vd., 1998). Doğrusal olmayan etkiyi tespit etmek için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bunlardan biri, güçlü ve zayıf yer hareketleri sırasında yüzey ve ana kaya arasındaki gözlenen verilerin spektral oran değerlendirmesidir (Hartzell 1998). Alternatif bir yol, dikey bir sismometre dizisinden alınan kayıtları kullanmaktır (Satoh vd., 1995). Kuvvetli yer hareketi sırasında tepe noktalarındaki azalma ve/veya kayma, zeminin doğrusal olmayan davranışının göstergeleridir.

Zemin tepki analizlerinde kayma birim deformasyonuna bağlı zemin parametrelerinin kullanılması gerektiğinden Idriss ve Seed (1970) eşdeğer doğrusal analiz yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntemde parametreleri ortalama birim deformasyon seviyesine göre iteratif bir yöntemle belirlenen viskoelastik zemin modeli kullanılmakta, zeminlerin kayma modülü ve sönüm oranı değerleri deneysel eğriler ile dikkate alınmaktadır.

Doğrusal olmayan saha tepkisi analizlerinde zaman alanında adım adım zeminin doğrusal olmayan davranışının gelişimi modellenmektedir ve bu nedenle bu analizlerde zeminin gerilme-birim deformasyon davranışının doğru karakterize edilmesi gerekmektedir. Zemin gerilme-birim deformasyon davranışının doğrusal olmayışı, zeminin kayma modülünün

sürekli olarak azaldığı ve elastik olmayan (plastik) davranışı ise zeminin yüklenme yolundan farklı bir yol boyunca gerilmenin azaldığı ve böylece zemin taneleri arasındaki temas noktalarında enerjinin sönmüldüğü anlamına gelir. Doğrusal olmayan analizlerin, eşdeğer doğrusal analize göre deprem gözlemiyle daha iyi uyum sağladığı gösterilmiştir (Beresnev ve Wen, 1996).

Gömülü basenlerin varlığında, ortamda yayılan dalgaların bir kısmı eğimli anakayaya çarpıp yansiyarak tekrar ortama dönüp tek boyutlu modellerle incelenmesi mümkün olmayan etkileri ortaya çıkarmaktadır. Özellikle basen kenarında oluşan yüzey dalgaları deprem süresini önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu gibi durumlarda analizlerin iki veya üç boyutlu yazılımlarla yapılması gerekmektedir.

Basen etkilerinin gözlenmesi için incelenen mevcut test sahalarına ait veriler çoğunlukla zayıf hareket uyarımlı küçük veya orta büyüklükteki depremler veya mikrotremorlardan oluştuğundan, sadece gömülü vadilerin doğrusal - elastik sismik tepkisi incelenmiştir. Bununla birlikte deneysel veriler, esas olarak, havza kenarlarında yüzey dalgalarının oluşumuna ilişkin teorik çalışmanın sonuçlarını doğrulamaktadır (Furumura vd., 1997). Deneysel veriler ile sayısal analizlerin sonuçları arasındaki karşılaştırma, genellikle basit 1D yaklaşımın yer sarsıntısı gözlemlerini açıklamadaki yetersizliğini ortaya koymaktadır.

Lanzo ve Pagliaroli (2009) Güney İtalya San Giuliano di Puglia bölgesinde artçı deprem kayıtlarını kullanarak yaptıkları çalışmada 1D analizlerin kayıt edilen dinamik tepkiyi önemli ölçüde daha az tahmin ettiklerini, bununla birlikte 2D modellemenin zemin büyütmesini daha gerçekçi olarak belirlediğini ifade etmişlerdir. Zhang ve Papageorgiou (1996) tarafından gerçekleştirilen çalışmada Loma Prieta depreminde Marina bölgesinde zemin

davranışının sismik dalgalarının odaklanma etkileri ve dalgaların yanal girişimlerinin zemin doğrusal olmayan davranışı artıkça azaldığını ifade etmişlerdir. Gelagoti vd. (2010) basenlerin dinamik tepkilerinin önemli ölçüde iki boyutlu olduğunu, basen kenarlarında dalga odaklanması ve basen kenarlarında oluşan yüzey dalgalarının sismik hareketin büyütülmesinde etkili olduğunu, ve bir boyutlu analizlerle belirlenemeyeceğini ifade etmişlerdir.

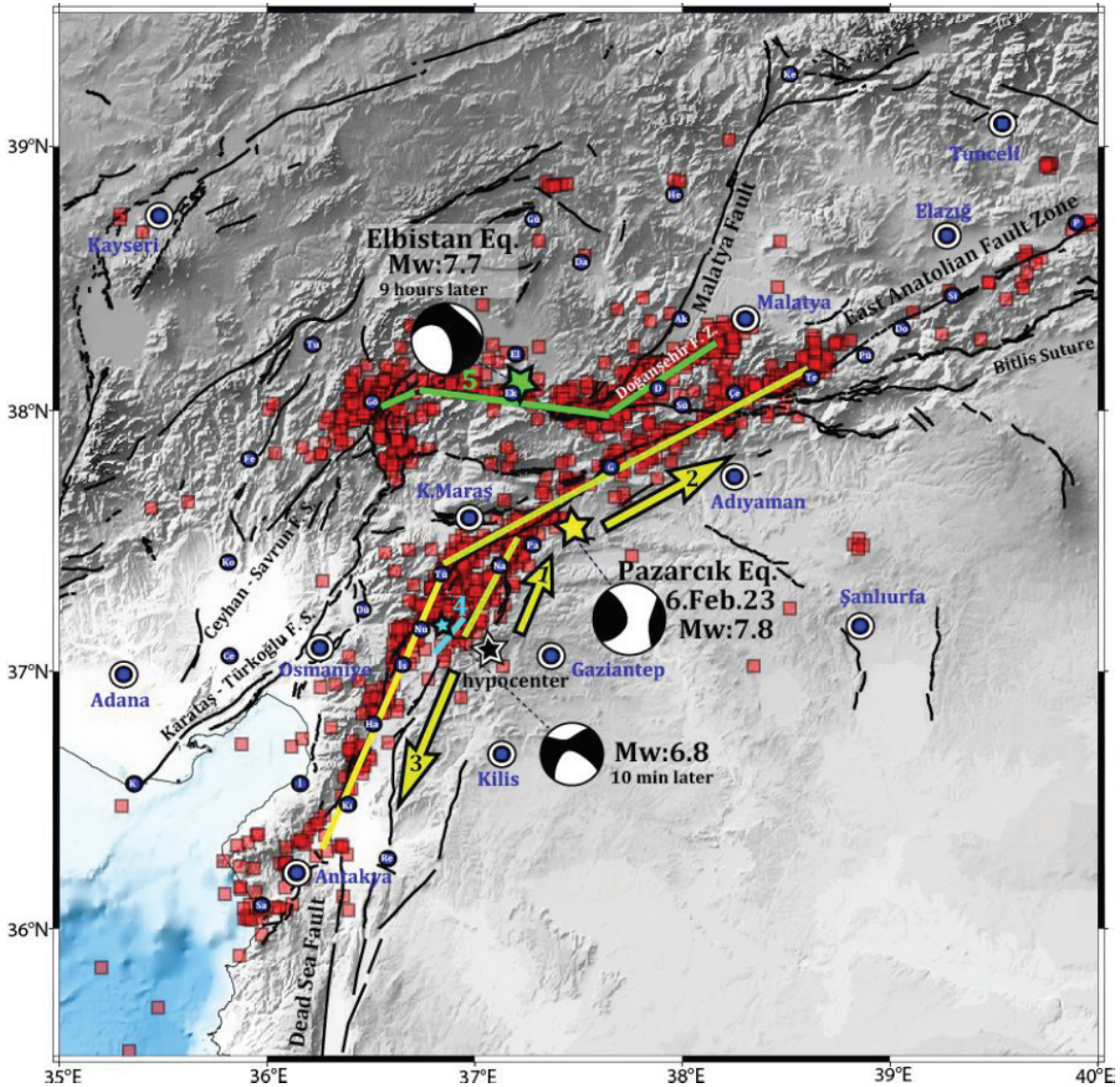
Gelagoti vd. (2010) basenlerin büyütme etkilerinin ve sismik dalgaların yoğunlaşmasının girdi deprem kaydının frekansına bağlı olduğunu, yüksek frekanslı dalgalarda büyütmenin basen kenarında yoğunlaştığı, düşük frekanslı dalgalarda ise büyütmenin olduğu alanların vadi içerisine doğru kaydığını tespit etmişlerdir. Gelagoti vd. (2010) basen ortasında meydana gelen büyütmenin basen kenarlarında oluşan ve yatay olarak vadi ortasına doğru hareket eden Rayleigh dalgalarının yapıcı girişiminden kaynaklandığını tespit etmişler ve simetrik olmayan basenlerin geometrilerinin büyütme davranışına önemli ölçüde etkili olduğu ifade edilmiştir.

DEPREM YER HAREKETİ ÜZERİNDE YAKIN FAY ETKİLERİ

Yakın fay alanında oluşan deprem yer hareketi kayıtları, uzak mesafe kayıtlarına göre farklılıklar içermektedir. Bunlar, maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranlarının 2/3'ten büyük olması (Elgamal ve He, 2004), fay atımı kaynaklı kalıcı yer değiştirmelerin kayıtlarda gözükmesi (fling step), kırılma yönünün etkisi (yönsellik), hız kayıtlarında darbe türü hareket (velocity pulse) ve yer hareketinde burulma bileşenleri şeklinde sayılabilir. Kırılma sahaya doğru ise ileri doğru yönsellik, sahadan uzağa doğru ise geri

yönsellik olarak ifade edilir. Hız darbesi türü kayıtlarda hız zaman kaydının faya dik bileşeni belirgin olarak faya paralel bileşenden yüksek olmakta ve faya dik yönlü hız zaman kaydında belirgin bir hız darbesi oluşmaktadır. Bu olgu özellikle kırılma hızı kayma dalgası hızına yakın

olduğunda oluşmaktadır (Somerville, 2000). İlerleyen kırılmanın oluşturduğu yer hareketleri birbiri üzerine binerek ileri yönsellik etkisinde kalan sahalarda kısa süren yüksek şiddetli yer hareketleri oluşturmaktadır.



Şekil 2. Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan depremlerinin kırık düzlemleri, merkez üsleri ve mekanizma çözümleri (DMAM, 2023).

Figure 2. Rupture planes, epicenters and moment tensor solutions of the Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan earthquakes (DMAM, 2023).

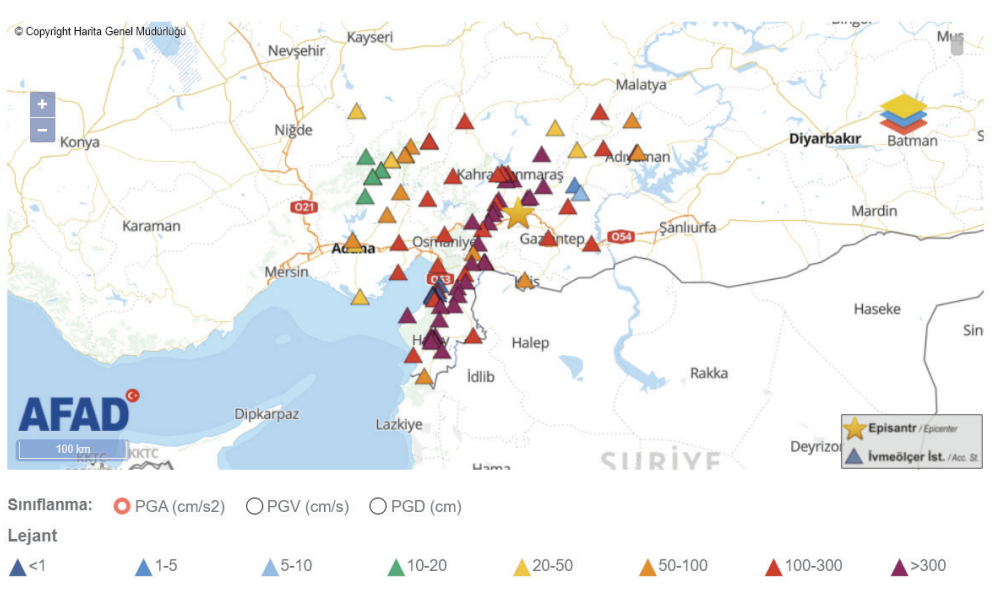
Moustafa ve Takewaki, (2010)'ye göre hız darbesi görülen yer hareketi kayıtlarında genlik büyük ve baskın periyod genellikle 1 sn üzerindedir, depremin moment büyüklüğü arttıkça baskın periyot ta artar, maksimum yer hızı maksimum yer ivmesi oranları ve maksimum yer değiştirmesi maksimum yer ivmesi oranları yükselir. Enerjinin büyük kısmı bir veya birkaç hız darbesi şeklinde ortaya çıkar ve bu tür yer hareketleri alışlagelen tepki spektrumlarından farklı tepki spektrumları oluşturur.

KAHRAMANMARAŞ PAZARCİK VE ELBİSTAN DEPREMLERİ

06.02.2023 tarihi, Türkiye saati ile 04.17'de sol yanal atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde, merkez üssü Enlem 37.288°, Boylam 37.043°, AFAD'a göre moment büyüklüğü 7,7 olan bir deprem meydana gelmiştir. Deprem

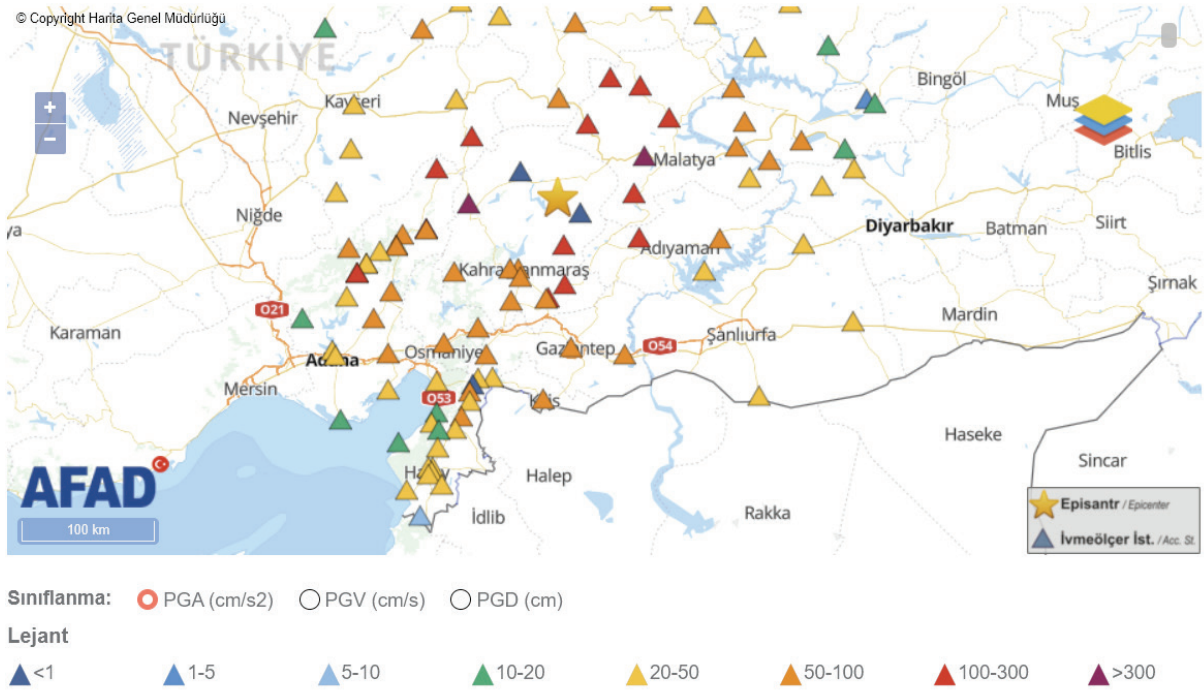
merkez üssü Kahramanmaraş, Pazarcık olarak belirlenmiştir. Elde edilen ilk sismik verilere göre, DAFZ'nun güneyinde yer alan Narlı fayı üzerinde başlayan bu deprem, kuzeyde fayın ana kolu üzerine sıçramış, Pazarcık-Erkenek fay bölümlerini KD'ya, Amanos bölümünü ise GB'ya doğru biraz gecikmeli olarak kırmıştır (DMAM, 2023). Kahramanmaraş Pazarcık depreminden sonra Türkiye yerel saatine göre 13.24'te sol yanal atımlı Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde moment büyüklüğü AFAD'a göre 7,6 olan diğer bir deprem meydana gelmiştir. Bu depremin merkez üssü Kahramanmaraş, Elbistan, Enlem 38.089°, Boylam 37.239°, olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

Kahramanmaraş Pazarcık depremi kuvvetli yer hareketi kayıtlarına göre istasyonlarda kayıt edilen maksimum yer ivmelerinin dağılımı Şekil 3'te, Elbistan depremi maksimum yer ivmelerinin dağılımı ise Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 3. Kahramanmaraş Pazarcık depremi kuvvetli yer hareketi kayıtlarına göre istasyonlarda kayıt edilen maksimum yer ivmelerinin dağılımı (AFAD TADAS, 2023, <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17966>).

Figure 3. Distribution of maximum ground accelerations recorded at stations according to strong ground motion records of the Kahramanmaraş Pazarcık earthquake (AFAD TADAS, 2023, <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17966>).



Şekil 4. Kahramanmaraş Elbistan depremi kuvvetli yer hareketi kayıtlarına göre istasyonlarda kayıt edilen maksimum yer ivmelerinin dağılımı earthquake (AFAD TADAS, 2023, <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17969>).

Figure 4. Distribution of maximum ground accelerations recorded at stations according to strong ground motion records of the Kahramanmaraş Elbistan earthquake (AFAD TADAS, 2023, <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17969>).

Şekil 3 ve 4 incelendiğinde Pazarcık depreminin Elbistan depremine göre Hatay bölgesinde daha etkili olduğu görülmektedir. Kahramanmaraş Pazarcık depremi sırasında son kırılan Şekil 2'de 3 numaralı ok ile gösterilen segment Hatay Antakya bölgesine çok yakındır ve kırılma Hatay Antakya'ya doğru gerçekleşmiştir. Kahramanmaraş Elbistan depreminin merkez üssü Hatay Antakya bölgesine 200 km'den fazla bir mesafededir. Bu nedenle Pazarcık depremi Elbistan depremine göre Hatay bölgesinde daha etkili olmuştur.

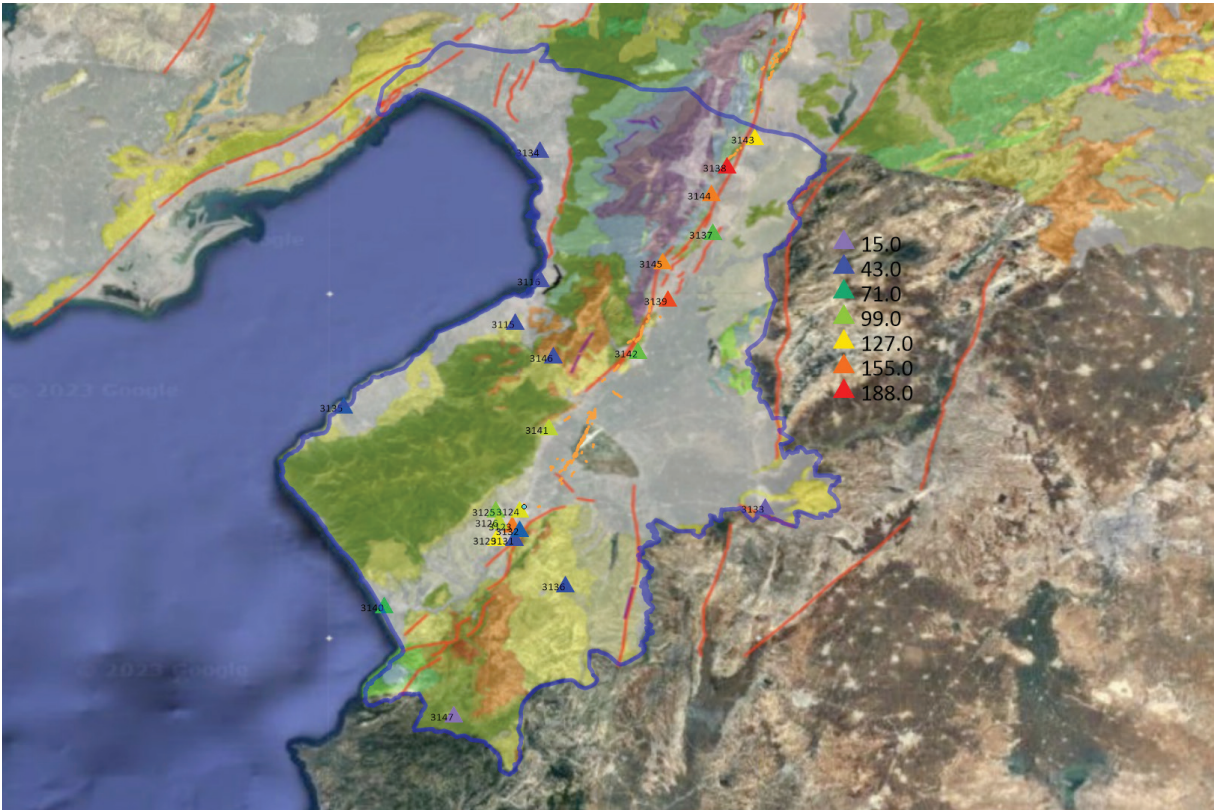
KAHRAMANMARAŞ PAZARCİK DEPREMİ HATAY BÖLGESİ KUVVETLİ YER HAREKETİ KAYITLARININ İNCELENMESİ

Hatay bölgesindeki birçok istasyon faya oldukça yakın konumdadır (3123, 3124, 3125, 3126, 3131, 3132, 3133, 3137, 3138, 3139, 3141, 3142, 3143, 3144, 3145). Şekil 5'te Hatay, Kuvvetli Yer Hareketi Kayıt İstasyonları konumları ve Kahramanmaraş Pazarcık Depremi kayıtlarının yatay PGV (cm/sn) geometrik ortalamaları görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde Kahramanmaraş Pazarcık depreminin Hatay bölgesinde çok şiddetli yer hareketleri oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Ayrıca bu bölgenin jeomorfolojik yapısı incelendiğinde doğu ve batıdan yükseltilerle sınırlanan bir basen yapısı görülür. Bu nedenle bölgede Kahramanmaraş Pazarcık depremi kayıtlarında hem basen hem de yakın fay etkilerinin görülmüş olması beklenmektedir. Abdelmeguid vd. (2023) inceledikleri yakın fay Kahramanmaraş Pazarcık depremi kayıtlarında süper kayma hızlarının ağırlıklı olarak ilk kırılmanın geliştiği Narlı fayı ve Hatay bölgesinde fay kırığı izinin güney – güney batı ucunda görüldüğünü belirtmişlerdir. Bununla birlikte Abdelmeguid vd. (2023)'nin çalışmasında, fayın karmaşık geometrik yapısı

nedeniyle Narlı fayı ve Hatay bölgesindeki kırılmanın normal hızda kırılma ile süper kayma türü kırılmaların karışımı şeklinde geliştiği ifade edilmiştir. Mello vd. (2016)'ne göre kırılma hızının, kayma dalgası hızını aştığı süper kayma türü kırılmaların oluşturduğu yer hareketlerinin karakteristik özellikleri faya paralel oluşan yer hızının faya dik bileşene göre yüksek olmasıdır.

Çizelge 1'de ise seçilen istasyonların özellikleri ve kuvvetli yer hareketleri parametreleri özetlenmiştir. Bu istasyonlarda maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranı değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.



Çizelge 1. Seçilen bazı istasyonların özellikleri ve kuvvetli yer hareketleri parametreleri.

Table 1. Properties and strong ground motion parameters of some selected stations.

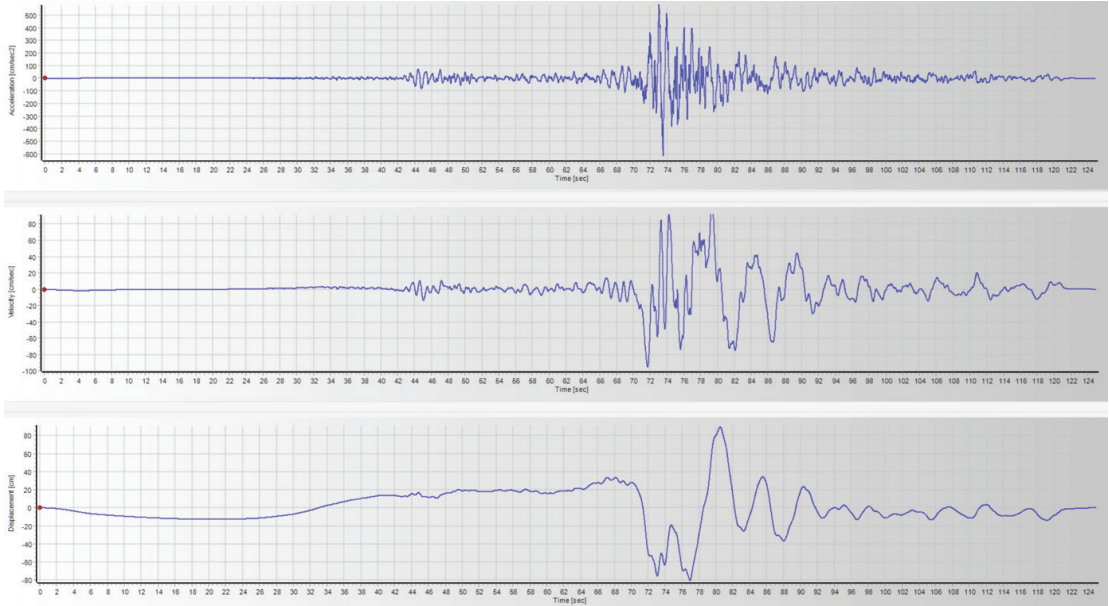
İstasyon	RJB (km)	V_{s30} (m/sn)	PGA E (g)	PGA N (g)	PGA U (g)	Oran D/Y	PGV E (cm/sn)	PGV N (cm/sn)	PGV U (cm/sn)
3143	0,4	445	0,36	0,39	0,42	1,12	106,4	129,5	29
3138	2	618	0,76	0,91	1,09	1,31	216,9	135,3	83,2
3144	2,1	535	0,78	0,62	0,46	0,69	139	138,1	80,2
3137	1	688	0,86	0,46	0,51	0,79	77,2	78,2	40,1
3145	3,7	533	0,71	0,61	0,67	0,95	157,7	116,5	61,8
3139	0,3	272	0,51	0,59	0,39	0,66	150,1	157	54,3
3142	0,4	539	0,76	0,66	0,51	0,69	76,5	87,8	30,6
3141	6,9	338	0,87	0,96	0,63	0,73	124,5	83,1	43,2

Çizelge 1 incelendiğinde maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, bu bölgelerde yakın fay etkilerinin varlığını göstermektedir. Kahramanmaraş Pazarcık depreminin Hatay bölgesinde oluşturduğu kuvvetli yer hareketi karakteristiklerini anlamak için bölgeden hem faya yakın hem de yer hareketi maksimum hız değerleri göreceli olarak yüksek olan iki istasyon 3124 ve 3143 seçilmiş bunların kayıtları ve tepki spektrumları incelenmiştir. 3124 numaralı istasyon fayın güney ucunda fayın hemen batısında, 3143 numaralı istasyon ise kuzeyde fayın hemen doğusunda bulunmaktadır. AFAD TADAS internet sitesinde bu iki istasyon için yapılmış Jeofizik Etüd Raporları bulunmaktadır. Bu kapsamda MASW, REMİ ve mikrotremor çalışmaları yapılmıştır. 3143 numaralı istasyonun V_{s30} değeri, 445 m/sn, 3124 numaralı istasyonun V_{s30} değeri, 283 m/sn olup her iki istasyon da Kuvaterner yaşlı birimler

üzerindedir. 3143 numaralı istasyonun oturduğu birimler alüvyon yelpazesi olarak tanımlanmış olup 3124 numaralı istasyonun oturduğu birimler ayrılmamış Kuvaterner olarak tanımlanmıştır. AFAD TADAS sisteminden alınan bilgilere göre 3124 numaralı istasyonun hakim periyodu 0.81 sn, 3143 numaralı istasyonun hakim periyodu ise 1.43 sn olarak bildirilmiştir. Morfolojik yapı incelendiğinde 3143 numaralı istasyonun ova kenarında, 3124 numaralı istasyonun ise ovanın orta kısımlarında bulunduğu anlaşılmaktadır.

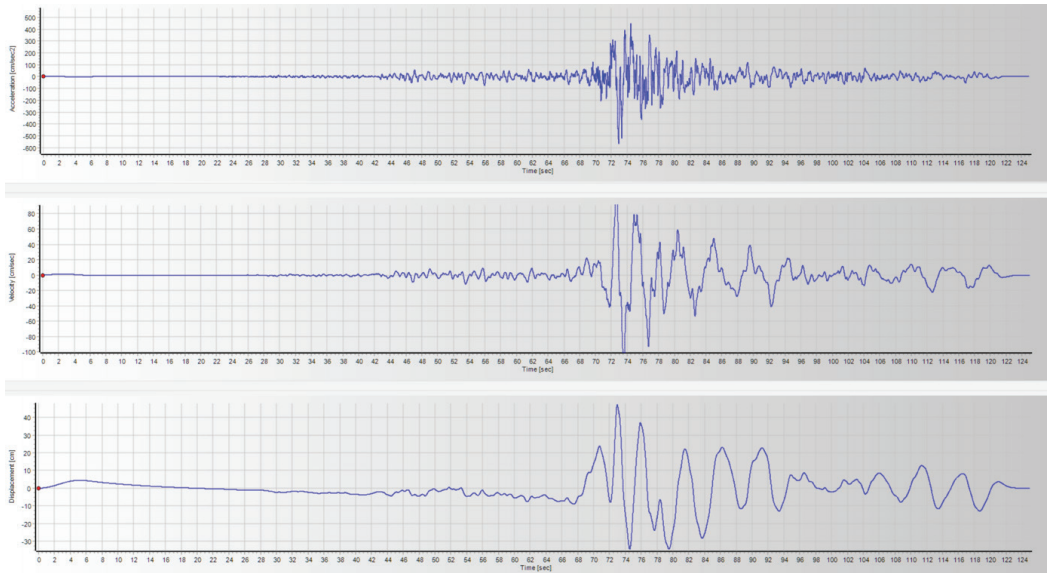
Şekil 6'da 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları, Şekil 7'de ise aynı istasyonun kuzey – güney yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları görülmektedir. Çizelge 2'de 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait kuvvetli yer hareketi parametreleri sunulmuştur.

Işık



Şekil 6. 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları.

Figure 6. East-west direction acceleration time, velocity time and displacement time records of the Pazarcık earthquake of station 3124.



Şekil 7. 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait kuzey – güney yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları.

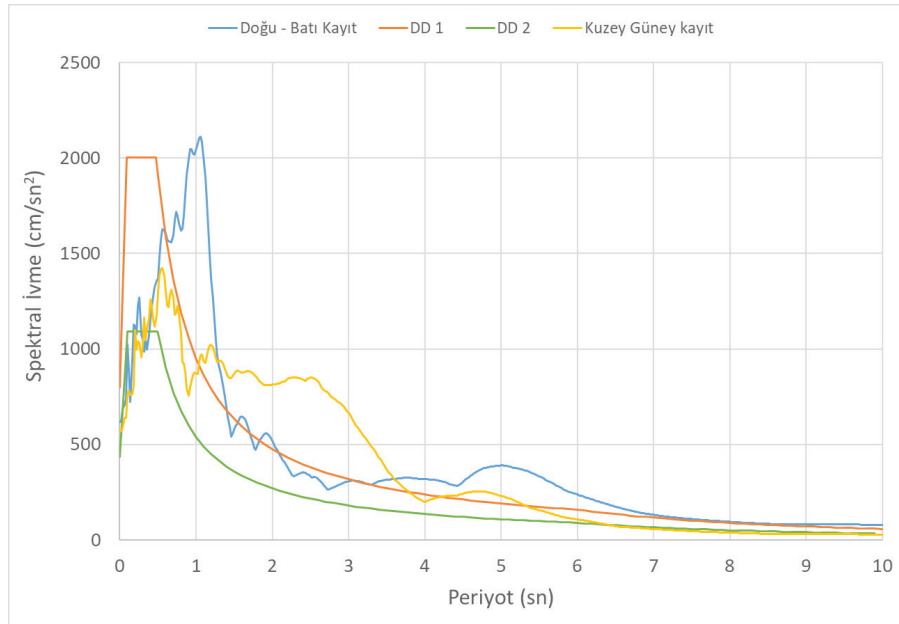
Figure 7. North-south direction acceleration time, velocity time and displacement time records of the Pazarcık earthquake of station 3124.

Çizelge 2. 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait kuvvetli yer hareketi parametreleri.

Table 2. Strong ground motion parameters of east-west and north-south direction components of the Pazarcık earthquake of station 3124.

Parametre	Doğu – Batı Yönü	Kuzey – Güney Yönü
Maks. İvme (cm/sn ²)	618,7	568,8
Maks. İvme Anı (sn)	73,06	72,97
Maks. Hız (cm/sn)	97	112,3
Maks. Hız Anı (sn)	79,3	73,6
Maks. Yerdeğiştirme (cm)	89,4	47,3
Maks. Yerdeğiştirme Anı (sn)	80,5	73
Vmaks / Amaks: (sn)	0,16	0,2
İvme RMS: (cm/sn ²)	62,1	55,6
Hız RMS: (cm/sec)	18	15,6
Yerdeğiştirme RMS: (cm)	20,9	9,2
Arias Yoğunluğu (m/sn)	7,7	6,2
C. A. V. (cm/sec)	3370,8	3138,8
Etkin Süre (sn)	18,88	21,42

3124 numaralı istasyonun Kahramanmaraş Pazarcık depremi kayıtları incelendiğinde her iki yatay yönde de maksimum hız ve maksimum ivme değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ancak doğu – batı yönlü maksimum yer değiştirmenin kuzey güney yönüne oranla oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca hem kuzey – güney hem de doğu batı yönlerinde hız zaman kayıtları darbe türü olmaktan uzak olup hızların ve yer değiştirmelerin giderek azalan 6 – 7 adet dalga şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durum olası bir basen etkisine işaret etmektedir. Şekil 8’de sunulan tepki spektrumları iki yatay yönde farklı baskın periyotların büyütülmüş olduğunu, özellikle uzun periyotlarda TBDY (2018)’in istasyonun bulunduğu alandaki ZD zemin sınıfı için hesaplanmış olan hem DD2 hem de DD1 deprem seviyesi için tasarım tepki spektrumlarının üzerinde spektral ivmeler oluştuğunu göstermektedir.



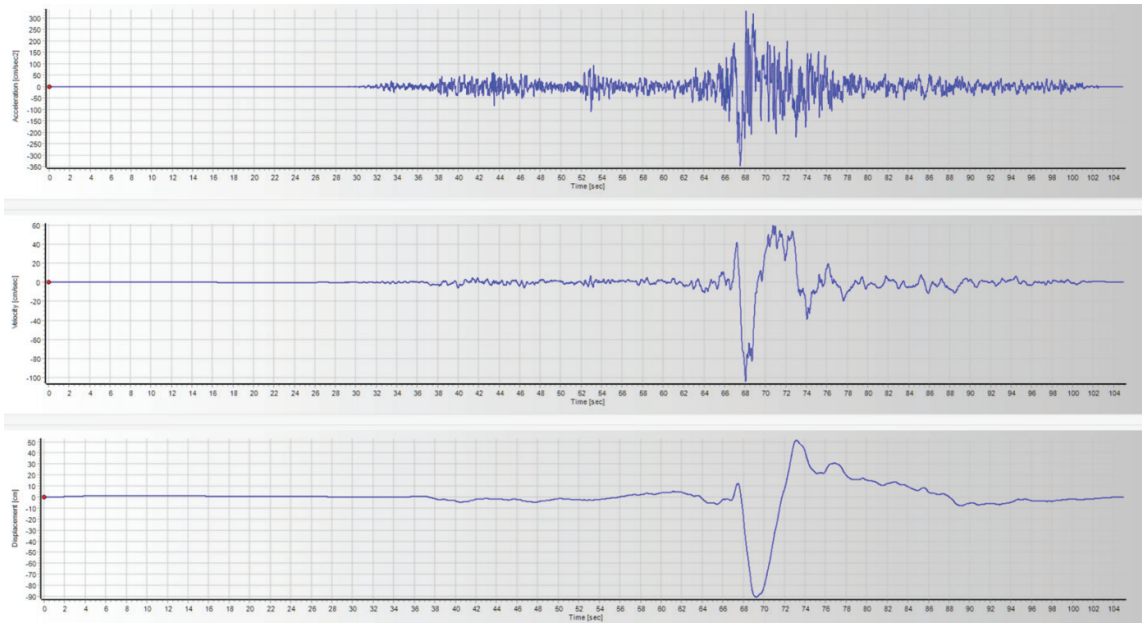
Şekil 8. 3124 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait tepki spektrumları ve DD1 ve DD2 deprem düzeyine ait TBDY (2018) tasarım tepki spektrumları.

Figure 8. Response spectra of east-west and north-south components of the Pazarcık earthquake of station 3124 and TBDY (2018) design response spectra of DD1 and DD2 earthquake levels.

Işık

Şekil 9'da 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları, Şekil 10'da ise aynı istasyonun kuzey – güney yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları görülmektedir. Şekil 11'de ise 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü

bileşenlerine ait tepki spektrumları ve aynı noktanın ZC zemin sınıfı için TBDY (2018)'e göre hesaplanmış DD1 ve DD2 yatay tasarım tepki spektrumları sunulmuştur. Çizelge 3'de 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait kuvvetli yer hareketi parametreleri verilmiştir.

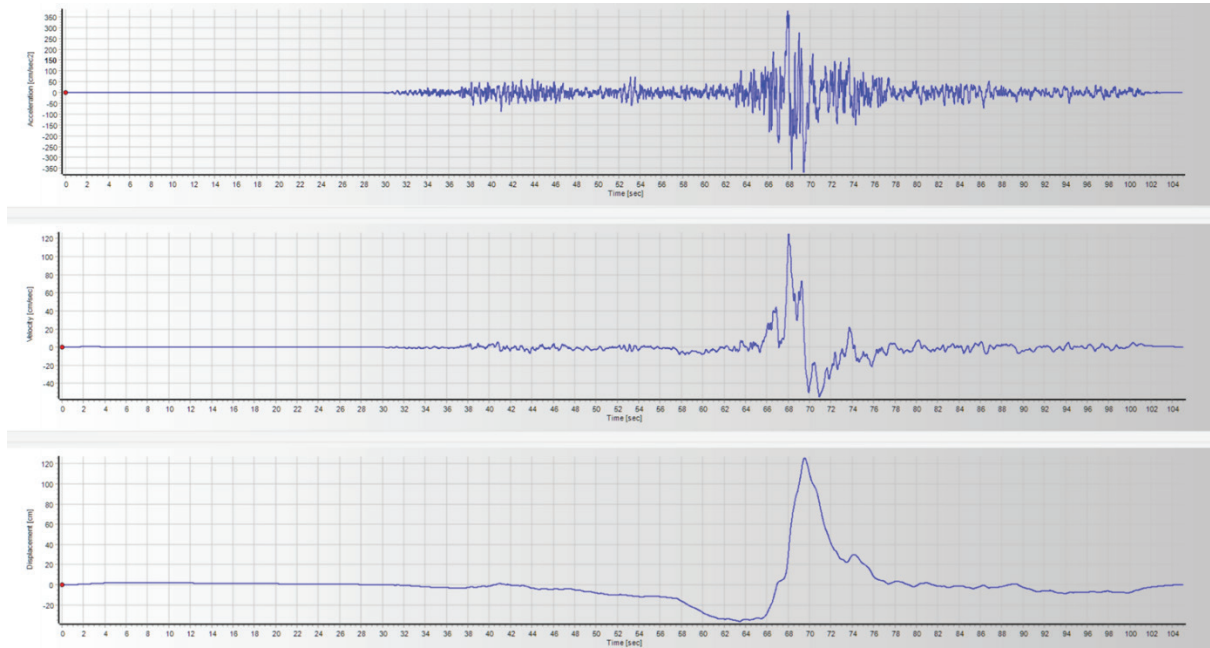


Şekil 9. 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları.

Figure 9. East-west direction acceleration time, velocity time and displacement time records of the Pazarcık earthquake of station 3143.

Şekil 9 ve 10 incelendiğinde 3143 numaralı istasyonun hem kuzey – güney hem de doğu – batı yönlerindeki hız kayıtlarında hız darbesi biçiminde yer hareketlerinin oluştuğu düşünülmektedir. Şekil 11 incelendiğinde ise TBDY (2018)'in hem DD2 deprem seviyesi için tasarım tepki spektrumlarının üzerinde spektral ivmeler oluştuğunu görülmektedir. Hız darbesi türünde kayıtların özellikle faya dik yönde

oluşması beklenmektedir. Fay neredeyse kuzey – güney yönlü uzandığı için 3143 numaralı istasyonun doğu – batı yönlü hız kayıtları üzerinde Kardoutsou vd. (2017)'nin algoritmasıyla SeismoSignal (Seismosoft, 2022) yazılımı ile hız darbesi tanımlaması yapılmış olup, sonuçlar Şekil 12'de sunulmuştur. Şekil 12'ye göre kayıt hız darbesi olarak tanımlanmış, hız darbesinin periyodu 3,94 sn olarak belirlenmiştir.



Şekil 10. 3143 numaralı istasyonun Pazarlık depremine ait kuzey – güney yönlü ivme zaman, hız zaman ve yer değiştirme zaman kayıtları.

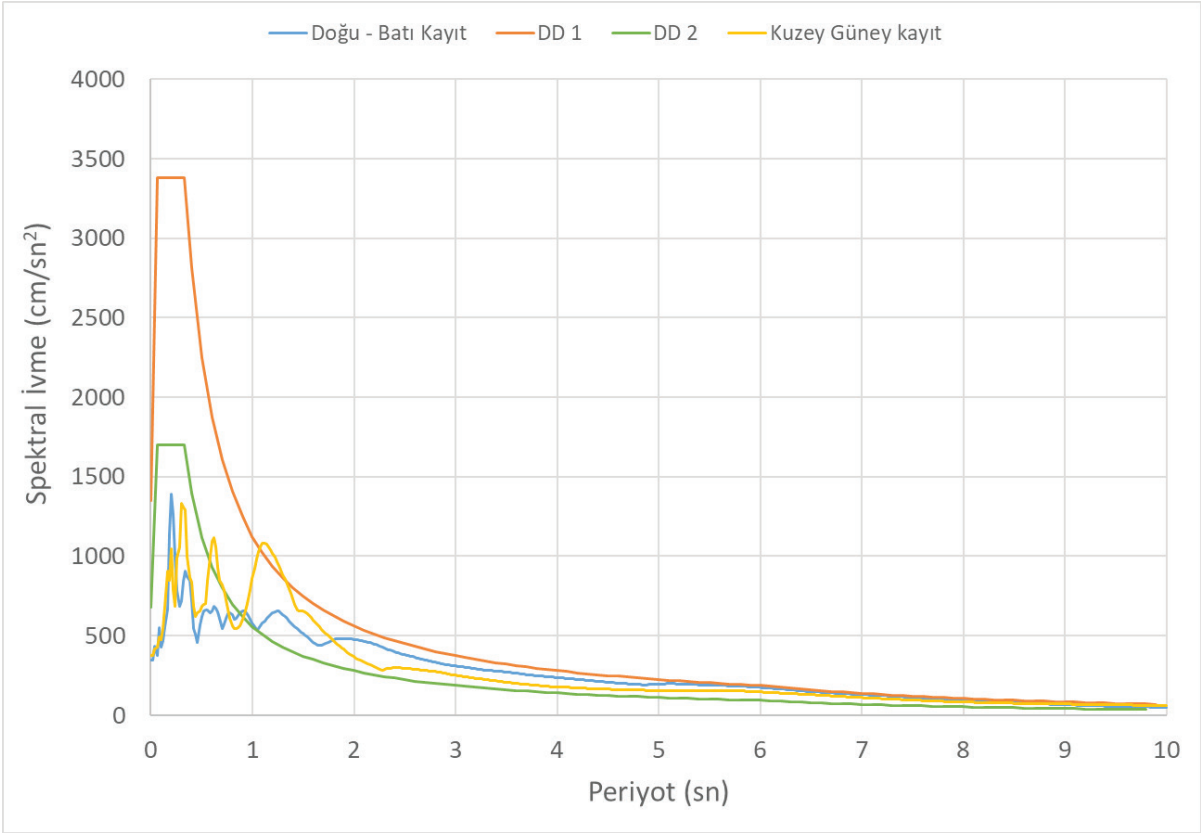
Figure 10. North-south direction acceleration time, velocity time and displacement time records of the Pazarlık earthquake of station 3143.

Çizelge 3. 3143 numaralı istasyonun Pazarlık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait kuvvetli yer hareketi parametreleri.

Table 1. Strong ground motion parameters of east-west and north-south direction components of the Pazarlık earthquake of station 3143.

Parametre	Doğu – Batı Yönü	Kuzey – Güney Yönü
Maks. İvme (cm/sn ²)	346,7	378
Maks. İvme Anı (sn)	67,58	67,89
Maks. Hız (cm/sn)	104,4	124,8
Maks. Hız Anı (sn)	68,08	68,04
Maks. Yerdeğiştirme (cm)	96,6	125,6
Maks. Yerdeğiştirme Anı (sn)	69,23	69,53
Vmaks / Amaks: (sn)	0,3	0,33
İvme RMS: (cm/sn ²)	38,4	40,05
Hız RMS: (cm/sec)	12,2	11,82
Yerdeğiştirme RMS: (cm)	15,1	20,56
Arias Yoğunluğu (m/sn)	2,48	2,7
C. A. V. (cm/sec)	1882,18	1829,94
Etkin Süre (sn)	26,39	23,16

Işık



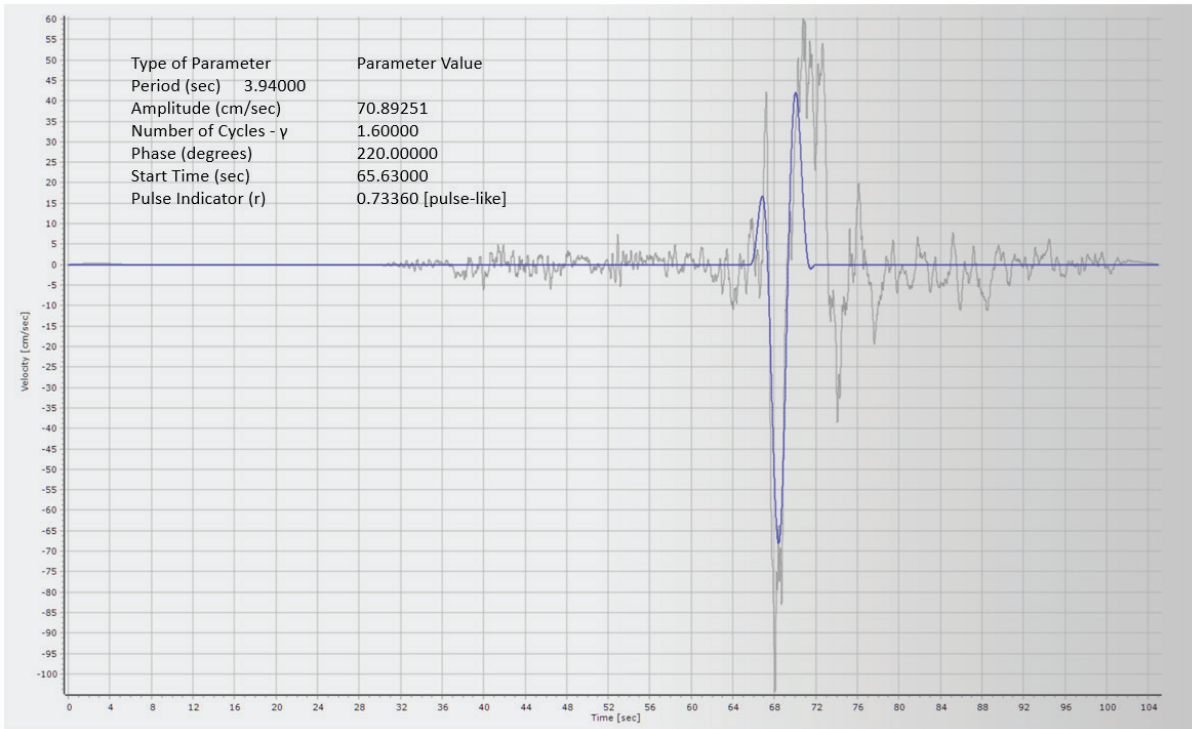
Şekil 11. 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı ve kuzey güney yönlü bileşenlerine ait tepki spektrumları ve DD1 ve DD2 deprem düzeyine ait TBDY (2018) tasarım tepki spektrumları.

Figure 11. Response spectra of east-west and north-south components of the Pazarcık earthquake of station 3143 and TBDY (2018) design response spectra of DD1 and DD2 earthquake levels.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deprem sırasında bir alanda oluşan sismik dalgaların frekans içeriği ve genlikleri fayın kırılma mekanizmasına, sismik kabuğun yapısına ve yüzeye yakın zeminler ile yumuşak kayaların özelliklerine bağlıdır. Zemin etkileri, özellikle basen etkileri deprem yer hareketleri üzerinde yüksek periyotlarda büyütme etkisi oluşturmaktadır. Bu tür alanlarda gerçekleşen yer hareketleri deprem yönetmeliklerinde verilen tasarım tepki spektrumlarının üzerinde tepki spektrumları oluşturabilmektedir. Ülkemizde son dönemlerde yaşanan depremlerde de bu

durum gözlenmiştir. Deprem yer hareketi, ayrıca faya yakın alanlarda, faya uzak alanlara kıyasla farklılıklar içermektedir. Yakın fay alanında oluşan deprem yer hareketi kayıtlarında, maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranının yüksek olması, hız zaman kayıtlarında hız darbesinin gözlemlenmesi, kalıcı yer değiştirme etkileri (fling step) ve yer hareketlerinde burulma bileşenlerinin varlığı gibi etkiler görülebilmektedir. Bu etkiler nedeniyle de yakın fay alanlarında yönetmeliklerin önerdiğinden daha şiddetli yer hareketleri oluşabilmektedir.



Şekil 12. 3143 numaralı istasyonun Pazarcık depremine ait doğu – batı yönlü hız zaman kaydında Kardoutsou vd. (2017)'nin algoritmasıyla yapılmış hız darbesi tanımlaması sonuçları.

Figure 12. The results of the velocity pulse analysis performed with the algorithm of Kardoutsou et al., (2017) in the east-west direction velocity time record of the Pazarcık earthquake of station 3143.

Zemin büyütmesi bir boyutlu etkiler ile iki – üç boyutlu etkiler nedeniyle oluşmaktadır. Bir boyutlu etkiler tabakaların empedans farklılıklarından oluşan genlik artışı, tabakaların kısmi rezonansı şeklindeki iki – üç boyutlu etkiler, basenlerde kayma dalgalarının yüzey dalgalarına dönüşmesi, basen rezonansı ve basen şekli nedeniyle sismik dalgaların odaklanması şeklinde oluşmaktadır. Yakın fay alanlarında ise fay kırılma hızının kayma dalgası hızına yakın olması nedeniyle ileri yönsellik etkisindeki sahalarda faya dik yönde hız darbesi oluşumu, kırılma hızının kayma dalgası hızından yüksek olması durumunda faya paralel yönde yüksek şiddette titreşimler oluşması ve fay atımından kaynaklanan kalıcı deformasyonların

yer değiştirme kayıtlarında görülmesi gibi durumlarla karşılaşılabilmektedir.

Bu çalışmada 06.02.2023 tarihi 04.17'de Kahramanmaraş ili Pazarcık ilçesinde 7,7 büyüklüğünde meydana gelen depremin Hatay bölgesinde oluşturduğu kayıtlardan 3124 ve 3143 numaralı istasyonların kayıtları değerlendirilmiştir. 3124 numaralı istasyonun Kahramanmaraş Pazarcık depremi kayıtları incelendiğinde her iki yatay yönde de maksimum hız ve maksimum ivme değerlerinin birbirlerine yakın olduğu ancak doğu – batı yönlü maksimum yer değiştirmenin kuzey güney yönüne oranla oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca hem kuzey – güney hem de doğu - batı yönlerinde

hız zaman kayıtları darbe türü olmaktan uzak olup hızların ve yer değiştirmelerin giderek azalan 6 – 7 adet dalga şeklinde olduğu görülmektedir. Esasen Hatay – Antakya bölgesinde kayıt edilen kuvvetli yer hareketleri, hem bir boyutlu zemin büyütme etkileri (empedans farkı kaynaklı büyütme, tabakaların kısmı rezonans etkisi), hem 2 – 3 boyutlu basen etkileri (basen kenarında oluşan yüzey dalgaları, odaklanma etkisi, basen rezonansı) hem de faya yakın sahalarda gözlenen etkilerin bileşiminden oluşmaktadır. Ancak yüksek periyotlarda çok yüksek spektral ivmelerin gözlenmesi olası bir basen etkisine işaret etmektedir. 3143 numaralı istasyonun hem kuzey – güney hem de doğu – batı yönlerindeki hız kayıtlarında hız darbesi biçiminde yer hareketlerinin oluştuğu görülmüştür. 3143 numaralı istasyonun doğu – batı yönlü hız kayıtları üzerinde Kardoutsou vd. (2017)'nin algoritmasıyla hız darbesi tanımlaması yapılmış, hız darbesinin periyodu ise 3,94 sn olarak belirlenmiştir.

Yumuşak zeminler ile dolu basenlerde, özellikle yüksek periyotlarda yönetmelikler tarafından önerilen tasarım tepki spektrumlarının üzerinde yer hareketleri oluşturabilmektedir. Bu tür etkiler 2 – 3 boyutlu zemin tepki analiz yöntemleriyle değerlendirilebilmektedir. Bununla birlikte bu tür analizlerin yapılabilmesi için basen geometrisi, jeolojik yapısı ve birimlerin kayma dalgası hızları – mekanik özellikleri bilinmelidir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için derin zemin araştırma teknikleri gerekmektedir. Bu tür araştırmaların parsel bazında etütlerle belirlenmesi çok olası gözükmemektedir. Bu nedenle İmara Esas Jeolojik – Jeoteknik etütlerde çalışma sahasında basen yapılarının bulunması durumunda bu konunun araştırılması ve saha için özel tasarım tepki spektrumlarının oluşturulması önerilir.

KAYNAKLAR

- Abdelmeguid, M., Zhao, C., Yalcinkaya, E., Gazetas, G., Elbanna, H. & Rosalis, A., (2023). Revealing The Dynamics of the Feb 6th 2023 M7.8 Kahramanmaraş/Pazarcık Earthquake: near-field records and dynamic rupture modeling, arXiv:2305.01825 [physics.geo-ph].
- AFAD (2023, 03 Mart), TADAS Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17966>.
- AFAD (2023, 03 Mart), TADAS Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17969>.
- Aguirre, J. & Irikura, K., (1997). Nonlinearity, liquefaction, and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogoken Nanbu earthquake. *Bull Seism Soc Am* 87:1244–1258
- Aki, K. & P. Richards (1980). *Quantitative Seismology. Theory and Methods*, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Ayoubi, P., Mohammadi, K. & Asimaki, D., (2021). A systematic analysis of basin effects on surface ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141.
- Beresnev, I. A. & Wen, K., (1996). Nonlinear Soil Response – A Reality?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No 6, pp. 1964 – 1978.
- Boore, D.M., (2013). The Uses and Limitations of the Square-Root-Impedance Method for Computing Site Amplification, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 4, pp. 2356–2368, August 2013, doi: 10.1785/0120120283.
- Borcherdt, R. D., (1970). Effects of Local Geology on Ground Motion Near San Francisco Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 60, No 1, pp 29 – 61.
- Chavez-Garcia, F., Raptakis, D., Makra, K., & Pitilakis, K. (2000). “Site effects at EuroSeisTest—II: Results from 2-D numerical modelling and comparison with observations.” *Soil. Dyn. Earthquake Eng.*, 191, 23–39.

- DMAM O.D.T.Ü. Deprem Araştırma Merkezi, (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık Mw=7.7 ve Elbistan Mw=7.6 Depremleri Ön Değerlendirme Raporu.
- Elgamal, A. & He, L., (2004). Vertical earthquake ground motion records: an overview, *Journal of Earthquake Engineering*, 8 (05), 663 – 697.
- Finn, W. D. L. (1991). Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc. of the Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Stanford, California, Vol. 1, 199-259.
- Furumura M., Sasatani T. & Furumura T., 1997, Generation of Basin Induced Surface Waves Observed in the Tokachi Basin, Hokkaido Japan, *J. Phys. Earth*, 45, 287 – 305.
- Gelagoti, F., Gazetas, G., & Kourkoulis, R. (2007). 2D Valley Effects: How predictable and important are they?”, *Proceedings, 4th International Conference of Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, 2007.
- Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., Tazoh, T. & Gazetas, G., (2010). Seismic Wave Propagation in a Very Soft Alluvial Valley: Sensitivity to Ground-Motion Details and Soil Nonlinearity, and Generation of a Parasitic Vertical Component, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 100, No. 6, pp. 3035–3054.
- Hartzell, S. H., (1998). Variability in nonlinear sediment response during the 1994 Northridge, California, earthquake. *Bull Seismol Soc Am* 88(6):1426–1437
- Hunter, J. A, Crow, H., Brooks, G. R., Pyne, M., Lamontagne, M., Pugin, A., Pullan, S. E., Cartwright, T., Douma, M., Burns, R. A., Good, R. L., Motazedian, B., Folahan, I., Dixon, L., Dion, K., Duxbury, A., Landriault, V., Ter-Emmanuel, V., Jones, A., Plastow, G. & Muir, D., (2010). Seismic site classification and site period mapping in the Ottawa area using geophysical methods, Technical Report.
- Idriss, I. M. & H. B. Seed (1968). An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake, *Bull Seism. Soc. Am.* 58, 2013 - 2032.
- Idriss, I. M. & H. B. Seed (1970). Seismic response of soil deposits, *J. Soil Mech. Foundations Div. ASCE* 96.
- Kardoutsou, V., Taflampas, I. & Psycharis, I. N. (2017). A new pulse indicator for the classification of ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3):1356-1364.
- Kudo, K., & Sawada, Y. (1998). A brief review on the Ashigara blind prediction test and some follow-up studies. *Proc., 2nd Int. Symp. On the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, Japan, 1, 305–312.
- Kudo, K., Shima, E., & Sakaue, M. (1988). Digital strong motion accelerograph array in Ashigara valley. *Proc., 9th World Conf. On Earth. Engin., Earthquake Engineering Research Center*, Berkeley, 119–124.
- Lanzo, G & Pagliaroli P, (2009), Numerical Modeling of Site Effects at San Giuliano di Puglia (Southern Italy) during the 2002 Molise Seismic Sequence, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 9.
- Mello, M., Bhat, H.S. & Rosakis, A.J., (2016). Spatiotemporal properties of Sub-Rayleigh and supershear rupture velocity fields: Theory and experiments. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 93, 153–181 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.02.031>
- Moustafa, A. & Takewaki, I., (2010). Characterization and modelling of near-fault pulse-like strong ground motion via damage-based critical excitation method. *Struct. Eng. and Mechanics*, 34, 755-778.
- Nakamura Y., (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, Vol 30, No 1.
- Raptakis, D., Chavez-Garcia, F., Makra, K., & Pitilakis, K. (2000). Site effects at EuroSeis test—I: Determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis. *Soil. Dyn. Earthquake Eng.*, 191, 1–22.

- Satoh, T., Sato, T. & Kawase, H. (1995). Nonlinear Behavior of Soil Sediments Identified by Using Borehole Records Observed at the Ashigara Valley, Japan. *Bull Seismol Soc Am* 85(6):1821–1834.
- Seismosoft, (2022), SeismoSignal - A computer program for signal processing of time-histories. www.seismosoft.com.
- Shearer, P. M. & J. A. Orcutt (1987). Surface and near-surface effects of seismic waves-theory and borehole seismometer results, *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 1168-1196.
- Somerville, P. G., (2000). Seismic hazard evaluation. *Bull. New Zealand Soc. Earthq. Eng.*, 33, 371-386.
- Tazoh, T., Dewa, K., Shimizu, K., & Shimada, M. (1984). Observations of earthquake response behavior of foundation piles for road bridges. *Proc., 8th World Conf. on Earth Engineering*, Vol. 3, 577–584.
- TBDY, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Türkiye Cumhuriyeti, Ankara.
- Zeng, Y., Johnson, P.A & Beresnev, I.A. (1998). Pervasive nonlinear sediment response during the 1994 Northridge Earthquake: observations and finite-source simulations. *J Geophys Res* 103 (26):869
- Zhang, B., & Papageorgiou, A., (1996). Simulation of the response of the Marina District Basin, San Francisco, California, to the 1989 Loma Prieta earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86, no. 5, 1382–1400.