

MODEL BİR ŞEV İLE DEPREM ÖZELLİKLERİNİN ŞEV STABİLİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İnan KESKİN *
Fatih KARATAŞ **
Selman KAHRAMAN ***

Alınma: 04.04.2022; düzeltme: 17.05.2022; kabul: 10.06.2022

Öz: Bu çalışmada, geoteknik mühendisliğinin başlıca konuları arasında yer alan güvenli şevlerin tasarımı konusu incelenmiştir. Güvenli şevlerin tasarımı için dikkat edilmesi gereken statik yükler kadar önemli bir diğer etken ise, sismik yüklerdir. Sismik yükler altında şev davranışının irdelenmesi niyetiyle tasarlanmış olan model şeve farklı özellikteki depremler etki ettirilerek sonlu eleman yazılımı ile bir dizi şev stabilize analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda tasarlanan model şev, farklı özelliklerdeki senaryolar ile çeşitli bölgelerde meydana gelmiş, çok sayıda istasyon ölçümleri bulunan 12 adet gerçek deprem kayıt verisi ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak, bu depremlerin tasarlanmış olan model şevin stabilitesine olan etkileri ortaya koyulmuş ve elde edilen veriler doğrultusunda şev tasarımında daha güvenli ve daha ekonomik sonuçlar alınması için dikkat edilmesi gereken hususlara değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şev Stabilitesi, Sismik Analiz, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Dinamik Analiz.

Investigation of The Effects of Earthquake Characteristics on Slope Stability Using Model Slope

Abstract: In this study, the design of safe slopes was investigated, which is one of the main topics in geotechnical engineering. Another factor that should be considered in the design of safe slopes is seismic loads in addition to static loads. As part of the study, a series of slope stability analyzes were performed using finite element software by applying earthquakes with different characteristics to the model slope, which was designed with the intention of investigating slope behavior under seismic loads. The model slope designed in this context was analyzed with 12 real earthquake record data that occurred in different regions with different scenarios and had many station measurements. As a result, the effects of these earthquakes on the stability of the designed model slope were pointed out and the points that should be considered to obtain safer and more economical results in slope design in the direction of the obtained data.

Keywords: Slope Stability, Seismic Analysis, Finite Element Method, Dynamic Analysis.

* Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü 78050 Karabük

** Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü 78050 Karabük

*** Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümü 78050 Karabük

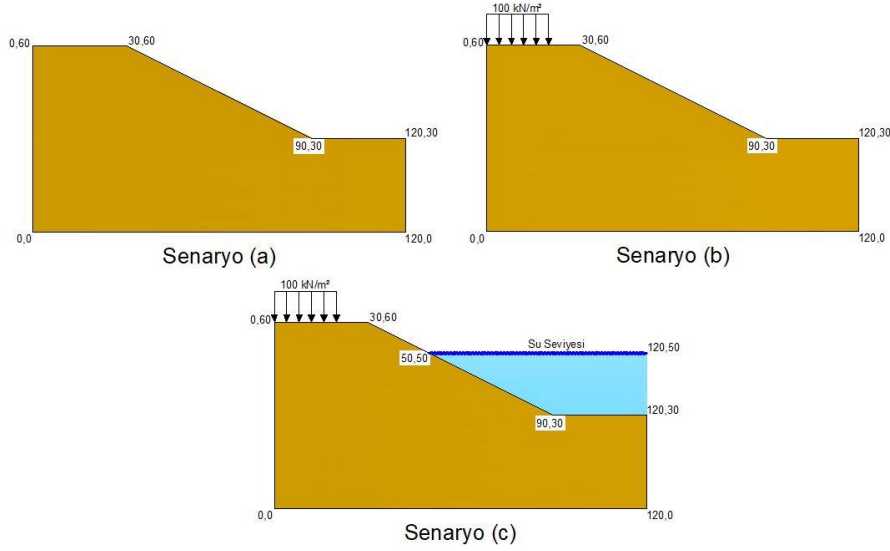
1. GİRİŞ

Yer kabuğunu oluşturan plakların hareketleri ile bu kırıklar üzerinde biriken enerjinin ansızın boşalması ile ortaya çıkan dalgaların yeryüzünde oluşturduğu sarsıntılara deprem denilmektedir (Atabey 2000). Bu sarsıntının özellikleri; genlik, ivme, süre ve frekans içeriği gibi parametreler ile ortaya konulmaktadır. Mühendislik yapılarının dizaynında bu parametrelerin dikkate alınması büyük öneme sahip bir zorunluluk olup şev stabilitesi analizlerinde de bu parametreler hayati derecede etkili olmaktadır. Geoteknik mühendisliğinin başlıca konuları arasında yer almakta olan şev stabilitesinin önemi tarih boyunca meydana gelmiş olan heyelan ve göçmelere bakıldığında daha iyi görülebilmektedir. Şev hareketleri ile ortaya çıkan hasarlar sonucunda meydana gelen ekonomik kayıplar, ülkelerin ekonomilerinde önemli oranlara ulaşabilmektedir (Akçakal, 2009).

Şevlerin stabilize analizi için genellikle izlenen yol; mevcut kuvvetlerin etkisi altında bulunan şevlerin çeşitli yöntemlerle elde edilen göçme daireleri üzerindeki hareketlerine karşı koyan kuvvetlerin toplamının bu kütle hareketine neden olabilecek kuvvetlerin toplamına oranı olarak tarif edilebilen güvenlik katsayısı yöntemidir. Buradaki temel amaç bu güvenlik katsayısının 1'den büyük olması sağlanarak yeterli stabilitenin temin edilmesidir. Yine güvenli tarafta kalabilmek için bu sayının 1'den belirli oranlarda büyük olması istenirken aynı zamanda ekonomik olmaktan da uzaklaşmaktadır. Ancak deprem etkisi altındaki şevlerde etkin olan kuvvetler, yalnızca statik kuvvetler değildir (Newmark, 1965; Kramer, 1996). Deprem neden olduğu dinamik kuvvetler ve bunların etkisiyle de oluşacak yer değiştirmelerin muhakkak dikkate alınması gerekir (Ishihara, 1986). Yine bunların yanı sıra güvenlik katsayısı yöntemi ile şev stabilitesi hesabı yapıldığında dikkate alınmayan ve şevi güvensiz duruma düşürebilecek bir diğer faktör ise depremin neden olduğu atalet kuvvetleridir. Bir bölgede daha önce meydana gelen depremlerin bilinmesi, şev stabilize analizleri açısından oldukça önemlidir (Kramer, 1996). Deprem etkisi ile meydana gelen şev hareketleri, depremin büyüklüğü arttıkça daha yıkıcı sonuçlar doğurmaktadır ve bir heyelanın tetiklenmesi için minimum deprem büyüklüğü söz konusudur. Aynı şekilde deprem kaynağından uzaklaştıkça deprem tetiklemesi ile meydana gelecek heyelan oluşumu da azalır ve belirli bir deprem büyüklüğü için artık heyelanların oluşmadığı bir sınır uzaklık söz konusu olur (Kramer, 1996). Literatürde deprem tetiklemesiyle meydana gelen bir çok heyelan bildirilmiştir (Keefer, 1984; Harp ve Jibson 1996; Yılmaz ve diğ., 2006; Özacar ve diğ., 2011; Doğan ve Karakaş 2013; Görüm, 2016). Deprem parametrelerinin şev stabilitesine etkisi kimi çalışmalarla irdelenmiş olup Ishihara (1986) şevlerin göçme potansiyelinin, şev kayma bölgesinin dış merkeze uzaklığına ve depremin magnitudüne bağlı olduğunu söylemiştir. Laboratuvar ölçeğinde de deprem özelliklerinin şev stabilitesine etkisi üzerine benzer sonuçların olduğu çalışmalarda mevcuttur. (Wartman ve diğ., 2001; Rathje ve Bray, 2001; Nova-Roessig ve Sitar, 2006) Olgun ve Acar (2009) Şevin fay hattına uzaklığı, zemin tabakası özellikleri ve şev geometrisi gibi faktörlerin tamamının birlikte değerlendirilmesi en gerçekçi sonuca ulaşılmasını sağlayacağını ifade etmektedir. Taher ve diğ., (2022) model bir şevi pekleşen zemin modeli ile tanımlayarak şev yüksekliği ve eğim açısının şevin güvenlik katsayısı (FS) üzerinde etkileri çeşitli senaryolarla irdelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, yenilme yüzeylelerinin çoğunun dairesel olduğu ve yüzeysel (sığ) kayma olarak sınıflandırılabilirliği sonucuna varılmıştır. Ayrıca şev yüksekliğinin ve şev açısının artması ile FS'nin azaldığı gözlemlenmiş olup bunun tersi durumda ise FS'nin arttığı değerlendirilmiştir. Bu sonuca ek olarak araştırmacılar tarafından gevşek taneli zeminlerden oluşan şevlerin FS'sini kolayca tahmin etmek için eğriler ve çizelgeler önerilmiştir.

Bu kapsamda çalışmada, farklı özelliklerdeki model şev ile çeşitli bölgelerde meydana gelmiş ve çok sayıda istasyon ölçümleri bulunan 12 adet depreme ait veriler kullanılmış olup, bu depremlerin model şevin stabilitesine etkileri şev stabilitesi analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılan sonlu eleman yazılımı (Plaxis 2D) ile tartışılmıştır. Elde edilen veriler irdelenerek

daha güvenli ve daha ekonomik şevlerin tasarımı için değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışma kapsamındaki analizlerin yapılabilmesi için tipik bir model şev kesiti tasarlanmış olup, şevi oluşturan malzemenin, çok katmanlı zeminlerdeki katman etkisinin sabit tutulması için tek katmandan oluşması düşünülmüştür. Bu kapsamında yapılacak analizlerin detaylandırılması ve farklı senaryolardaki zemin davranışlarının detaylı irdelenebilmesi adına çalışma kapsamında 3 ayrı senaryo geliştirilmiş ve analizlerde kullanılan şev modelleri Şekil 1’de malzeme özellikleri ise Çizelge 1’de verilmiştir. Bu senaryolardan birincisi; şev üzerinde yük ve su seviyesi olmadan tasarlanmıştır. İkinci senaryoda şev üzerinde, şevin tepe noktasının 10 m gerisinden başlayarak 20 m boyunca devam eden 100 kN/m²’lik düzgün yayılı yük bulunduğu kabul edilmiştir. Üçüncü senaryoda ise aynı şev yapısının toprak dolgu baraj gövdesi olduğu ve yine ikinci senaryoda olduğu gibi şevin üzerinde, şevin tepe noktasının 10 m gerisinden başlayarak 20 m boyunca devam eden 100 kN/m²’lik düzgün yayılı yükün bulunduğu kabul edilmiştir. Çalışma kapsamında yukarıda sayılan ve Şekil 1’de verilen senaryoların, statik ve dinamik yükler altında sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 1:

Simülasyonlarda kullanılan model şev ve özellikleri (Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3)

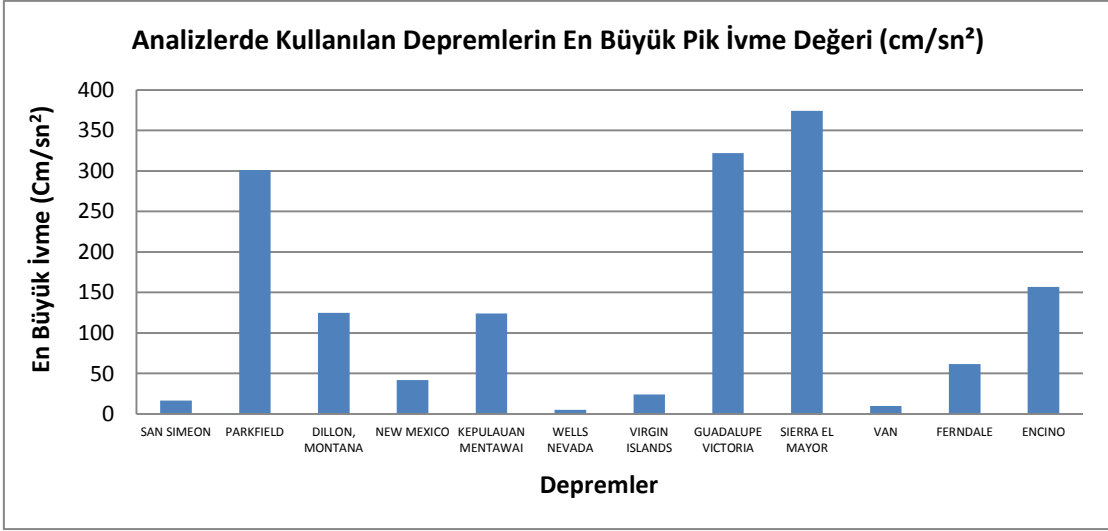
Tablo 1. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

Zemin Özellikleri						
γ_n (kN/m ³)	γ_{doy} (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	E (kN/m ²)	v	Vs (m/sn)
18	19	22	15	250000	0.30	250

2. ŞEV STABİLİTE ANALİZLERİNDE KULLANILAN DEPREMLER VE ÖZELLİKLERİ

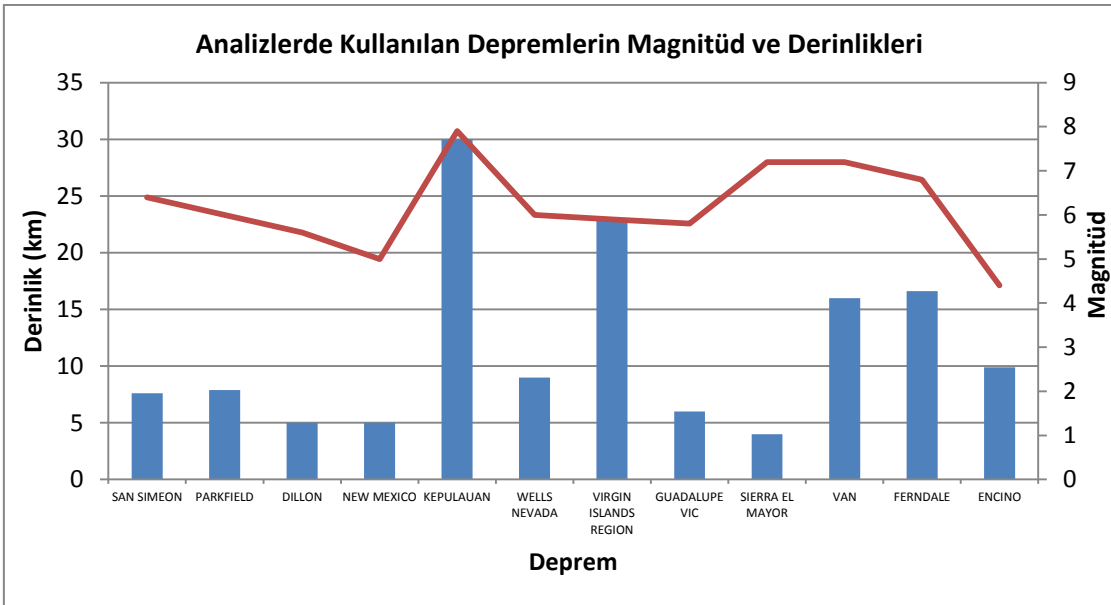
Deprem durumdaki stabilite analizinde Statik durumdaki stabilite analizindeki stabiliteyi bozan ve sağlayan kuvvetler genel olarak dikkate alınmaktadır. Ancak depremler için yapılan analizlerde statik durumdakinden farklı olarak statik durumdaki etkilere ek olarak depremden ileri gelen atalet kuvvetleri de stabiliteyi bozan bir etken olarak dikkate alınır (Ishihara, 1986). Bu çalışmada daha önce kesit geometrisi ve maruz kaldığı statik yükleri verilen şevin üç adet senaryo dâhilinde, dinamik yüklerin etkisi altındaki stabilitesi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada yurt içinde ve yurt dışında meydana gelmiş olan depremlere ait birçok ivme kayıtları arasından, parametrelerine göre ve örneklem

oluşturabilecek şekilde ayıklanan 12 adet depreme ait, toplam 100 adet ivme kaydı kullanılmıştır (URL1 2021). Analizlerde girdi parametresi olarak kullanılan farklı tarih ve lokasyonda meydana gelen bu 12 deprem kayıtları ilgili bilgiler Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4’de özetlenmiştir. Analizlerde kullanılan 12 deprem kayıtları, farklı deprem büyüklüğü, derinliğini, merkez üssüne olan uzaklığı, pik ivme değerleri ve kayıt süresi ile birbirinden değişik litolojideki kayıt istasyonlarını kapsamaktadır. Depremlerin ivme kayıtlarının büyüklükleri, kaydı yapan istasyonun merkez üssüne uzaklığı ve istasyonun bulunduğu zemin özellikleri veya bina yapısının niteliği gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Kramer, 1996). İvme değerinin negatif veya pozitif olması ise hareket yönünü belirtmektedir. Bu nedenle grafiklerde en büyük ivme değerlerinin mutlak değeri dikkate alınmıştır.



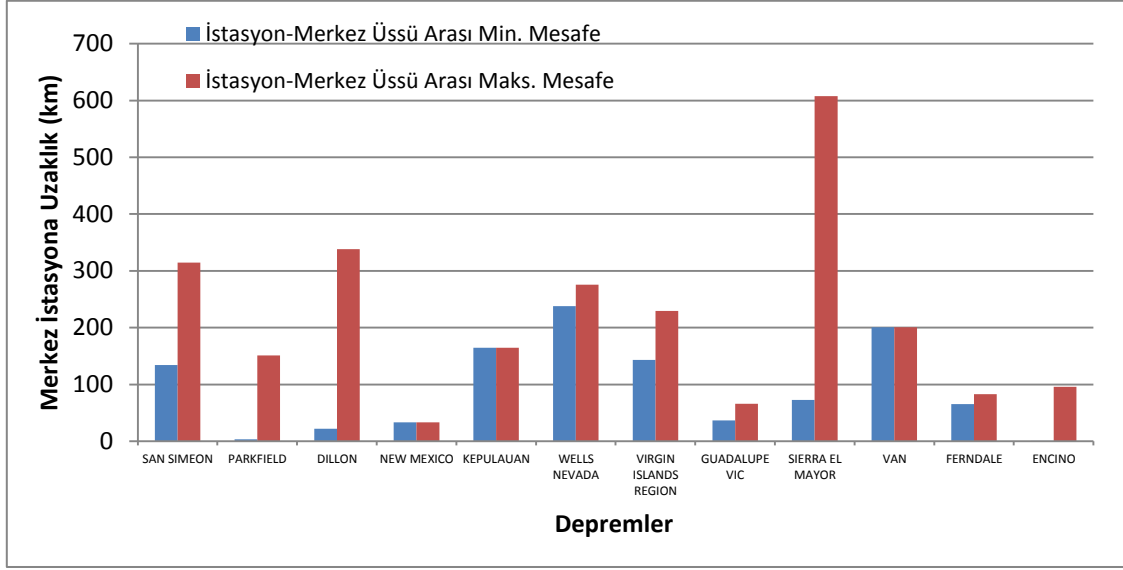
Şekil 2:

Veri setinde bulunan her bir depreme ait en büyük pik ivmenin mutlak değerleri.



Şekil 3:

Veri setinde bulunan her bir depreme ait derinlik (sütun grafik) ve magnitüd (çizgisel grafik) değerleri



Şekil 4:

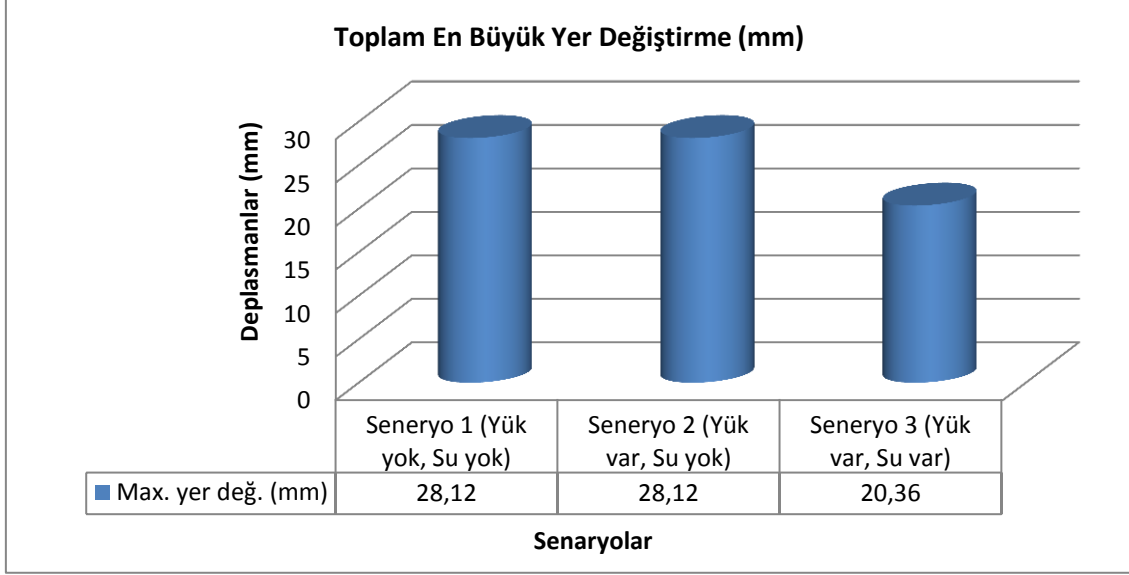
Veri setinde bulunan her bir depreme ait en yakın ve en uzak merkez üssü-istasyon arası mesafe değerleri

3. STABİLİTE ANALİZLERİ VE ANALİZLERDEN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar kullanımının yaygınlaşması ve konu özelinde gelişen yazılımlar sayesinde geoteknik mühendisliğindeki birçok problemin çözümünde bilgisayarların ve dolayısıyla bilgisayar yazılımlarının efektif bir şekilde kullanılmasına yol açmıştır (Huanlong et al. 2022). Bu alanlardan bir tanesini de şev oluşturmaktadır. Şevlerin analizi, dairesel, düzlemsel veya kama tipi potansiyel bir kayma yüzeyi kabulü ile kaydırmaya çalışan ve direnen momentler ya da kuvvetler arasındaki ilişkiyi baz alan bir güvenlik katsayısı hesabına dayanan limit denge yöntemleri ve sonlu eleman analizleri ile yapılmaktadır. Limit denge analizleri İsveç Dilim, Bishop, Janbu, Morgenstern ve Price, Spencer vb. yöntemler ile gerçekleştirilmekte olup bu metotlar arasında bazı farklılıklar olmakla birlikte temelde bilinen veya kabul edilen bir kritik kayma yüzeyinde, kayan kütlelerin dengesi araştırılmaktadır (Duncan ve diğ., 2014). Sonlu elemanlar yöntemi ile şev stabilitesi analizleri ise mukavemet azaltma ve gravite artırma yöntemi olmak üzere temelde iki yöntem ile yapılmaktadır. Mukavemet azaltma yönteminde, kayma mukavemeti parametreleri olan kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Φ) şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar azaltılarak şevde göçme oluncaya kadar analizler devam ettirilir (Zienkiewicz, 2005; Alemdag ve diğ., 2015; Kanik ve Ersoy, 2019) Gravite artırma yönteminde ise yerçekimi ivmesi, şev göçünceye ve denge çözümü ortadan kalkıncaya kadar arttırılmaktadır (Chen ve Mizuno, 1990). Analizler Geoteknik Mühendisliği hesaplamalarında uzun yıllardan beri kullanılmakta olan ve sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan Plaxis (2002) bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Plaxis, geoteknik mühendisliği projelerinde karmaşık problemleri sonlu elemanlar yöntemi ile çözmeye yarayan, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış analizleri yapan çok kapsamlı bir bilgisayar yazılımı mukavemet azaltma yöntemini temel alarak dinamik şev stabilite analizleri gerçekleştirebilmektedir. Yazılım Stabilite analizlerine “phi-c reduction” olarak adlandırılan yöntemi kullanılmakta (mukavemet azaltma metodu) ve kayma mukavemet parametreleri c ve Φ 'yi göçmeye erişilinceye kadar azaltılmaktadır.

Çalışma kapsamında model şev üzerinde mevcut statik yükler altında Şekil 1 de ayrıntısı verilen normal durum, yüklü durum ve yamaçta suyun bulunduğu durumu içeren 3 farklı senaryo

gözetilerek yapılan analizlerden elde edilen en büyük yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Buna göre statik yükler altında oluşacak en büyük yer değiştirme değerleri Senaryo 1 için 28,12 mm, Senaryo 2 için 28,12 mm ve Senaryo 3 için 20,26 mm olarak tespit edilmiştir (Şekil 5). Elde edilen bu veri çalışma kapsamında yapılan dinamik analiz verileri ile karşılaştırılmış ve sismik etki tartılmıştır.



Şekil 5:

Model şev üzerine etkileyen statik yükler altında oluşan yer değiştirmeler

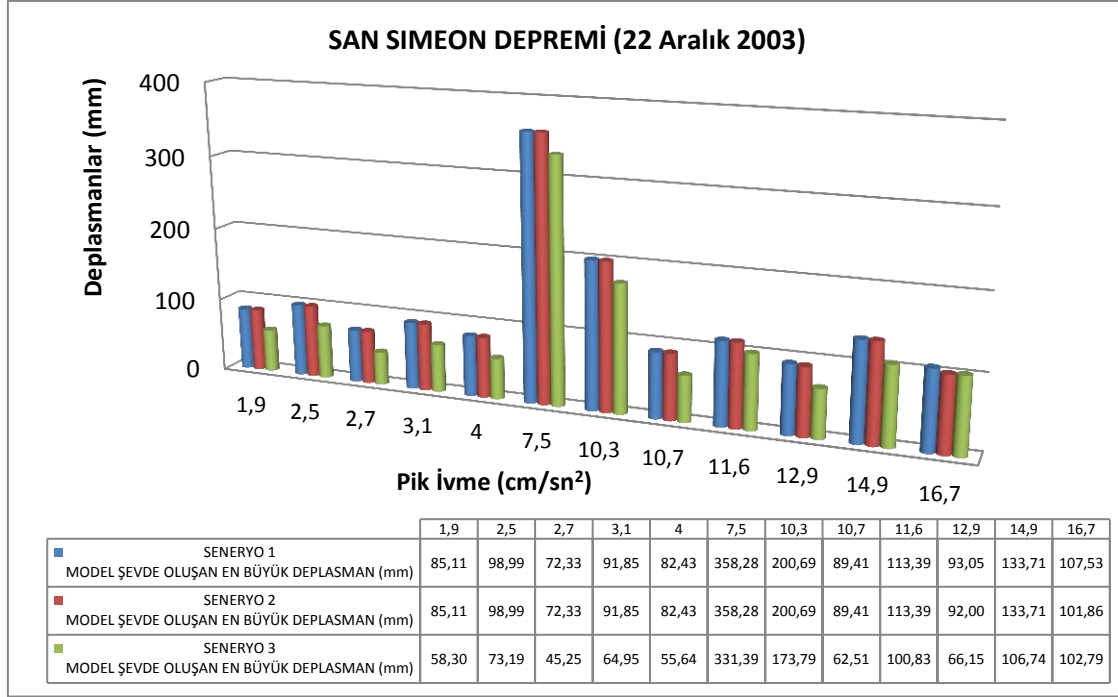
4. DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

Şev problemlerinin doğru analizi, ancak şevin stabilitesini olumlu veya olumsuz yönde etkileyen etkenlerin doğru tespiti ile sağlanabilir. Şev stabilite analizlerinde geoteknik mühendisini, zemin özelliklerini, zemin-yapı etkileşimini, zemine etkileyen kuvvetleri ve diğer etkenleri gerçeğe en yakın şekilde modellemek doğru çözüme ulaştırabilir. Şev stabilitesine yönelik problemler geoteknik mühendislerinin çözümü için gereken başlıca sorunlar arasında yer almakta olup bu sorunun çözüme kavuşturulmasında deprem durumunda mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Çalışma kapsamında depremlerle ilgili analizler yapılan model şevlerin ayrıntısı çalışma kapsamında seçilen 12 depreme dikkate alınarak gerçekleştirilen analizler sonucu hesaplanan en büyük yer değiştirmeleri içeren analiz sonuçları ilerleyen bölümlerde grafiklerle sunulmuştur.

4.1.1. San Simeon Depremi, Kaliforniya, A.B.D.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaleti sınırları içinde 22 Aralık 2003 saat 19.15 sularında meydana gelen bu depremin odak derinliği 7,6 km'dir. Depremin magnitüd büyüklüğü 6,4 olup pik ivme değerleri $1,9 \text{ cm/sn}^2 \sim 16,7 \text{ cm/sn}^2$ aralığındadır. Episantra olan uzaklıkları 134,2 km \sim 314,4 km aralığında değişen 12 adet istasyona ait 41 sn \sim 300 sn aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmelere ait grafik Şekil 6'da sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $72,33 \text{ mm}$ ile $2,7 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile episantra 168,8 km uzaklığında ve ivme kayıt süresi 41 sn olan Anderson Barajı İstasyonu kaydında gözlenmiştir. En büyük yer değiştirme ise $7,5 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen

episantra uzaklığı 285,7 km, ivme kayıt süresi 61 sn olan CSUN Mühendislik Binası İstasyonu'nda 358,28 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6:

San Simeon Depremi ile yapılan analiz sonuçları

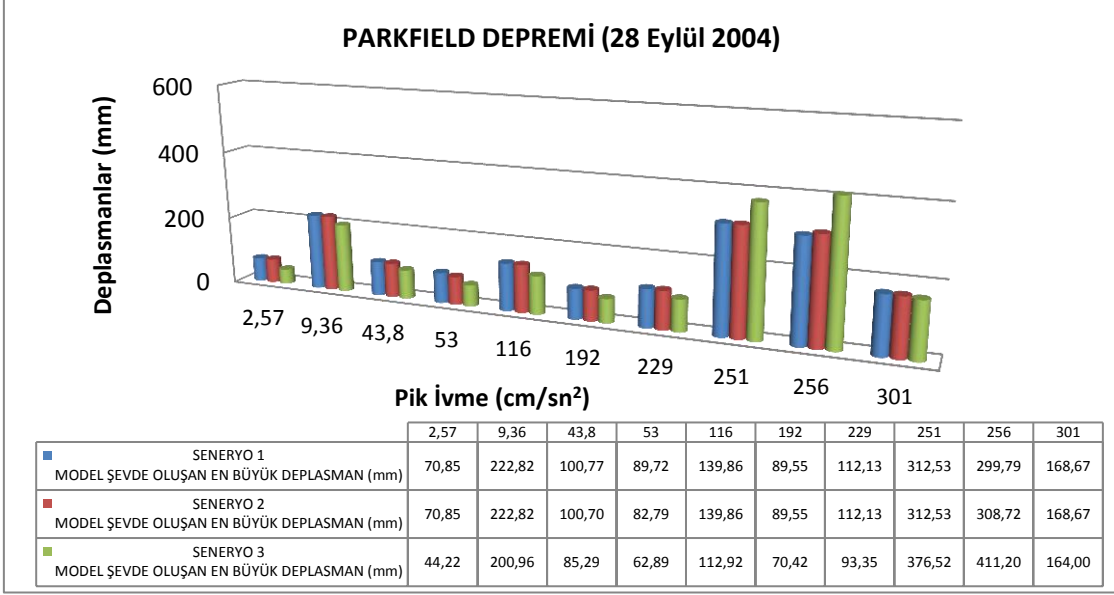
4.1.2. Parkfield Depremi, Kaliforniya, A.B.D.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaleti sınırları içinde, 28 Eylül 2004, saat 17.15'de, 7,9 km derinlikte meydana gelen bu depremin magnitüd değeri 6,0 olarak ölçülmüştür. Parkfield Depremi'ne ait, pik ivme değerleri 2,57 cm/sn² ~ 301 cm/sn² aralığında olup episantra olan uzaklıkları 3,2 km ~ 151 km aralığında değişen 10 istasyonda kayıt tutulmuştur. 41 sn ~ 179 sn zaman aralığında kaydedilen deprem verileri kullanarak gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 7'de gibidir. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 2,57 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen ve episantra uzaklığı 118,3 km, ivme kayıt süresi ise 41 sn olan NSMP Ofisi İstasyonu'nda 44,22 mm, en büyük yer değiştirme ise 411,20 mm ile 256 cm/sn² pik ivme ve episantra uzaklığı 18,8 km, ivme kayıt süresi ise 93 sn olan Vineyard Kanyonu İstasyonu verisi ile elde edilmiştir.

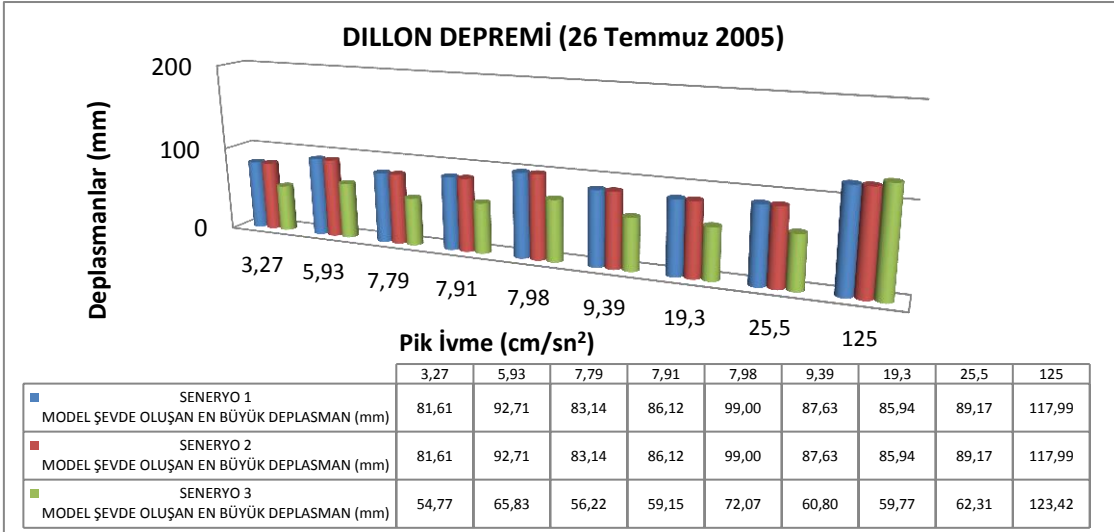
4.1.3. Dillon Depremi, Montana, A.B.D.

26 Temmuz 2005, 04.08 sularında, Amerika Birleşik Devletleri'nin Montana Eyaleti sınırları içinde gerçekleşen bu depremin odak derinliği 5 km'dir. Magnitüd değeri, 5,6 olarak ölçülen Dillon Depremi'ne ait, pik ivme değerleri 3,27 cm/sn² ~ 125 cm/sn² aralığında, episantra olan uzaklıkları 22,2 km ~ 338,1 km aralığında değişen 9 adet istasyon ile ölçülmüş ve kayıt süreleri 41 sn ~ 77 sn zaman aralığında değişmiştir. Bu deprem ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 8'de sunulduğu gibidir. Elde edilen verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 3,27 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 338,1 km, ivme kayıt süresi 41 sn olan İlçe Adalet Merkezi İstasyonu'nda 54,77 mm, en büyük yer değiştirme 125 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra

uzaklığı 22,2 km, ivme kayıt süresi 77 sn olan Montana-Batı Üniversitesi İstasyonu'nda 123,42 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7:
Parkfield Depremi ile yapılan analiz sonuçları

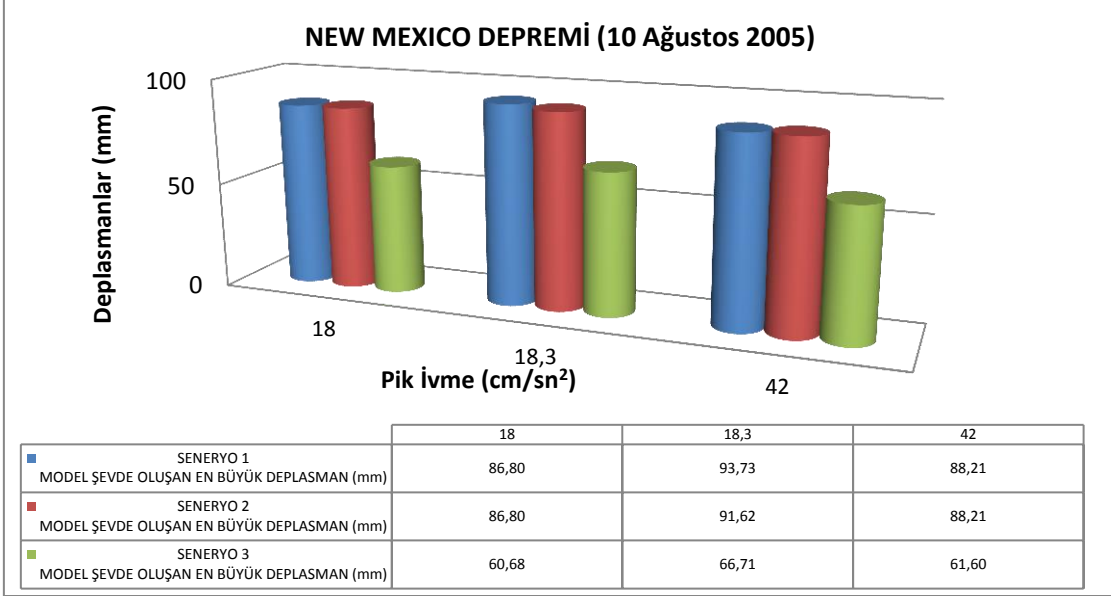


Şekil 8:
Dillon Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.4. New Mexico Depremi, A.B.D.

10 Ağustos 2005, saat 22.05' de Amerika Birleşik Devletleri'nin New Mexico Eyaleti sınırları içinde meydana gelen bu deprem yünden 5 km derinlikte meydana gelmiş olup magnitüd değeri 5 olarak ölçülmüştür. Pik ivme değerleri $18 \text{ cm/sn}^2 \sim 42 \text{ cm/sn}^2$ ie episantra olan uzaklıkları 33 km \sim 33,4 km aralığında değişen 3 adet istasyona ait 47 sn \sim 60 sn kayıt aralığındaki veriler ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 9'da sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 18

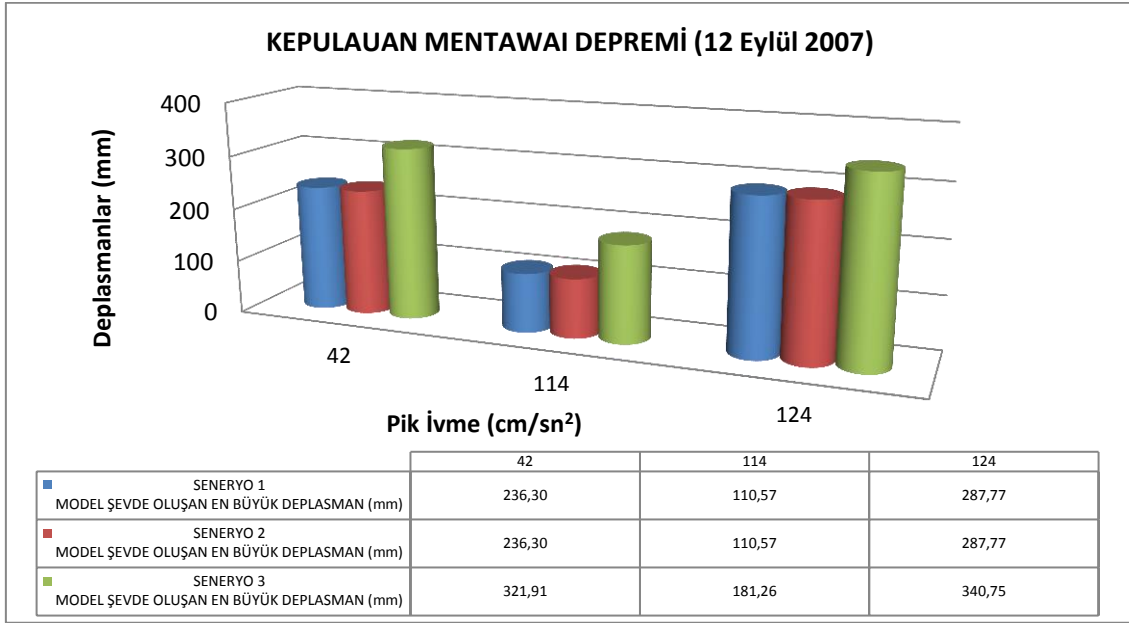
cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 33,4 km, ivme kayıt süresi 47 sn olan Trinidad Barajı Aşağı Akış İstasyonu'nda 60,68 mm, en büyük yer değiştirme 18,3 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 33 km, ivme kayıt süresi 47 sn olan Trinidad Barajı Üst Kule İstasyonu'nda 93,73 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9:
New Mexico Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.5. Kepulauan Mentawai Adaları Depremi, Batı Sumatra, Endonezya

Endonezya Cumhuriyeti'nin Batı Sumatra Vilayeti, Kepulauan Mentawai Takım Adaları'nda 12 Eylül 2007 23.49 sularında, yeryüzünden 30 km derinlikte meydana gelmiş olan ve magnitüd değeri 7,9 olarak ölçülen Kepulauan Mentawai Adaları Depremi'ne ait, pik ivme değerleri 42 cm/sn² ~ 124 cm/sn² aralığında, olan 3 adet istasyona ait 170 sn zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 10'da sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 114 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 164,6 km, ivme kayıt süresi 170 sn olan Sikuai Adası İstasyonu'nda 110,57 mm, en büyük yer değiştirme 124 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 164,6 km, ivme kayıt süresi 170 sn olan Sikuai Adası İstasyonu'nda 340,75 mm olarak hesaplanmıştır.



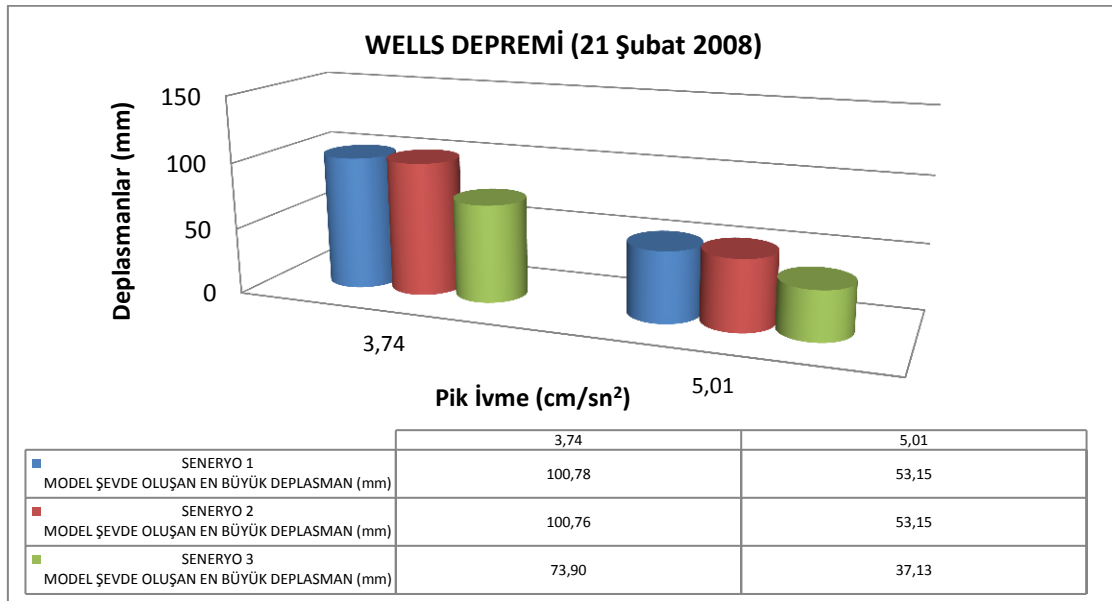
Şekil 10:
Kepulauan Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.6. Wells Depremi, Nevada, A.B.D.

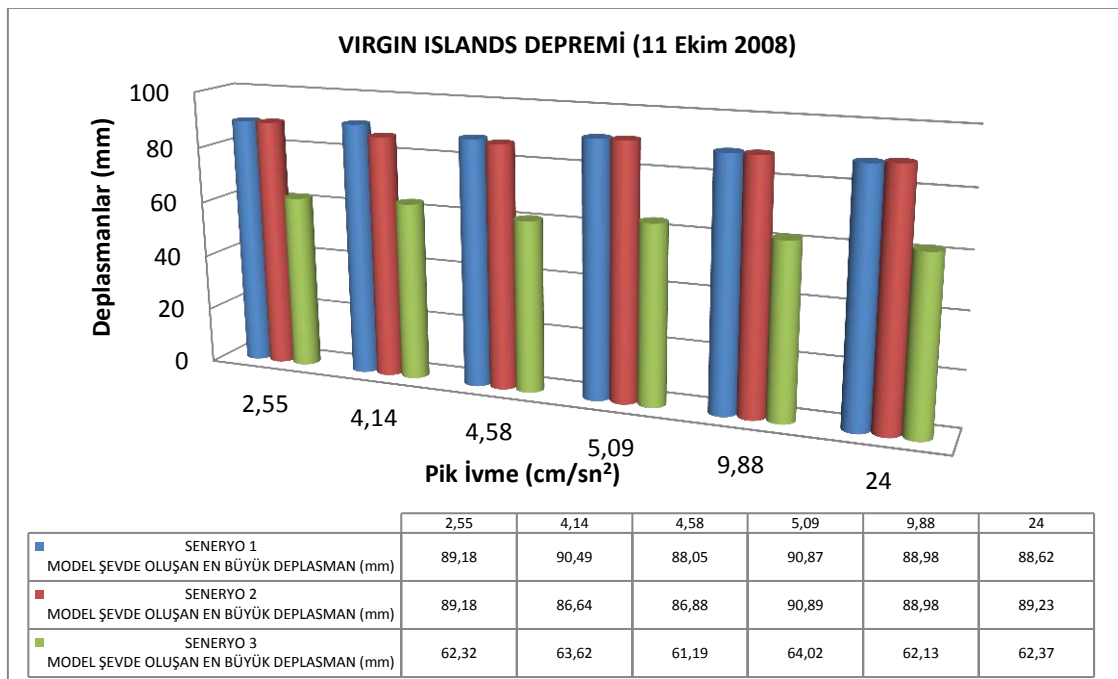
Amerika Birleşik Devletleri'nin Nevada Eyaleti sınırları içinde, 21 Şubat 2008 tarihi, saat 14.16 sularında, yeryüzünden 9 km derinlikte meydana gelmiş olan ve magnitüd değeri 6 olarak ölçülen Wells Depremi'ne ait, pik ivme değerleri $3,74 \text{ cm/sn}^2 \sim 5,01 \text{ cm/sn}^2$ aralığında, episantra olan uzaklıkları $238 \text{ km} \sim 275,6 \text{ km}$ aralığında değişen 2 adet istasyona ait 41 sn zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 11'de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $5,01 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 238 km , ivme kayıt süresi 41 sn olan Uluslararası Hava Alanı İstasyonu'nda $53,15 \text{ mm}$, en büyük yer değiştirme $3,74 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı $275,6 \text{ km}$, ivme kayıt süresi 41 sn olan BLM Saha Ofisi İstasyonu'nda $100,78 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

4.1.7. Virgin Adaları Depremi, Porto Rico, A.B.D.

11 Ekim 2008 tarihi, saat 10.40 sularında Amerika Birleşik Devletleri'nin Porto Rico Bölgesi'nde yeryüzünden 23 km derinlikte meydana gelmiş olan ve magnitüd değeri 5,9 olarak ölçülen Virgin Adaları Depremi'ne ait, pik ivme değerleri $2,55 \text{ cm/sn}^2 \sim 24 \text{ cm/sn}^2$ aralığındadır. Deprem episantra olan uzaklıkları $143,2 \text{ km} \sim 229,4 \text{ km}$ aralığında değişen 6 adet istasyona ait 41 sn $\sim 165 \text{ sn}$ zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 12'de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $4,58 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı $152,3 \text{ km}$, ivme kayıt süresi 89 sn olan Naguabo PR-FS İstasyonu'nda $61,19 \text{ mm}$, en büyük yer değiştirme $5,09 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı $229,4 \text{ km}$, ivme kayıt süresi 41 sn olan UPR Utaudo Bölgesi İstasyonu'nda $90,89 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11:
Wells Depremi ile yapılan analiz sonuçları

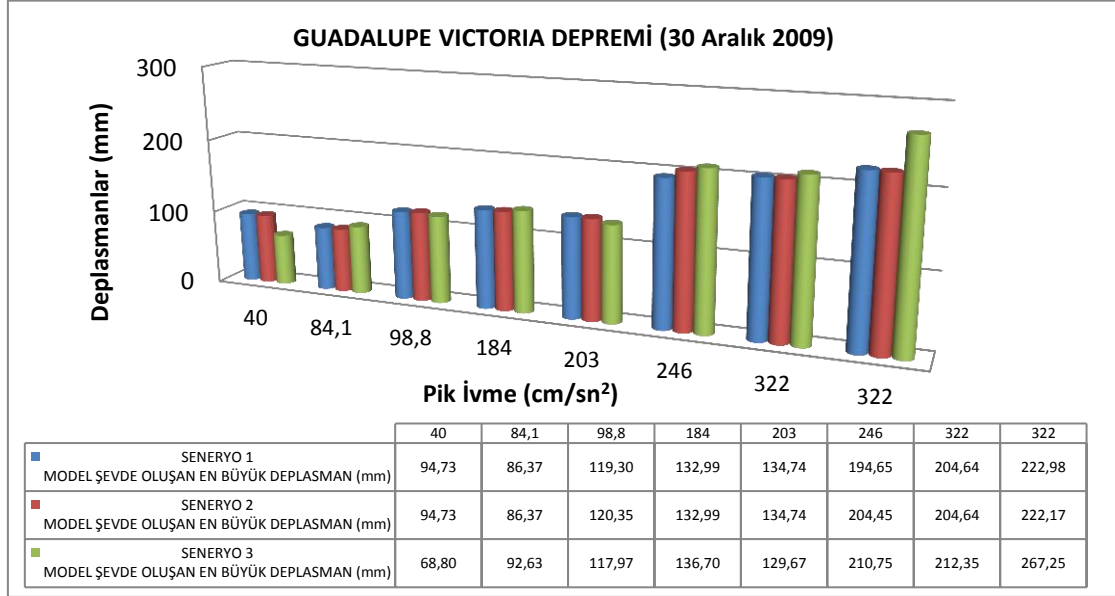


Şekil 12:
Virgin Adaları Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.8. Guadalupe Victoria Depremi, Baja Kaliforniya, Meksika

Yeryüzünden 6 km derinlikte Birleşik Meksika Devletleri'nin Baja Kaliforniya Eyaleti'nde 30 Aralık 2009 saat 10.48 sularında meydana gelen bu depremin magnitüd değeri 5,8 olarak ölçülmüştür. Depremin pik ivme değerleri $40 \text{ cm/sn}^2 \sim 322 \text{ cm/sn}^2$ aralığında, episantra olan uzaklıkları $36,50 \text{ km} \sim 65,9 \text{ km}$ aralığında değişen 8 adet istasyona ait $90 \text{ sn} \sim 163 \text{ sn}$ zaman

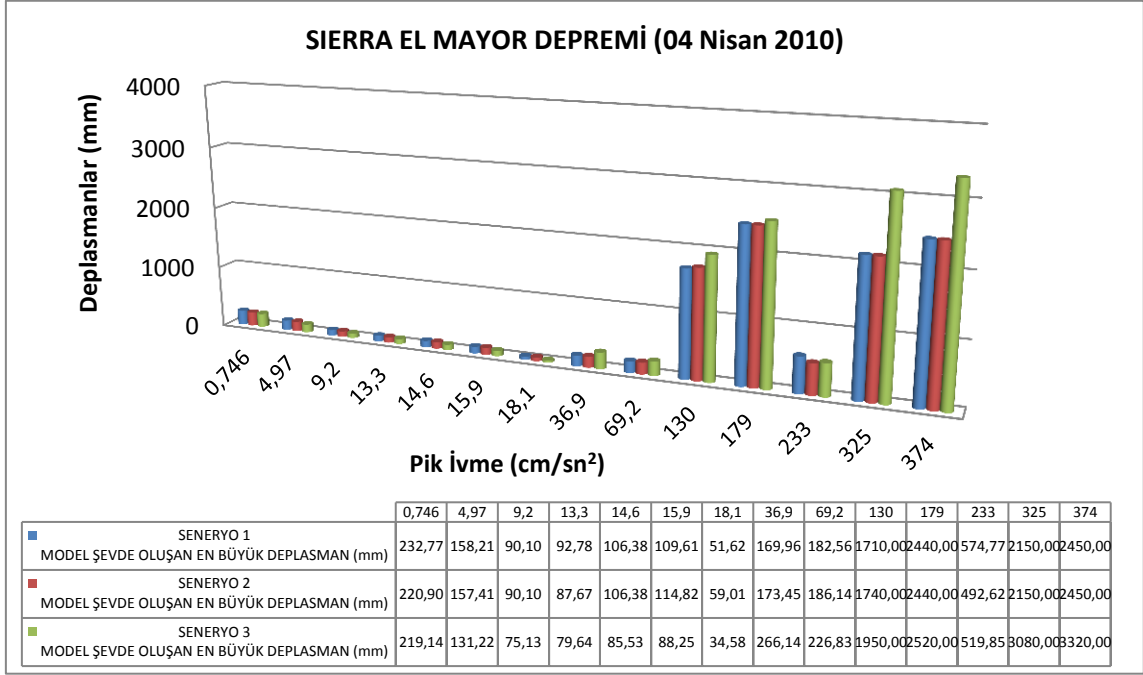
aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 13’de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 40 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 65,9 km, ivme kayıt süresi 140 sn olan Brawley Havaalanı Hangar İstasyonu’nda 68,8 mm, en büyük yer değiştirme 322 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 42,4 km, ivme kayıt süresi 114 sn olan Holtville Postanesi İstasyonu’nda 267,25 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 13:
Guadalupe Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.9. Sierra El Mayor Depremi, Baja Kaliforniya, Meksika

Birleşik Meksika Devletleri’nin Baja Kaliforniya Eyaleti’nde 04 Nisan 2010 tarihi, saat 15.40 sularında, yeryüzünden 4 km derinlikte ve 7,2 magnitüd büyüklüğü ile meydana gelen Sierra El Mayor Depremi’nin pik ivme değerleri 0,746 cm/sn² ~ 374 cm/sn² aralığındadır. Depremın episantra olan uzaklıkları 62,6 km ~ 607,6 km aralığında değişen 14 adet istasyona ait 45 sn ~ 276 sn zaman aralığında kaydedilen verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 14’de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme 18,1 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 241,90 km, ivme kayıt süresi 77 sn olan Cabazon Postanesi İstasyonu’nda 34,58 mm, en büyük yer değiştirme 374 cm/sn² pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 76,5 km, ivme kayıt süresi 276 sn olan El Centro Bölge Hastanesi İstasyonu’nda 3320 mm olarak hesaplanmıştır.



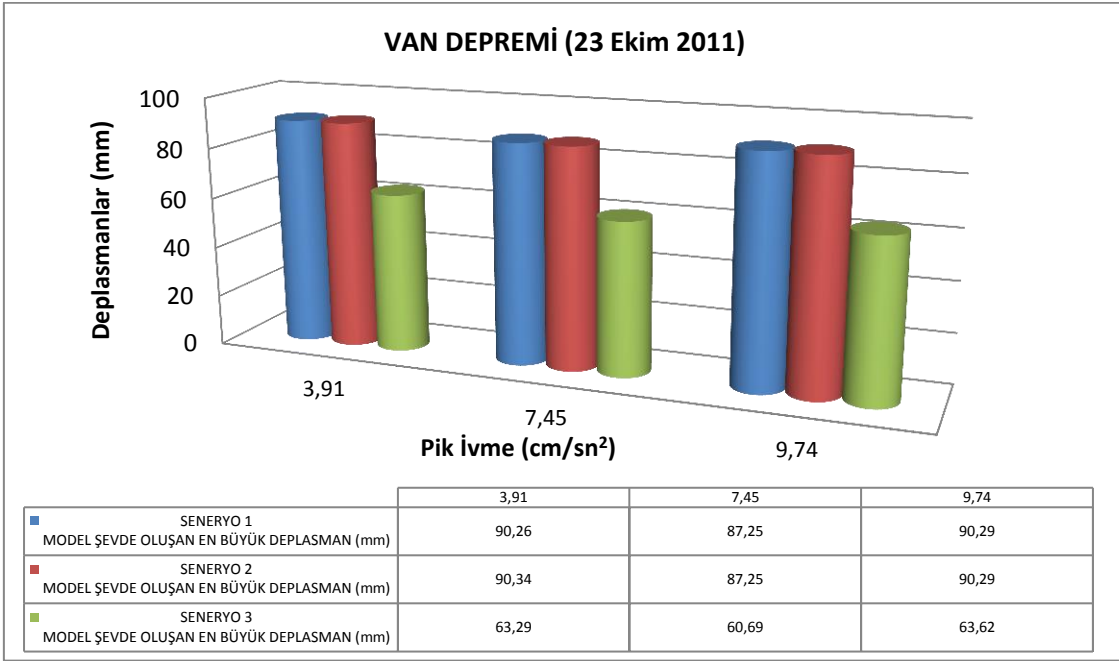
Şekil 14:
Sierra El Mayor Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.10. Van Depremi, Van, Türkiye

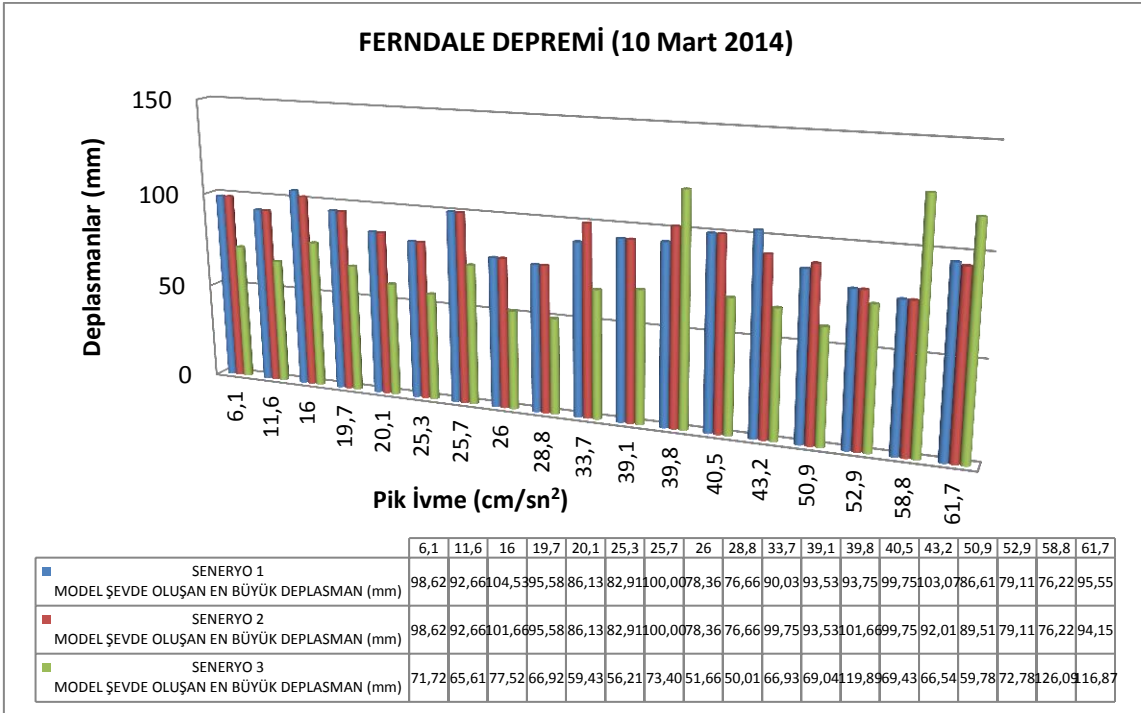
Türkiye Cumhuriyeti'nin Van İli'nde 23 Ekim 2011 saat 10.41 sularında meydana gelen bu deprem yeryüzünden 16 km derinlikte oluşmuştur. Depremın magnitüd değeri 7,2 olarak ölçülen ölçülmüş olup pik ivme değerleri $3,91 \text{ cm/sn}^2 \sim 9,74 \text{ cm/sn}^2$ aralığındadır. Episantra olan uzaklıkları 200,4 km mesafede bulunan 3 adet istasyona ait 158 sn \sim 300 sn zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 15'de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $7,45 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 200,4 km, ivme kayıt süresi 300 sn olan Garni1 İstasyonu'nda 60,69 mm, en büyük yer değiştirme $3,91 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 200,4 km, ivme kayıt süresi 300 sn olan Garni2 İstasyonu'nda 90,34 mm olarak hesaplanmıştır.

4.1.11. Ferndale Depremi, Kaliforniya, A.B.D.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaleti'nde 10 Mart 2014 tarihi, saat 22.18 sularında, yeryüzünden 16,6 km derinlikte meydana gelmiş olan ve magnitüd değeri 6,8 olarak ölçülen Ferndale Depremi'ne ait, pik ivme değerleri $6,1 \text{ cm/sn}^2 \sim 61,7 \text{ cm/sn}^2$ aralığındadır. Episantra olan uzaklıkları 65,5 km \sim 83 km aralığında değişen 18 adet istasyona ait 87 sn \sim 125 sn zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 16'da sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $28,8 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 77,7 km, ivme kayıt süresi 92 sn olan Güney Körfezi Okulu İstasyonu'nda 50,01 mm, en büyük yer değiştirme $58,8 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı 73,2 km, ivme kayıt süresi 125 sn olan Ferndale İtfaiyesi İstasyonu'nda 126,09 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 15:
Van Depremi ile yapılan analiz sonuçları

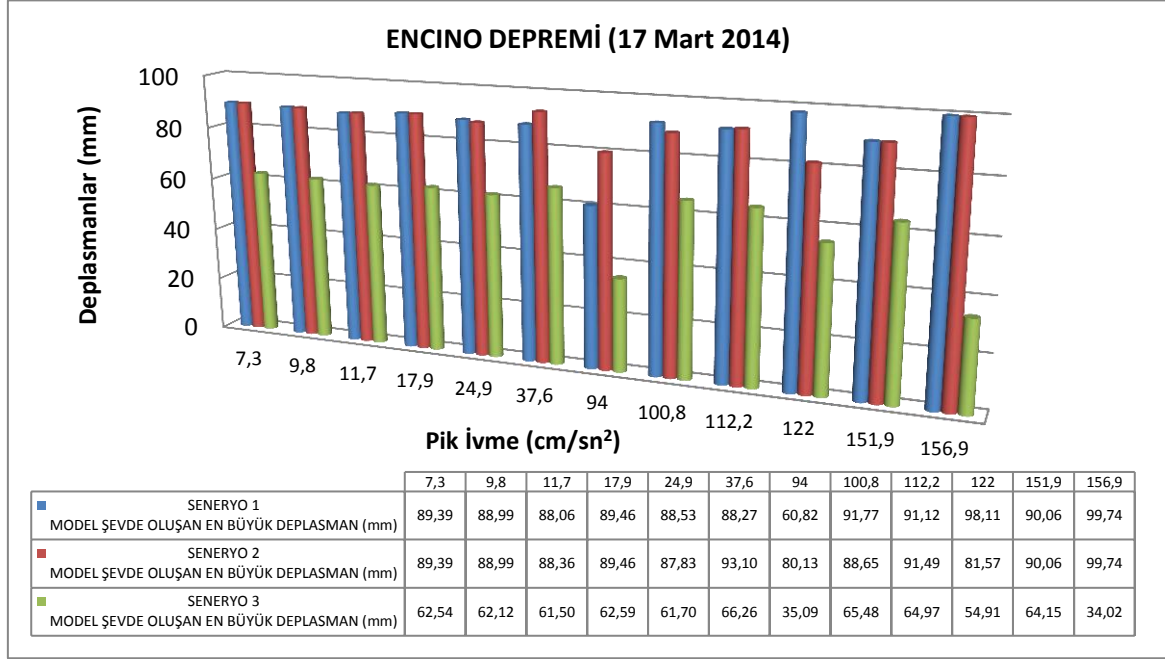


Şekil 16:
Ferndale Depremi ile yapılan analiz sonuçları

4.1.12. Encino Depremi, Kaliforniya, A.B.D.

Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaleti'nde 17 Mart 2014 tarihi, saat 06.25 sularında, yeryüzünden 9,9 km derinlikte meydana gelmiş olan ve magnitüd değeri 4,4 olarak

ölçülen Encino Depremi'ne ait, pik ivme değerleri $7,3 \text{ cm/sn}^2 \sim 156,9 \text{ cm/sn}^2$ aralığındadır. Episantra olan uzaklıkları $0,6 \text{ km} \sim 95,9 \text{ km}$ aralığında değişen 12 adet istasyona ait $45 \text{ sn} \sim 106 \text{ sn}$ zaman aralığında kaydedilen deprem verileri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda her üç senaryo için hesaplanan en büyük yer değiştirmeler Şekil 17'de sunulmuştur. Bu verilerin karşılaştırılması yapıldığında, en küçük yer değiştirme $156,9 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı $6,6 \text{ km}$, ivme kayıt süresi 103 sn olan Van Nuys İstasyonu'nda $34,02 \text{ mm}$, en büyük yer değiştirme $156,9 \text{ cm/sn}^2$ pik ivme ile kaydedilen episantra uzaklığı $6,6 \text{ km}$, ivme kayıt süresi 103 sn olan Van Nuys İstasyonu'nda $99,74 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 17:
Encino Depremi ile yapılan analiz sonuçları.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında yapılan iki boyutlu dinamik analizler sonucu elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Şevlerin stabilitesinin değerlendirilmesi çalışmalarında kabul edilebilir en büyük deplasman değerlerinin $100 \text{ mm} \sim 150 \text{ mm}$ civarında bulunduğu kabul edildiğinde, her üç senaryo için statik yükler altında stabil olan şevin depremleri durumunda stabil olmadığı değerlendirilmiştir. Bu sonuçtan da görüleceği üzere şev stabilitesi analizlerinde stabilite problemlerinin belirlenmesi ve kontrol altına alınması amacıyla yapılacak çalışmalarda depremleri durumu analizlerinin yapılması oldukça önemlidir.
2. Model şevde oluşan deplasman değerlerinin pik ivme değeri ile doğru orantılı olmadığı tespit edilmiştir.
3. Literatürde yer alan a_c/a_{maks} denklemini içeren formüllerin her zaman doğru sonuçları vermeyebileceği görülmüştür.
4. Şevlerin stabilitesini etkileyen sismik yüklerin salt a_{maks} değeri ile ilişkilendirilemeyeceği, a_{maks} değerinin bu sismik yüklerin bir parametresi olduğunu, ancak diğer parametrelerin de stabilitenin yitirilmesinde etken rol oynadığı anlaşılmıştır.

5. Şev yamacında bulunan suyun, şev yüzeyi üzerindeki dengeleyici etkisinden dolayı tüm deprem koşullarında şevde oluşacak deplasmanları azalttığı görülmüştür. Ancak bu durumun ani su çekilmesi ile değişeceği unutulmamalıdır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

İnan Keskin, çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin incelenmesi ve makalenin son onay kısımlarında katkı koymuştur. Fatih Karataş çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin incelenmesi konularında katkı koymuştur. Selman Kahraman ise çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin incelenmesi konularında katkı koymuştur.

KAYNAKLAR

1. Akçakal, Ö. (2009). Şev stabilitesi analizinde geri hesap yöntemi ve bir vaka analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
2. Alemdag, S., Kaya A., Karadag, M, Gurocak, Z., Bulu, F., (2015) Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi District (NE Turkey). J African Earth Sci 106:134–146. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2015.03.010>
3. Atabey. E., (2000) Deprem, Eğitim Ser. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
4. Chen, W.F., Mizuno, E., (1990) Nonlinear analysis in soil mechanics: theory and implementation. Elsevier; Distributor for the U.S. and Canada Elsevier Science Pub., Amsterdam; New York NY U.S.A.
5. Doğan, B., Karakaş, A., (2013) Geometry of co-seismic surface ruptures and tectonic meaning of the 23 October 2011 Mw 7.1 Van earthquake (East Anatolian Region, Turkey). J Struct Geol 46:99–114. <https://doi.org/10.1016/J.JSG.2012.10.001>
6. Duncan, J., Wright, S.G, Brandon, T.L., (2014) Soil Strength and Slope Stability, 2. Wiley
7. Görüm, T., (2016) 23 Ekim 2011 Van Depreminin Tetiklediği Heyelanlar. Türk Coğrafya Dergisi 0:29–36. <https://doi.org/10.17211/tcd.69854>
8. Harp, E.L., Jibson, R.W., (1996) Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. Bull Seismol Soc Am 86:S319–S332. <https://doi.org/10.1785/BSSA08601BS319>
9. Huanlong, H., Gor, M., Moayedi, H., Foong, L.K., (2022) Slope stability analysis using black widow optimization hybridized with artificial neural network. Smart Struct Syst 29:523–533. <https://doi.org/10.12989/SSS.2022.29.4.523>
10. Ishihara. K., (1986) Stability of natural deposits during earthquakes. Collect Pap Dep Civ Eng Tokyo 24:1–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_174

11. Kanik, M., Ersoy, H., (2019) Evaluation of the engineering geological investigation of the Ayvali dam site (NE Turkey). Arab J Geosci 12:. <https://doi.org/10.1007/S12517-019-4243-1>
12. Keefer, D.K., (1984) Landslides caused by earthquakes. GSA Bull 95:406–421.
13. Kramer, S.L., (1996) Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc, New Jersey
14. Newmark, N.M., (1965) Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique 15:139–160. <https://doi.org/10.1680/GEOT.1965.15.2.139>
15. Nova-Roessig, L., Sitar, N., (2006) Centrifuge Model Studies of the Seismic Response of Reinforced Soil Slopes. J Geotech Geoenvironmental Eng 132:388–400. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:3\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:3(388))
16. Olgun, M., Acar, M., (2009) Deprem Kuvvetleri Etkisi Altındaki Şevlerin Stabilizesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. J FacEngArch Selcuk Univ, v 24:
17. Özacar, A., Kaymakçı, N., Akkar, S., Azari, A., Sandıkkaya, A., Kale, Ö., Ay, b.Ö., (2011) 23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van Depremi Sismik ve Yapısal Hasara İlişkin Saha Gözlemleri. RAPOR NO: METU/EERC 2011-04 Ankara
18. Rathje, E.M., Bray, J.D., (2001) One- And two-dimensional seismic analysis of solid-waste landfills. Can Geotech J 38:850–862. <https://doi.org/10.1139/CGJ-38-4-850>
19. Taher, N.R., Gör, M., Aksoy, H.S., Awlla, H.A., (2022) Numerical investigation of the effect of slope angle and height on the stability of a slope composed of sandy soil Kumlu zeminden oluşan bir şevin stabilitesine şev açısı ve yüksekliğinin etkisinin sayısal olarak incelenmesi. 12:664–675. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1051741>
20. URL1 (2021) Internet Data Reports for Earthquakes. In: Cent. Eng. Strong Motion Data. <https://www.strongmotioncenter.org/>
21. Wartman, J., Bray, J.D., Seed, R.B, (2001) Shaking Table Experiment of a Model Slope Subjected to a Pair of Repeated Ground Motions
22. Yılmaz, I., Ekemen, T., Yildirim, M., Keskin, İ., Özdemir, G., (2006) Failure and flow development of a collapse induced complex landslide: The 2005 Kuzulu (Koyulhisar, Turkey) landslide hazard. Environ Geol 49:467–476. <https://doi.org/10.1007/S00254-005-0113-0/FIGURES/17>
23. Zienkiewicz, O.C., (2005) The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Sixth edit. Elsevier Butterworth-Heinemann

