

KENTSEL ALANLAR Ç N BÜTÜNLE K S SM K KAYIP TAHM N YÖNTEM : ERZ NCAN P LOT UYGULAMASI

Ay egül Askan¹, Michael Asten², Murat Altu Erberik³, Cenk Erkmen⁴, Shaghayegh Karimzadeh⁵, Nazan Kılıç⁶, Fatma Nurten İman⁵ and Ahmet Yakut³

¹ Doç. Dr., n aat Mühendisli i Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara

² Prof. Dr., Yer Bilimleri Bölümü, Monash Üniversitesi, Melbourne, Avustralya

³ Prof. Dr., n aat Mühendisli i Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara

⁴ Jeoloji Y. Müh., Deprem Dairesi Ba kanlı ı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Ba kanlı ı, Ankara

⁵ Ara . Gör., n aat Mühendisli i Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara

⁶ Dr. n aat Müh., Deprem Dairesi Ba kanlı ı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Ba kanlı ı, Ankara

Email: aaskan@metu.edu.tr

ÖZET:

Kentsel alanlarda risk azaltma çalı malarının ilk adımı incelenen bölgedeki potansiyel kayıpların belirlenmesidir. Sismik kayıpların saptanması, jeofizik mühendisli inden sigorta sektörüne, deprem mühendisli inden ekonomiye dek birçok farklı alanı ilgilendirmekte ve disiplinlerarası bir yakla ım gerektirmektedir. Bu çalı mada, kentsel alanlarda kayıp tahmini için, sahaya-özel sismik tehlike analizleri, yapı kırılganlıkları ve kayıp modelleri içeren bir yakla ım geli tirilmi tir. Bu çalı manın temel bile enleri çalı ilan bölgeye ait yerel sismik hız modelleri, deterministik ve olasılıksal sismik tehlike analizleri, senaryo deprem simülasyonları, yapı sto u özellikleri ve kayıp fonksiyonlarıdır. Çalı ma alanı olarak Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun do u kesiminde yer alan Erzincan bölgesi seçilmi tir. Üç önemli fay sistemi arasında bir havza yapısı içerisinde yer alan ve 1939 ve 1992 yıllarında yıkıcı depremler ya amı olan bu ehir, dikkate alınması gereken bir sismik tehlike içermektedir. Bu çalı mada 2012-2015 yılları arasında disiplinlerarası bir ekip tarafından yürütülmü olan ulusal bir proje kapsamında elde edilen sonuçlar sunulmu tur. Proje çıktıları, yerel hız modelleri, geçmi ve senaryo deprem simülasyonları, olasılıksal sismik tehlike analizleri, yapı kırılganlıkları ve hasar oranları cinsinden ifade edilmi tir. Bu ve benzeri çalı malarla, ülkemizde tehlikesi yüksek kentsel alanlardaki kayıpların tahmini gerçekçi bir ekilde yapılabilecek; uzun vadede deprem bölgelerinde risk azaltımına ve afet yönetimine katkıda bulunulacaktır.

ANAHTAR KEL MELER: Sismik Tehlike Analizi, Hız Modeli, Yer Hareketi Simülasyonu, Bina Kırılganlık Analizleri, Sismik Kayıplar

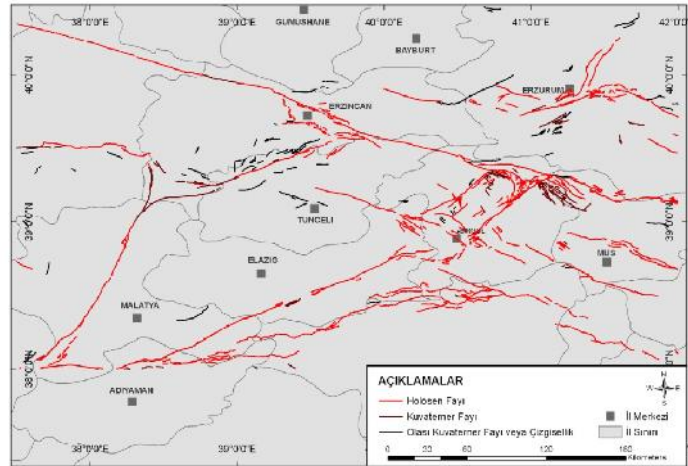
1. G R

Sismik tehlikenin yüksek, nüfusun yo un oldu u bölgelerde, risk azaltma çalı maları büyük önem ta ımaktadır. Günümüzde sismik riskleri azaltma ve yönetme amaçlarıyla kentsel alanlarda sismik kayıp hesapları yapılmaktadır. Sismik kayıp hesaplarındaki temel bile enler: sismik tehlike, yapı kırılganlı ı ve hasar da ılım analizleridir. Herhangi bir bölgede yapılan sismik kayıp analizlerinin do rulu u, bu bile enlerin fiziksel ve do ru olarak modellenmesine ba lıdır.

Bu çalı mada, 2012-2015 yılları arasında disiplinlerarası bir ekip tarafından yürütülmü olan ulusal bir proje kapsamında geli tirilmi olan bütünle ik bir sismik kayıp tahmin yöntemi ve bu yöntemin bir il merkezinde

uygulaması sunulmu tur. Önerilen yöntemin temel özelli i tüm bile enlerin bölgesel ve detaylı olarak modellenmi olmasındır. Bu bile enlerden ilki çalı ılan bölgedeki yerel zemin özelliklerinin belirlenmesidir. Bu amaçla bu çalı manın ilk a amasında seçilen sahalarda mikrotremörler ve pasif yüzey dalgası yöntemleriyle 1-boyutlu hız profilleri çıkarılmı tur. Daha sonra, elde edilen detaylı zemin bilgileri kullanılarak çalı ma alanında olasılıksal ve deterministik tehlike analizleri gerçekleştirilmi tir. Bir sonraki a amada bölgedeki yapı özellikleri göz önünde bulundurularak yapı kırılma modelleri çıkarılmı ; son a amada ise yapı hasar da ılımları hesaplanmı tur. Yöntemi do rulamak için önce gerçek bir depreme ait hasar verisi kullanılmı ; daha sonra çalı ma alanında olası bir büyük deprem için hasar da ılım tahminleri yapılmı tur. Bu bildiride, daha önce sözü edilen bile enlerin esasları ve projede elde edilmi olan temel sonuçlar sunulacaktır. Projede kullanılan veri, yöntem ve çıktılara ait tüm detaylar, proje final raporunda (Askan vd., 2015) bulunabilir.

Çalı ma alanı, çevresinde bulunan faylar ile kompleks bir tektonik yapıya sahip olan ve gerek tarihsel gerekse aletsel dönemde meydana gelen yıkıcı depremler ile bilinen Erzincan bölgesidir. Temelde alüvyon birimlerden olu an yakla ık olarak 50 km x 15 km'lik bir basen üzerinde bulunan Erzincan il merkezi, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Kuzey Do u Anadolu Fay Zonu ve Ovacık fayı kesi iminde yer almaktadır (ekil 1). Tarihsel belgeler Erzincan civarında 18 tane büyük ve yıkıcı depreme i aret ederken (Barka, 1993), Erzincan geçti imiz yüzyılda meydana gelen 1939 ($M_s \sim 8.0$) ve 1992 ($M_w = 6.6$) depremleriyle de büyük can ve mal kaybına u ramı tur. Bu çalı ma kapsamında Erzincan'ın zemin, sismik tehlike ve yapısal kırılma modelleri detaylı olarak çalı ılmı tur.



ekil 1. Erzincan civarındaki aktif faylar (MTA, 2012)

2. ZEMİN MODELLERİ

Günümüzde, yaygın olarak kullanılan sondaj, kırılma ve patlatma yöntemlerinin şehirli bölgelerdeki uygulama zorluğu ve yüksek maliyetleri nedeniyle zeminlerin özelliklerinin belirlenmesinde alternatif yöntemler arayışına gidilmi ve yüzey dalgalarından birisi olan Rayleigh dalgası kullanılarak yerin S-dalgası hız yapısını belirleyen yöntemler geliştirilmi tir. Yüzey dalgası yöntemleri aktif ve pasif kaynaklı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Tüm bu yöntemlerde temel amaç, incelenen alanda dispersiyon bilgilerinden yola çıkarak tek boyutlu S-dalgası hız profilleri elde etmektir.

Pasif kaynaklı yöntemler, doğada bulunan mikrotremörlerden faydalanırlar. Mikrotremörler, yer yüzeyinde doğa olayları ya da insan aktiviteleri sonucu oluşan sürekli ve küçük genlikli titreşimlerdir. İlk kez Aki (1957) mikrotremör ölçüm yöntemini literatüre tanıtmı ; bu titreşimleri kayıt ve analiz etmek suretiyle zemin

tabakalarının hızlarına dair bilgi elde edileceğini göstermiştir. En yaygın mikrotremör yöntemlerinden birisi olarak, dairesel dizilimler kullanılarak Uzaysal Özili ki Yöntemi (SPAC) yaklaşımı ile veri toplama ve veri işleme kuramları geliştirilmiştir (Aki, 1957; Toksöz, 1964; Okada, 2003; Asten, 2006). SPAC yöntemi dünyada çeşitli bölgelerde S-dalga hızı belirlemesi çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Ör.: Okada, 2003; Asten, 2006). SPAC yöntemi temel olarak mikrotremör dalga alanlarının uyumluluklarının bir dizi istasyonda hesabı ile yerin tek boyutlu S-dalga hızı profilini elde etmeye dayanır. Geleneksel olarak SPAC yönteminde dairesel dizimli alıcılarda düey mikrotremör kayıt ve analizleri yapılmıştır. Yakın geçmişteki çalışmalarda ise SPAC yöntemi çoklu-modları ele almak için geliştirilmiştir (MMSPAC); 3-eksenli ölçümler yapılmış ve dairesel olmayan dizilimlerle çalışılmıştır (Asten, 2006). SPAC analizleri mikrotremörlerin uzay ve zaman dura anlı özelliklerini kullanarak alıcı (istasyon) çiftleri arasındaki uyumluluğun değerlendirilmesine dayanır. Belirli bir frekanstaki yüzey dalgası faz hızı, birbirine r mesafede ölçülen titreşim kayıtlarından ve o frekanstaki dalganın bileşenlerinin SPAC (uzaysal özili ki) katsayılarından hesaplanabilir. Rayleigh dalgalarının herhangi bir f frekansındaki SPAC ya da özili ki uyumluluk katsayısı $c(f)$, sıfırıncı dereceden birinci cins Bessel fonksiyonundaki $v(f)$ faz hızı ile ilişkilendirilmiştir (Claprod ve Asten, 2009):

$$c(f) = J_0\left(\frac{2f r}{v(f)}\right) \quad (1)$$

Geleneksel SPAC yönteminde Denklem 1’de verilen SPAC katsayısından her bir frekansa karşılık gelen faz hızı değerleri ile dispersiyon eğrisi elde edilmektedir. Bu dispersiyon eğrisinin ters çözümü ile tek boyutlu S-dalga hızı profilleri hesaplanmaktadır. MMSPAC yaklaşımında ise uyumluluk eğrileri üzerinde yinelemeli-döndürülme yapılarak S-dalga hızı belirlenmekte ve dispersiyon eğrisi de her yinelemede kontrol edilmektedir (Asten, 2006).

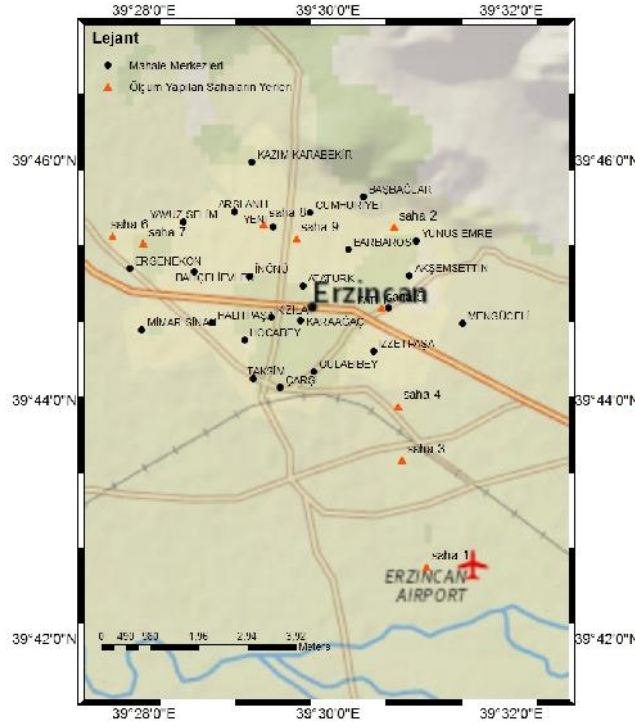
Bu çalışmada kapsamında Erzincan il merkezinde seçilen 9 sahada (ekil 2), MMSPAC yöntemiyle 1-boyutlu hız profilleri elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu projede kullanılacak olan MMSPAC yöntemi, S-dalga hızlarını detaylı olarak çözebilse de, özellikle tabaka arayüzlerini belirlerken ek olarak Yatay/Düey Spektral Oran (HVSr) yöntemi de kullanılmıştır. HVSr yöntemi literatürde yaygın olarak, zemin tabakalarının rezonans frekanslarını zeminlerin elastik özelliklerinin derinlikle değişiminden yaklaşık olarak hesaplamak için kullanılmaktadır (Nakamura, 1989). Bu çalışmada ise MMSPAC yöntemiyle elde edilen hız tabakalarından hesaplanan rezonans frekanslarını ve çok tabakalı zemin modeli varsayımını döndürmek için kullanılmıştır. ekil 3’de, seçilen sahalarda elde edilmiş olan 1-boyutlu hız profilleri sunulmuştur.

3. SİSMİK TEHLİKE ANALİZLERİ

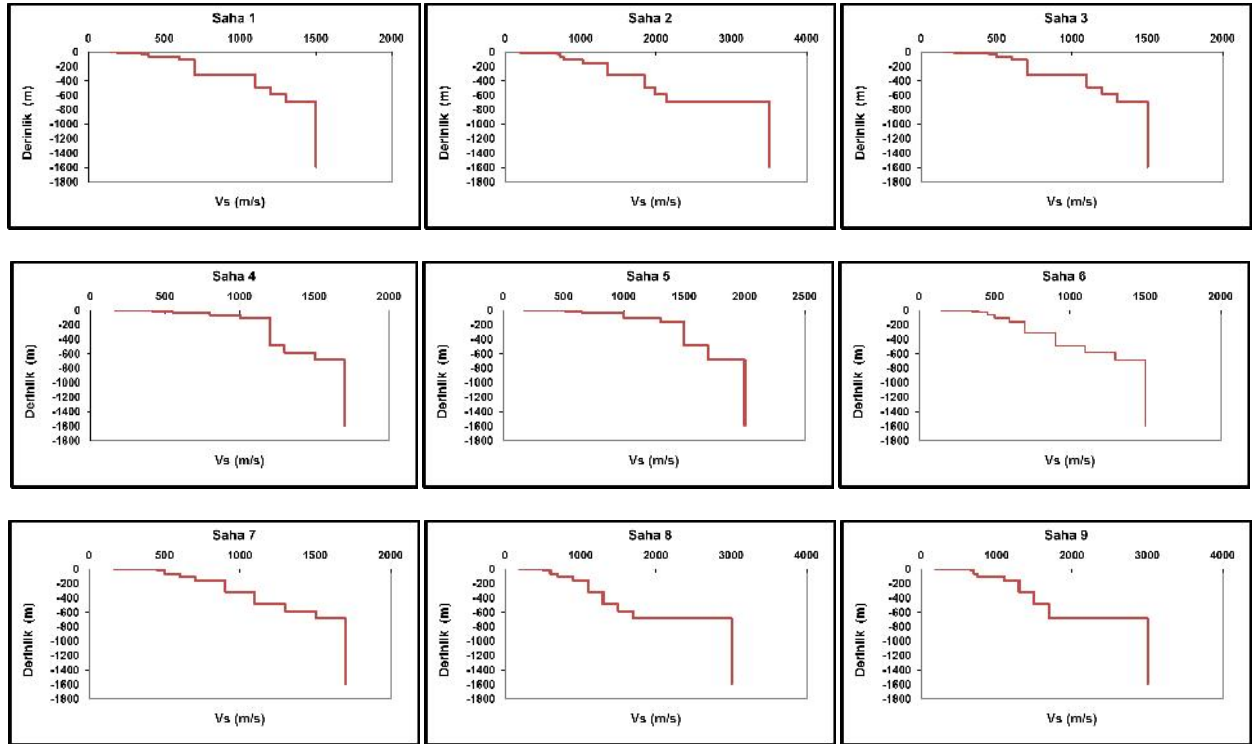
Bu çalışmada, bölgedeki aktif fay bilgileri ve mikrotremör analizlerinden elde edilen zemin koşulları kullanılarak olasılıksal ve deterministik (senaryo) sismik tehlike analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda, ilgili yöntem ve analizler yer kısıtından ötürü kısaca özetlenecektir. Detaylar Askan vd. (2015)’te bulunabilir.

3.1 Olasılıksal Sismik Tehlike Analizleri (OSTA)

OSTA modeli ilk olarak Cornell (1968) tarafından belirli bir sahadaki sismik tehlikeyi bir olasılıksal deprem ile nicilemek için geliştirilmiştir. Bu modelin başlıca amaçları şunlardır: sismik kaynakların ve her bir kaynağın deprem yaratma kapasitelerinin belirlenmesi, yer hareketi tahmin (azalım) için kesinlik seçilmesi ve sismik tehlikenin olasılıksal bir çerçevede hesaplanması. Bu çalışmada kapsamında yapılan olasılıksal sismik tehlike analizlerinde öncelikle yerel katalog ve sismik kaynaklar detaylı olarak çalışılmış; zemin bilgileri bir önceki kısımdan alınmış ve analizlerde bölgeye uygun yer hareketi azalım denklemleri kullanılmıştır.

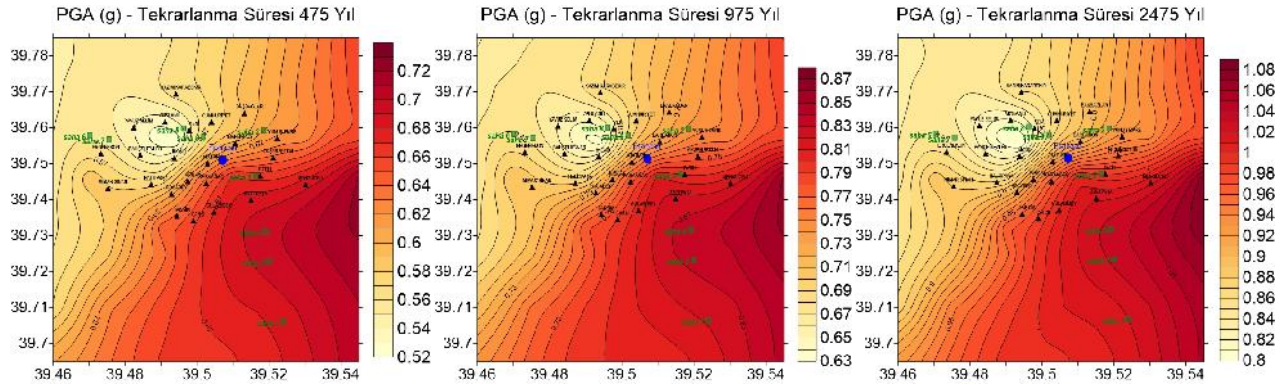


ekil 2. Erzurum il merkezinde zemin ara tırmaları gerçekleştirilen sahaların, şehirdeki yerle im birimlerine göre konumları



ekil 3. Erzurum il merkezinde zemin ara tırmaları gerçekleştirilen sahalardaki 1-boyutlu hız profilleri

MTA (2012) fay haritasından alınan bölgesel kaynaklar, bölgesel katalog bilgileri, azalım ili kileri ve yerel zemin özellikleri ile bu kısımda Erzincan il merkezinde seçilen 123 dü üm noktasında analizler yapılmı ve farklı yer hareketi parametrelerine (maksimum yer ivmesi ve spektral ivmelere) ait olasılıksal da ılım haritaları elde edilmiştir. Bu haritaları olu turmak için yapılan analizlerde, her bir dü üm noktasında o noktaya en yakın sahadan elde edilen zemin özellikleri Vs30 cinsinden kullanılmı tır. ekil 4'te farklı tekerrür süreleri için yapılan analiz sonuçları Maksimum Yer vmesi (MY , PGA) cinsinden sunulmaktadır. Bu haritalardan görüldü ü üzere Erzincan ilinde dikkate de er bir sismik tehlike söz konusudur. Farklı periyotlarda hesaplanan spektral ivme da ılımları da benzer sonuçlar vermektedir.



ekil 4. Erzincan il merkezinde yerel zemin bilgileri kullanılarak 475, 975 ve 2475 yıl tekerrür süreleri için maksimum yer ivmesi (PGA) elde edilen sismik tehlike haritası

3.2 Deterministik Sismik Tehlike Analizleri: Senaryo Deprem Simülasyonları

Önceki kısımda sunulan yer hareketi da ılımları, olasılıksal bir çerçevede hesaplanan bölgesel sismik tehlikeyi ifade etmektedir. Bilindi i üzere, olasılıksal sismik tehlike hesapları, analiz edilen her noktada tüm dalga formunu de il, sadece seçilen bir maksimum yer hareketi de eri için sonuç verir (Örnek: maksimum yer ivmesi ya da spektral ivme). Oysa sismik olarak tehlikesi yüksek bir bölgede yapılması gerekli çalı mardan bir tanesi de potansiyel depremlerde açı a çıkacak yer hareketi kayıtlarının tüm dalga formunu (ivme-zaman kaydını) elde etmektir. Bu amaçla, ço unlukla incelenen bölgeye yakın mesafedeki belirli bir aktif fay üzerinde senaryo depremler modellenerek sonuçlar irdelenir. Bu ve benzeri çalı malar, ehirle mi alanlarda ortaya çıkması muhtemel yer hareketlerini, dolayısıyla da bölgedeki yapıların ömürleri boyunca maruz kalabilecekleri dinamik kuvvetleri belirlemede kullanılabilir. Bu çalı mada, bu amaçla stokastik sonlu-fay yöntemi kullanılmı tır.

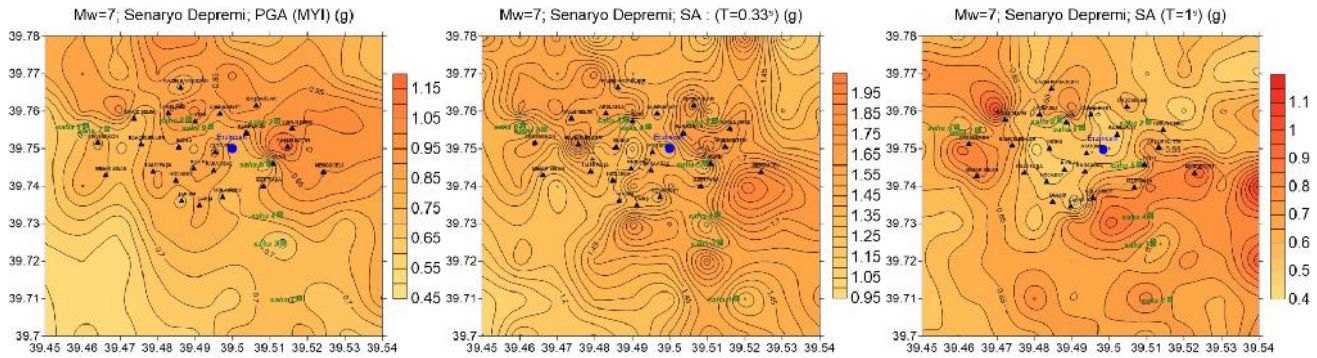
Sonlu-fay modelleri, depremlerde ortaya çıkacak olan yer hareketlerini, kullanıcı tarafından seçilecek yakın-saha noktalarında fayın sonlu boyutlarını göz önüne alarak modellemeyi (simüle etmeyi) hedeflerler. Beresnev ve Atkinson (1997), çalı malarında dikdörtgen bir fayı sonlu sayıda alt-faya bölerek, her bir alt-fayı $^{-2}$ kaynak spektrumlu stokastik nokta-kaynak (Boore, 1983) olarak kabul eden bir modellemeye dayalı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde depremin oda 1 alt-faylardan birisine yerle tirilir ve dalgalar odaktan sabit bir yırtılma hızı ile yayılmaya ba lar. Yırtılma, sırasıyla her bir alt-faya ula tı nda, o alt-faydan dalga yayılımı ba latılır. Bu biçimde ana fayı olu turan bütün alt-fayların katkısı kinematik olarak do ru gecikmelerle üst üste eklenir ve herhangi bir gözlem noktasında a a ıdaki gibi zamana ba lı ivme de erleri elde edilir:

$$A t = \sum_{i=1}^{nl} \sum_{j=1}^{nw} A_{ij} t + \Delta t_{ij} \quad (2)$$

Denklem 2'de, $A t$ bütün faydan elde edilen ivme kaydı; A_{ij} ise dalga alanına ij alt-fayın ivme katkısıdır ve frekans uzayında teorik S-dalga yayılımı çözümünden elde edilmektedir (Motazedian ve Atkinson, 2005). Bu

denklemden n_l ve n_w sırasıyla fayın uzunluğu u ve genişliği l boyunca alt-fay sayılarını ifade etmektedir. Kinematik olarak hesaplanan gecikme payı Δt_{ij} , yırtılma yüzeyinin her bir alt-faya ulaşması için geçen süre ile S-dalgasının gözlem noktasına kadar geçirdiği sürenin toplamına eşittir (Beresnev ve Atkinson, 1997). Bu çalışmada, tarif edilen bu yöntem üzerinde Motazedian ve Atkinson (2005) tarafından geliştirilmiş olan dinamik köşe frekansı kavramı kullanılmıştır.

Öncelikle Erzincan bölgesine ait kaynak, yayılım ve saha bilgilerine ait girdi parametrelerini doğrulamak amacıyla 13 Mart 1992 Erzincan depremi ($M_w=6.6$) simüle edilmiştir. Stasyonlardaki kayıtlar ve sentetik kayıtlar karşılaştırılarak doğrulanan bilgiler ile bölgede senaryo depremler altında oluşabilecek yer hareketleri ve deşimlilikleri elde edilmiştir. Bu amaçla, Erzincan 1992 depremini oluşturulan fayda senaryo depremler oluşturulmuştur. Erzincan il merkezi için kritik mesafede ve sismik aktivite açısından belirgin olan bu fay üzerinde Erzincan 1992 depremi merkezi sabit tutularak farklı deprem büyüklükleri ($M_w=5.5$, $M_w=6.0$, $M_w=7.0$ ve $M_w=7.5$) için simülasyonlar yapılmış ve yine bir önceki kısımda söz edildiği üzere il merkezinde bulunan 123 düğüm noktasında yer ivmesi cinsinden tüm dalga formları elde edilmiştir. Benzer biçimde bu dalga formlarından bir yer hareketi veritabanı oluşturulmuştur. Yer kısıtından ötürü, incelenen her bir deprem büyüklüğü için 123 tane ivme-zaman grafiği sunmak yerine, ekil 5'te $M_w=7.0$ senaryo depremi için seçilen yer hareketi parametrelerinin deşimlilik haritaları sunulmuştur.



ekil 5. Simülasyon sonuçlarına göre $M_w=7.0$ senaryo depremi sırasında Erzincan il merkezinde oluşması muhtemel MY ve spektral ivme (SA: $T=0.33$ san ve $T=1$ san.) deşimlilikleri

ekil 5'te Erzincan il merkezindeki bazı bölgelerin, (temel olarak kuzeyde fay hattına çok yakın olduğu için) $M_w=7.0$ ve üzeri olası depremlerde çok yüksek seviyelerde (PGA ve $SA > 1g$) yer hareketlerine maruz kalabileceği gözlemlenmiştir. Büyük yer hareketleri çoğunlukla kaynaktan kısa mesafe ve yumuşak zemin tabakaları ile açıklanmaktadır: Erzincan il merkezinde güneye doğru yüzeyde daha yumuşak zemin tabakaları yer aldığı için yer hareketleri büyümekte iken; kuzey mahallelerde ise faya yakın mesafede buldukları için büyük yer hareketleri oluşmaktadır. Bu gözlemler ve bölgedeki binalardaki mevcut yapısal kusurlar, büyüklüğü $M_w=6.6$ olan 1992 depreminde Erzincan'da gözlemlenmiş olan yoğun hasarı da açıklamaktadır.

4. YAPISAL KIRILGANLIK MODELLER

Çalışmanın bu aşamasındaki nihai amaç, mahalle bazında deşimlilikleri elde edilecek farklı tipteki bina yapılarının (etkimesi muhtemel yer hareketleri altında) hasar olasılıklarını hesaplamaktır. Bu amaçla, öncelikle Erzincan'daki yapı stoğunun özellikleri ile ilgili bilgi toplanması ve bu bilginin bina sınıflandırmasında kullanılması için bir saha çalışması yapılmıştır. Daha sonra yapısal verilere ve belirlenmiş olan bina alt-sınıflarına dayanarak betonarme ve çelik binaların analitik modelleri bölgesel inşaat tekniklerini ve yapı özelliklerini göz önüne alacak şekilde oluşturulmuştur. Son olarak ise Erzincan'daki betonarme ve çelik binaların

binalar, Bölüm 3.2’de sunulan senaryo depremlerde elde edilen sentetik yer hareketleri kullanılarak analiz edilmiş ve bu analizler sonucunda her bir yapı sınıfı için hasar potansiyeli değerleri oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, yapı tipi, sismik performans ve kat sayısına göre toplam 21 tane bina alt-sınıfı oluşturulmuştur. Her sınıfa ait bir deprem tek-dereceli-sistem modeli oluşturulmuş ve bina alt-sınıflarının davranış özelliklerini en iyi şekilde yansıtmak amacıyla OPENSEES analiz platformu kapsamında yer alan çok parametrelili bir sistem modeli seçilmiştir. Yapısal parametrelerden periyot (T), taban kesme kuvveti katsayısı ($\eta = F_y/W$, W: etkin ağırlık) ve süneklik kapasitesi (μ), bina türü yapıların deprem sırasındaki performansını en çok etkileyen parametrelerdir. Bu nedenle, hasargörebilirlik değerlerinin çıkarılması amacıyla bu parametreler rassal deprem kenarları olarak alınmıştır. Bu çalışmada, her bir rassal deprem için Latin Hiperküp Örnekleme metodu kullanılarak 20 adet örneklem üretilmiştir. Bu örneklem büyüklüğü ünlü hasargörebilirlik çalışmalarında yapı sistemlerindeki depremli depremleri yansıtmak için yeterli olduğu daha önceki çalışmalarda gösterilmiştir (Erberik 2008). Bir sonraki amaçta bu örneklem, yapı simülasyonlarının oluşturulması ve depremli seviyelerdeki yer hareketleri altında analiz edilmesi için kullanılmıştır. Ekil 6’da sol üst köşedeki grafikte görüldüğü üzere yapı simülasyonları depremli yer hareketi seviyeleri için seçilen tepki parametresi cinsinden düzenli olarak bir dağılım göstermektedir. Ekildeki grafikte seçilmiş olan tepki parametresi maksimum kat ötelemesi (MKÖ) olup yer hareketi parametresi ise maksimum yer hızıdır (MYH). Bu çalışmada yer hareketleri bir önceki kısımda sunulmuş olan simülasyon sonucu elde edilmiş bölgesel sentetik kayıtlardır. Doğal olarak yer hareketi parametresi arttıkça tepki değerleri de artı göstermektedir. Grafikte yer alan yatay çizgiler, belli tanımlara ve kabullere göre daha önceden belirlenmiş hasar sınırlarına (HS) ait çizgilerdir. Ekildeki her dikey (sabit MYH değerine sahip) veri grubunun istatistiksel olarak normal veya lognormal dağılım gösterdiği kabul edilirse bu gruba ait bir ortalama ve standart sapma değeri hesaplamak mümkün olabilir. Böylece ekil üzerindeki her dikey veri grubu iki basit istatistiksel tanım parametresi ile temsil edilebilir. Bu istatistiksel veriler, hasargörebilirlik değerlerinin oluşturulması için olasılıklarının hesaplanmasında kullanılır. Olağan olasılık, herhangi bir MYH seviyesi için bir hasar sınırının olasılığını ifade etmektedir. Sembolik olarak:

$$AO_{i,j} = P(MKÖ \geq HS_i | MYH_j) \quad (3)$$

Ekilde ifade edilebilir. Yukarıdaki ifadede $AO_{i,j}$, j seviyesindeki maksimum yer hızı altında i’inci hasar sınırının (maksimum kat ötelemesi cinsinden) olasılığını, HS_i i’inci hasar sınırını ve MYH_j ise j’inci maksimum yer hareketi seviyesini temsil eder. Olağan olasılığın görsel olarak ifadesi ekil 6’da sağ üst köşede yer almaktadır. Tüm MYH seviyeleri için olasılıkları hesaplandığı zaman, AO – MYH koordinat sisteminde monotonik olarak artan noktalardan oluşan bir grafik elde edilir (bakınız ekil 6, sağ alt köşede). Bu hasar potansiyeli değerlerinin ham hali olup genelde matematiksel olarak daha iyi ifade edilmesi amacıyla noktalara uygun bir eğri uydurulmaktadır (bakınız ekil 6, sol alt köşede).

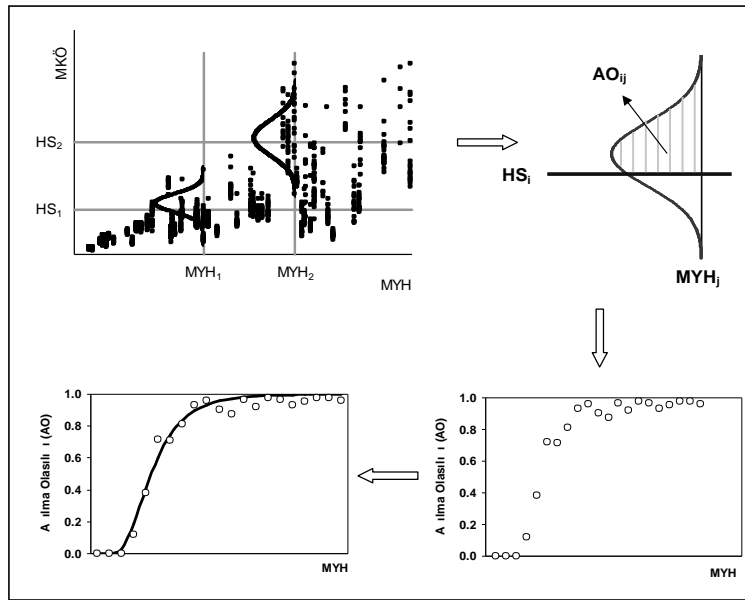
Burada, yer kısıtından ötürü tüm yapı sınıfları için çıkarılmış olan hasar potansiyeli değerleri tek tek sunulamayacaktır. Yapısal modelleme detayları, proje kapsamında geliştirilmiş alternatif sayısal yöntemler ile uygulanan yapı analizleri ve hasar potansiyeli değerleri Karımezade vd. (2015) çalışmasında bulunabilir.

5. HASAR TAHMİN MODELİ

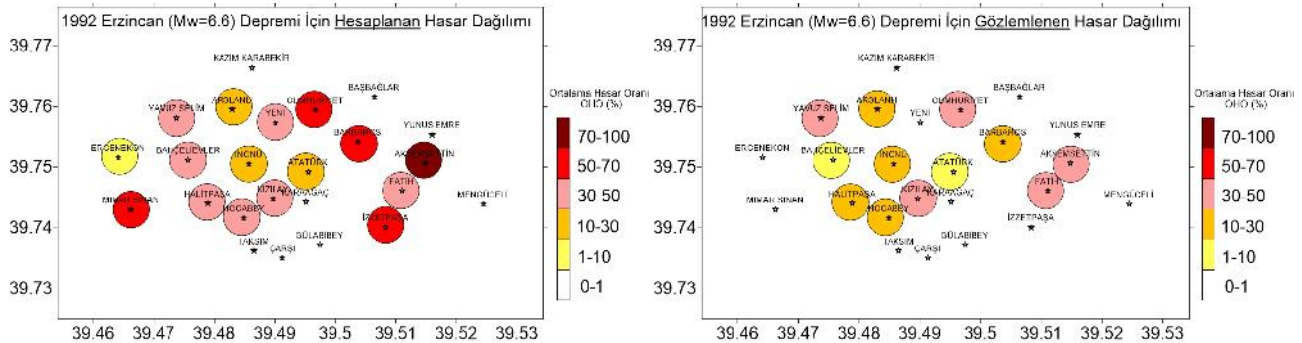
Bu çalışmada tanımlanmış olan hasar tahmin algoritmasının temel amaçları şu biçimdedir: 1. Çalışılacak senaryo depremin belirlenmesi, 2. Sentetik yer hareketi veritabanından seçilen depreme ait yer hareketi parametrelerinin yerleşim merkezlerindeki dağılımının elde edilmesi, 3. Yerleşim yerlerindeki yapı sınıflarının ve yüzdelilerinin belirlenmesi, 4. İlgili yapı sınıflarına ait kırılma eğilimleri ve ortalama hasar oranlarının elde edilmesi, 5. Her bir yerleşim yeri için o merkezdeki yapı sınıfı yüzdeleri ile tek bir

ortalama hasar oranı belirlenmesi. Bu çalı madaki Ortalama Hasar Oranları (OHO), sürekli kırılgnlık e rilerinden elde edilen ayrı ık hasar olasılıkları üzerinden hesaplanmı tır (Askan ve Yücemen, 2010).

Bu kısımdaki amaç, önceki a amalarda elde edilen zemin, yer hareketi ve yapı modellerine dayanarak Erzincan ilinde olası büyük bir deprem için hasar tahmin çalı maları yapmaktır. Bu amaçla, ilk olarak Bölüm 3.2’de elde edilen yer hareketleriyle olu turulan veri tabanından Erzincan il merkezi için kritik bir senaryo deprem ($M_w=7.0$) seçilmi tir. İlk adım olarak, 4. Bölüm’de elde edilmi olan kırılgnlık e rilerini ve hasar belirleme yakla mını do rulamak için 1992 Erzincan depremi için hasar belirlemesi yapılmı ve gözlemlenen hasar da ılımı ile kar ıla tırılmı tır (ekil 7). Daha sonra, seçilen senaryo deprem altında Erzincan il merkezinde konut tipi yapılarda beklenen olası hasarların da ılımı elde edilmi tir (ekil 8).



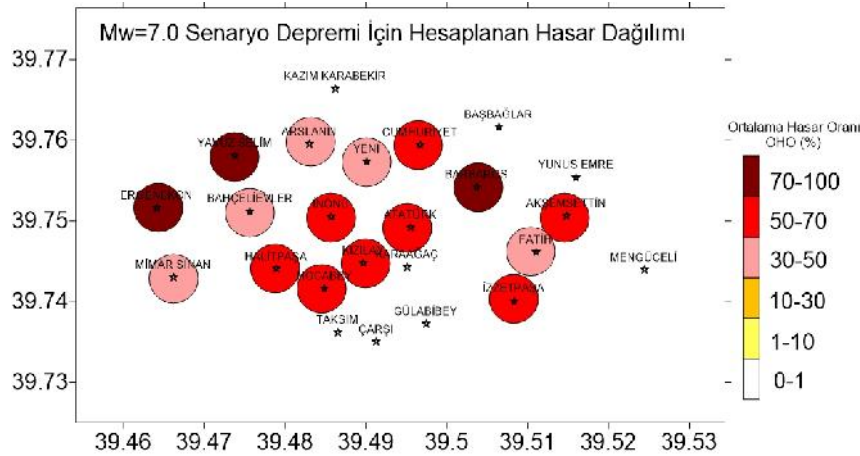
ekil 6. Hasargörebilirlik e rilerinin olu turulması ile ilgili yönteminin tematik olarak gösterilmesi



ekil 7. Erzincan 1992 Depremi için il merkezindeki yerle im merkezlerinde bu çalı mada sunulan yöntemlerle hesaplanan hasar da ılımı ile gözlemlenen hasar da ılımı

ekil 7’de görüldü ü üzere, gözlemsel hasar oranı bulunan yerle im yerlerinin yakla ık %50’sinde OHO de erleri do ru hesaplanmı tır. Di er yerle im yerlerinde ise gözlemlenen OHO diliminden bir sonraki OHO

dilimine karşılık gelen deşerler hesaplanmıştır. Çoklukla da 1992 depremini oluşturan fayaya yakın olan yerleşim yerlerinde, gözlemlenenlerden daha büyük OHO deşerleri hesaplanmıştır. Bu farkların sebebi sahada gözlemler sırasında yapı hasar oranları belirleme sürecindeki subjektiflikten kaynaklanan belirsizlikler yahut hesaplamalarda kullanılan model parametrelerine ait varsayımlardır (Örn.: Yer hareketi simülasyon parametreleri, seçilen yapı performans sınıfları gibi). Ancak sonuç olarak, hesaplanan hasarın gözlemlenen hasardan çok farklı olmadığı ve sunulan yöntemin $M_w=7.0$ senaryo depremi hasar dağılımını elde etmek için kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Ekil 8, seçilen senaryo deprem altında olası hasar dağılımını göstermektedir.



Ekil 8. $M_w=7.0$ senaryo depremi için Erzincan il merkezindeki yerleşim yerlerinde bu çalışmada sunulan yöntemlerle hesaplanan hasar dağılımı

Ekil 8'e göre, 3 yerleşim merkezinde ağır hasar veya yıkıma karşılık gelen hasar oranları (70-100%) elde edilirken, 8 yerleşim merkezinde orta-ağır hasara karşılık gelen hasar oranları (50-70%) hesaplanmıştır. Diğer yerleşim merkezlerinde ise %30-50 oranlarında hasar bulunmuştur. Özetle, $M_w=7.0$ senaryo depremi, il merkezinde oldukça belirgin bir orta-ağır yapısal hasar dağılımını açığa çıkarmıştır. Bu sonuçlar yorumlanırken dikkate alınması gereken bir takım noktalar vardır, bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Senaryo deprem tasarlanırken deprem dairesi merkezi, Erzincan il merkezine mesafe ve konum olarak en kritik hasarı oluşturacak biçimde seçilmiştir.
- Yerleşim merkezlerindeki yapı hasar görülebilirlikleri, kırılma eğrileri ile ifade edilmiştir. Bu eğriler hazırlanırken kullanılan sayısal analizlere ve yapısal modellere ait belirsizlikler ile yerleşim merkezlerinde halihazırda varolan yapıların farklı yapı performans sınıflarına atanması sırasındaki hatalar göz önünde bulundurulmalıdır.

Diğer taraftan, tüm model hataları (veri ve parametre seçimine ait standart sapmalar) dikkat alındığında dahi Erzincan il merkezinde sismik tehlike, risk ve yapısal güvenlik ile ilgili ciddi sorunlar bulunduğu ve büyük bir deprem daha olmadan bölgede çözüm arayışına gidilmesi gerektiği çok açık bir biçimde ortaya çıkmıştır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada elde edilmiş olan yer hareketi dağılım haritalarından ve yapısal hasar dağılımlarından görülebileceği üzere, Erzincan il merkezinde, çevredeki aktif faylara olan yakın mesafeden ve zemin koşullarından ötürü ciddi bir sismik tehlike; yapısal kusurlardan ötürü de sismik risk mevcuttur. Ülkemizde deprem risk çalışmaları birçoğu doğu olarak Batı'ya, sanayi ve nüfusun daha yoğun olduğu bölgelere odaklanmıştır. Ancak, Erzincan'ın gevrek zeminlerden oluşan bir basende yer aldığı, çevresindeki faylara (Kuzey

Anadolu, KuzeyDo u Anadolu ve Ovacık fayları) çok yakın bir mesafede oldu u ve dünyada çok nadir görülen üçlü-fay sistemi kesi im bölgesi (Kuzey Anadolu, KuzeyDo u Anadolu ve Do u Anadolu Fayları) olan Karlıova'ya yakınlı ı dü ünüldü ünde, il merkezindeki yapıların sismik güvenlikleri olası bir büyük depremde önce acilen ve detaylı bir biçimde incelenmelidir.

Literatürde bulunan sismik hasar belirleme çalı malarının birço unda bir ya da birkaç bile en (zemin, yer hareketi, ya da yapısal özellikler) detaylı analizler olmadan, ço unlukla varsayımlarla ya da ba ka bölgelerden alınan model parametreleri ile kurulmaktadır. Öte yandan, bu çalı ma kapsamında bir ehir bazında deprem kayna ından ba layıp, zemin ve dalga yayılım özellikleri göz önüne alınarak yapısal hasara dek uzanan geni spektrumlu, mühendislik sismolojisi ve deprem mühendisli i temel ilkelerine dayanan disiplinlerarası bir hasar belirleme algoritması sunulmu tur. Bu çalı mada geli tirilmi olan algoritma ülkemizde ya da dünyada ba ka bölgeler/iller için de kullanılabilir. Uzun vadede, bu ve benzeri çalı malarda elde edilen sonuçların prati e dönü ebilmesi amacıyla, akademi-yerel yönetim i birli i kurulması ve deprem öncesi zarar azaltma planları ile acil durum planları üzerinde birlikte çalı ılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute of Tokyo University* **35**, 415–456.
- Askan, A. ve Yucemen, M.S. (2010). Probabilistic methods for the estimation of potential seismic damage: Application to reinforced concrete buildings in Turkey. *Structural Safety* **32:4**, 262-271.
- Askan, A., Asten, M., Erberik, M.A., Erkmen, C., Karimzadeh, S., Kılıç, N., i man, F.N. ve Yakut, A. (2015). Erzincan'da Olası Deprem Hasarlarının Belirlenmesi, *TUJJB-UDP-01-12 Projesi Final Raporu*, Ankara.
- Asten, M. (2006). On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics* **71**, V153– V162.
- Barka, A. (1993). Erzincan baseni çevresinin tektoni i ve 13 mart 1992 depremi. 2. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, TMMOB Inaat Müh. Odası, Deprem Müh. Türkiye Mili Komitesi, TÜ Yapı ve Deprem Uyg. Ar. Mrk., 259-270.
- Beresnev I. ve Atkinson, G.M. (1997). Modeling finite-fault radiation from the w^n spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America* **87**, 67–84.
- Boore, D.M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of Seismological Society of America* **73**, 1865–1894.
- Claprod, M. ve Asten, M. (2009). Initial results from spatially averaged coherency, frequency-wavenumber, and horizontal to vertical spectrum ratio microtremor survey methods for site hazard study at Launceston. *Exploration Geophysics* **40**, 132–142.
- Cornell C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* **58:5**, 1583-1606.
- Erberik, M.A. (2008). Fragility-based assessment of typical mid-rise and low-rise RC buildings in Turkey. *Engineering Structures* **30**, 1360-1374.
- Karimzadeh, S., Askan, A., Erberik, M.A., and Yakut, A. (2015). Seismic damage assessment using synthetic ground motions: a case study for Erzincan, 3. TDMSK, Bildiri No. 014, 14-16 Ekim 2015, zmir.
- Motazedian, D. ve Atkinson G.M. (2005). Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of Seismological Society of America* **95**, 995–1010.
- MTA Güncellenmi Diri Fay Haritaları (2012) http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=yeni_diri_fay_haritalari
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report of the Railway Technology Research Institute, Japan* **30**, 25–30.
- Okada, H. (2003). The Microtremor Survey Method. *Geophysical Monograph Series* **12**, SEG, Tulsa.
- Toksöz, M.N. (1964). Microseisms and an attempted application to exploration. *Geophysics* **29:2**, 154-177.