

SAHA DENEYLERİ VE SAYISAL ANALİZLERLE GEOTEKNİK DEPREM MÜHENDİSLİĞİNİN GELİŞİMİNE KATKILAR

CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING WITH IN-SITU TESTING AND NUMERICAL ANALYSES

Recep İYİSAN¹

ÖZET

Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde yer alan ülkemizde depreme dayanıklı tasarıma olan ihtiyaç, acı kayıpların yaşandığı her felaket sonrasında daha da artmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalarda beklenen gelişim, yaşam alanlarındaki güvenliğin artırılması ve yapısal hasar kaynaklı her türlü kaybın en aza indirilmesi yönündedir. Depremler sonrasında gözlenen yapısal hasarın yerel zemin koşullarıyla ilişkisinin anlaşılması ile geoteknik deprem mühendisliğinde araştırmalar yoğunlaşmış, buna paralel olarak ülkemizde de yaklaşık son elli yıldan günümüze önemli gelişmeler olmuştur. Geçmişte yaşanan depremlerden elde edilen verilerin okuryazarlığı ile birlikte saha ve laboratuvar çalışmalarıyla desteklenmiş araştırmalar gelişime katkı vermiştir. 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sonrasında yapılan saha çalışmaları ile yerel zemin koşullarının belirlenmesi, gözlenen hasarların analizi, sayısal analiz sonuçları, güçlendirme projelerinin hazırlanması, bilimsel çalışmalar, akademik bilgi ile uygulamaların birlikte değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliğinin gelişimine önemli katkılar sunmuştur. Bu yazıda ülkemizde geçmişte yaşanmış bazı depremler sonrasında yerel saha ve zemin koşullarının hasara etkisinin araştırılması amacıyla geoteknik incelemeler kapsamında deprem bölgelerinde ilk defa uygulanan arazi deneyleri, mikrobölgeleme çalışmaları, bir ve iki boyutlu yer tepki analiz sonuçlarından elde edilen bilgiler sunulmuştur. Erzincan, Dinar, Düzce ve Gemlik ovalarında yüzeydeki sismik harekete tabakalaşma, anakaya eğimi ve havza etkisi incelenmiş, bir ve iki boyutlu analizlerin geçerli olduğu sınırlar yaklaşık olarak belirlenmiş, uygulamada yaygın olan deprem hesabı yöntemlerinde eksikliği görülen ikinci boyut ve havza etkisini tasarım yüklerine dahil edilmesini sağlayacak şiddet faktörleri önerilmiştir. Geçmişten günümüze geçen süreçte saha deneyleri ve sayısal analiz sonuçlarını içeren bu çalışmaların geoteknik deprem mühendisliğinin gelişimine katkıları olduğu, ülke, bölge ve yerel ölçeklerde deprem tehlikesinin doğru tanımlanarak yapıların depreme daha dayanıklı hale getirilmesi hedeflerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Arazi deneyleri, Zemin büyütmesi, 1 ve 2D dinamik analizler, Kenar ve havza etkisi, Spektral şiddet faktörü

¹ Prof. Dr., İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Geoteknik Mühendisliği, iyisan@itu.edu.tr



ABSTRACT

Our country, located on one of the most active seismic belts in the world, faces an increasing need for earthquake-resistant design following each disaster that is survived with painful losses. The expected development in studies conducted in this field aims at enhancing the safety of living spaces and minimizing all kinds of losses caused by structural damage. With the understanding of the close relationship between structural damage observed after earthquakes and local soil conditions, research in geotechnical earthquake engineering has intensified, and accordingly, significant progress has been made in our country over the last fifty years. As literacy of data obtained from past earthquakes increases, interest in geotechnical earthquake engineering has grown, and research supported by field and laboratory studies has contributed to development. Field studies conducted after major earthquakes such as the 1992 Erzincan, 1995 Dinar, and 1999 Kocaeli and Düzce earthquakes, along with the determination of local soil conditions, analysis of observed damages, numerical analysis results, preparation of strengthening projects, and the joint evaluation of scientific studies and academic knowledge with applications, have significantly contributed to the development of geotechnical earthquake engineering. In this study, information obtained from geotechnical investigations initiated to identify damaged structures following destructive earthquakes in our country in the recent past, determine the strength and dynamic properties of the foundation soil, and investigate the impact of local soil conditions on damage is presented. This includes the field test methods applied, their results, microzonation studies, and comparisons of response spectra obtained from one and two-dimensional dynamic analyses. The impact of bedrock slope and basin structure on soil amplification was examined, the boundaries within which one- and two-dimensional analyses are valid were approximately determined, and a method was proposed to include basin effects, often missing in common earthquake calculation methods, into design loads using an intensity factor that considers the effect of the second dimension.

Keywords: *In-situ tests, Amplification, 1D and 2D site response, Basin edge effect, Aggravation factor*

1. GİRİŞ

Depremlerin yıkıcı etkisini azaltarak yaşam alanlarında bulunan yapılar üzerindeki tehlikenin öngörülmesi ve depreme dayanıklı yapıların tasarımı, inşaat mühendisliğinin en önemli amaçlarından biridir. Diğer gelişmiş ülkelerde olduğu gibi ülkemiz koşullarında da bu alanda yapılacak çalışmalarda ihtiyaç duyulan gelişim, mühendislik yapılarında güvenliğin sağlanması ve yapısal hasar kaynaklı her türlü kaybın en aza indirilmesi yönündedir. Dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde yer alan ülkemizde depreme dayanıklı tasarıma olan gereksinim acı kayıplarla atlatılan her felaket sonrasında daha da artmaktadır. Depreme dayanıklı yapıların tasarımı, yapının ömrü boyunca maruz kalacağı en büyük yüklerin ne olacağı sorusuyla başlamaktadır. Bu sorunun cevabı ise bir tasarım depreminde ilgili sahada zemin yüzeyinde oluşabilecek ve yapılara etkiyecek dinamik kuvvetlerin hesabında kullanılacak en büyük yatay ivme değerinde aranmaktadır.



Bu bağlamda, deprem yükleri altında zemin tabakalarının davranışını ve yapılar üzerinde etkilerini inceleyen bir mühendislik dalı olan geoteknik deprem mühendisliğinin başlıca amacı da beklenen deprem hareketi karşısında ilgili sahanın davranışının incelenmesi ve yapıları etkileyecek dinamik yükünün belirlenmesinde kullanılacak yüzeydeki en büyük ivmenin tahmin edilmesi olmaktadır. Yapılan çalışmalar, zemin yüzeyine ulaşan sismik hareketin yayılmasında zemin tabakalaşması, gömülü anakaya morfolojisi ve havza etkisi gibi saha koşullarının önemli rolü olduğunu göstermiştir (di Lernia vd., 2024). Bu faktörler hareketin şiddetini ve süresini arttırabilmekte, frekans içeriğini değiştirebilmektedir. Saha koşullarının etkisi genel olarak topografya, tabakalaşma ve havza etkilerinin bir bileşimi olarak ortaya çıktıklarından, yer yüzeyindeki konuma göre de değişiklik göstermektedir. Bu nedenle depreme dayanıklı yapılaşmanın ve deprem güvenli yerleşmenin sağlanması, deprem tehlikesinin bölgesel ve yerel ölçeklerde doğru olarak tanımlanması, deprem araştırmalarının hedeflerini oluşturmaktadır. Araştırılan etkilerin ortaya konması her ne kadar zor olsa da var oldukları hemen hemen kesindir. Günümüzde havza, diğer bir ifade ile basen etkileri deprenselliğin yüksek olduğu az sayıda ülkelerde yapı tasarım kriterlerine dahil edilmiş olsa da henüz Türkiye'nin de içinde olduğu pek çok ülkede yönetmeliklerde yer almamaktadır (Özaslan vd., 2022).

Depremler sonrasında gözlenen yapısal hasar ve kuvvetli yer hareketi kayıtları ile yerel zemin koşullarının ilişkili olmasının anlaşılması, geoteknik deprem mühendisliğinde araştırmaları yoğunlaştırmıştır. Buna paralel olarak ülkemizde de bu alanda yaklaşık son elli yıl öncesinden başlayıp günümüze kadar devam eden, laboratuvar ve arazi deneyleri ile desteklenmiş araştırmalarla hem uygulama da hem de bilimsel camiada önemli gelişmeler yaşanmış ve bu gelişime İstanbul Teknik Üniversitesinin de önemli katkısı olmuştur. Dünyadaki gelişmelere eşzamanlı olarak, 1970'li yılların başlarından itibaren İTÜ'de zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için dinamik deney sistemleri kurulmuş, akademik çalışmalar ve araştırmalar yapılmaya başlanmış, 1975 yılında zemin dinamiği konusunda ilk doktora tezi tamamlanmıştır (Özaydın, 2021). İlerleyen yıllarda özellikle Erzincan depremi sonrasında yapılan uluslararası işbirliği çerçevesinde dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, büyük ölçekli burulmalı üç eksenli dinamik deney sistemleri laboratuvara kazandırılmıştır. Günümüz koşullarında ise son teknoloji ürünü dinamik basit kesme, sarsma tablası ile laminer zemin kutusu gibi deney sistemleri geoteknik deprem mühendisliğinde araştırmalarında İTÜ zemin mekaniği laboratuvarında aktif olarak kullanılmaktadır (Bagheri ve Bayat, 2024).

Ülkemizde ağır kayıpların yaşandığı 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde kaydedilen en büyük ivmeler ve gözlenen hasar dağılımı, yerel koşulların etkisini açıkça ortaya koymuştur. Bu depremler sonrasında zemin tabakalarının davranışının belirlenmesi için yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları, gözlenen hasarların analizi, sayısal çözümlerle sonuçları ile bilimsel çalışmaların birlikte değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliğinin gelişimine önemli katkılar sunmuştur. Özellikle Erzincan depremi, bu açıdan ülkemizde bir dönüm noktası olma niteliğini taşımaktadır. Erzincan, yıkılan binaların yerine yenilerinin yapılmasının yanında orta hasarlı binaların bilimsel yöntemlerle güçlendirme işlemlerinin ilk defa uygulandığı, kamu kurumların yürüttüğü çalışmalara üniversitelerin katılımının sağlandığı, araştırmacılara çalışma olanaklarının sunulduğu açık bir laboratuvar olmuştur. Üniversitelerden uzmanların ve genç araştırmacıların burada



yaptığı çalışmaların ve kazanılan deneyimlerin olumlu etkileri sonraki depremlerde yapılan çalışmalarda görülmüştür. Bölgede deprem sonrasında hasarlı yapıların tespiti, hafif ve orta hasarlı binaların onarımı amacıyla ilgili bakanlık tarafından içinde üniversitelerin bulunduğu bir çalışma başlatılmıştır. Şehir merkezindeki hasarlı 2000 konutun tamir ve takviyesi için İstanbul Teknik Üniversitesi adına İTÜ Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi de görev almıştır. Uygulanacak güçlendirme projelerinin hazırlanması, temel zemininin mukavemet ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi, yerel zemin koşullarının hasara etkisinin araştırılması amacıyla günün koşullarında bölgede geniş kapsamlı bir geoteknik araştırma programı uygulamaya konulmuştur. İnceleme ve araştırmalar genelde arazi deneyleri üzerinde yoğunlaşmış, bu kapsamda sondajlar açılmış, SPT ve CPT yanında çok sayıda dinamik sonda-DS deneyleri yapılmıştır. Yüzeysel yöntemlere ek olarak açılan sondaj kuyularında aşağı kuyu ve karşıt kuyu gibi kuyu içi yöntemler geliştirilerek ilk kez Erzincan'da uygulanmış, kayma dalgası hızının derinlikle değişimi belirlenmiş ve dinamik analizlerde kullanılmıştır. Yapılan deney sonuçları arasında ülkemiz koşullarına uygun korelasyon bağıntıları geliştirilmiş, yerel zemin koşullarının hasar üzerine etkileri incelenmiş, tek boyutlu analizler ile yüzeyde spektrumlar ve zemin büyütme belirlenmiş böylece ilk mikrobölgeleme çalışmalarına örnekler verilmiştir. Ayrıca bölgede Japon araştırmacılarla sınırlı sayıda mikrotremor ölçümleri yapılmış, Erzincan Ekşisu bölgesinde oluşan sıvılaşma, arazi ve laboratuvar deneyleri ile incelenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları birçok bilimsel toplantılarda sunulmuş, akademik çalışmalara veri sağlamış, edinilen bilgi birikimi ve tecrübeler sonraki araştırmalara ışık tutmuştur. Erzincan depremi sonrasında yapılan uluslararası iş birliği kapsamında laboratuvara güncel dinamik deney sistemleri kazandırılmış, kuyu içinde kayma dalgası hız ölçüm deney sistemleri geliştirilerek yaygın kullanımı sağlanmış, PS Logging yöntemi ülkemizde ilk kez kullanılmaya başlanmış, CPTU ve mikrotremor ölçümlerinin geoteknik mühendisliğinde kullanımı yaygın hale gelmiştir.

Erzincan depreminden yaklaşık üç yıl sonra 1 Mart 1995 tarihinde meydana gelen Dinar depremi sonrasında yine aynı amaçlar doğrultusunda İTÜ Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi görev almış, Erzincan'da yapılan çalışmalardan edinilen tecrübe ve bilgi birikimi ışığında daha bilinçli bir araştırma programı uygulanmıştır. Bu kapsamda açılan sondaj kuyularında kayma dalgası hızı deprem bölgesinde ilk defa PS Logging yöntemi ile ölçülmüş, çalışma bölgesi uygun boyutlarda karesel hücrelere ayrılarak çok sayıda tekil mikrotremor ölçümleri yapılmıştır. Sondajlarla ulaşılamayan anakaya derinliği, geniş açıklıklı ve eşzamanlı çoklu mikrotremor dizin ölçümleri ile yaklaşık olarak belirlenmiş, arazi ve laboratuvar deney sonuçları kullanılarak 1D ve 2D dinamik davranış analizleri yapılmış, gerçek anlamda 2. ve 3. derece mikrobölgeleme çalışmaları coğrafik bilgi sistemi ile görsel hale getirilmiş, mikrobölgeleme modellerinin hasarla karşılaştırılması yapılarak kullanılan mikrobölgeleme yöntemlerinin güvenilirliği araştırılmış, hasara yerel zemin koşullarının ve anakaya eğiminin etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda Dinar Ovası'nın dinamik davranışının iki boyutlu anakaya eğiminden etkilendiği açık bir şekilde anlaşılmıştır. Benzer çalışmalar 1999 Düzce depremi sonrasında Düzce ovasında da yapılmış, diğerlerinden farklı olarak burada anakaya eğiminin yanında havza etkileri de incelenmiş, 1D dinamik analizlerden elde edilen spektral ivme değerlerine, anakaya eğimine bağlı olarak 2. boyut etkisini yansıtılabilmek amacıyla bir şiddet faktörü önerilmiş, bir ve iki boyutlu analiz için geçerli olduğu sınırlar belirlenmeye çalışılmıştır.



Kenarlarda eğimli rijit anakaya ile sınırlı zemin tabakalarından oluşan ve havza olarak tanımlanan bölgelerde yanal düzensizliklerden kırılan ve yansıyan dalgalar, dalga dönüşümlerine neden olmakta, yer hareketinin süresini, frekans içeriğini ve genliğini artırabilmektedir. Bu durumda iki veya üç boyutlu analizler için havza geometrisinin bilinmesi gerekmektedir. Dar ve derin havza özelliklerinin kuvvetli yer hareketine etkisini incelemek amacıyla boyutları görece daha küçük olan Gemlik havzası seçilmiş ve sahada yaklaşık üç yıl süren araştırmalar yapılmıştır. Burada yerel yönetimlerin de desteği alınarak öncekilere benzer çalışmalar yürütülmüş, çok sayıda mevcut sondajlar toplanmış, yenileri açılmış, belli bir karela çok sayıda tekil ve çoklu mikrotremor ölçümleri - SPAC alınmıştır. Havza geometrisi belirlendikten sonra, bölge için yönetmeliğe uygun olarak deprem kayıtları seçilmiş, bir ve iki boyutlu analizler ile sahaya özel tepki spektrumları belirlenmiştir. Dar ve derin havzalarda zemin sınıfına bağlı şiddet faktörleri hesaplanmış, bu tür havzalarda depremlerde oluşacak 2. ve 3. boyut etkilerinin, genel yaklaşımda yaygın yer bulan 1D dinamik analiz sonuçlarına basit bir şekilde dahil edilebilecek periyoda ve boyutsuz mesafeye bağlı şiddet faktörleri önerilmiştir. Yapılan bu çalışmaların geoteknik deprem mühendisliği gelişimine katkıların sağlandığı düşünülmektedir.

Bu yazıda ülkemizde yakın geçmişte yaşanmış yıkıcı depremler sonrasında hasarlı yapıların tespiti, temel zemini dinamik özelliklerinin belirlenmesi, yerel zemin koşullarının hasara etkisinin araştırılması amacıyla yönelik olarak yapılan geoteknik incelemeler kapsamında uygulanan arazi deney yöntemleri, sonuçları, mikrobölgeleme çalışmaları, bir ve iki boyutlu dinamik analizlerle elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırması sonucu elde edilen bilgiler sunulmuştur. Zemin büyütmesine anakaya eğimi ve havza yapısının etkisi incelenmiş, bir ve iki boyutlu analizlerin geçerli olduğu sınırlar yaklaşık olarak belirlenmiş, ikinci boyutun etkisini dikkate alan bir şiddet faktörü ile uygulamada yaygın olan deprem hesabı yöntemlerinde eksikliği görülen havza etkilerinin tasarım yüklerine dahil edilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir.

2. TASARIM İVME SPEKTRUMUNA YEREL VE SAHA KOŞULLARININ ETKİSİ

Geçmişte yaşanan çok sayıdaki yıkıcı depremlerde bir sahada zemin yüzeyinde oluşan sismik hareketin, yerel zemin ve saha koşullarından önemli derece etkilendiği ortaya çıkmıştır. Yüzey ve yüzey altı topografyası, zemin özellikleri, tabakalaşma ve anakaya morfolojisi gibi saha koşulları hareketin genliğini, süresini ve frekans içeriğini değiştirebilir. Bu etkiler, tüm faktörlerin bir birleşimi olarak meydana gelmekte olup yer yüzeyindeki konuma göre de değişiklik göstermektedir. Sismik hareket genliğinin artması, binalarda ve altyapılarda ciddi hasarların meydana gelmesine, saha koşullarına bağlı olarak heyelanların başlamasına veya yeniden aktifleşmesine neden olabilmektedir. Bilinmezliklerin çok olduğu bu karmaşık yapı içerisinde sadece yatay bir anakaya üzerinde sonsuza uzanan yatay zemin tabakalarından oluşan ve deprem dalgalarının düşey yayıldığı sahalar dışında, yerel saha faktörlerinin ayrıştırılarak her birinin etkisinin ortaya konulması her zaman kolay veya mümkün olmamaktadır. Mühendislik açısından bakıldığında, bir sahanın sismik hareket karşısındaki davranışına bu etkilerin katkısının anlaşılması, her bir etkinin baskın olduğu veya etkisinin görece olmadığı alanların belirlenmesine ve böylece ilave saha incelemesi ya da daha detaylı analiz gerektiren durumlara karar verilmesine önemli bir yararı olacaktır. Ayrıca Eurocode 8'de zemin sınıfına bağlı olarak tasarım spektrumuna bir çarpan olarak



ilave edilen topografik etkilerde olduğu gibi, bu etkilerin nicelleştirilmesi deprem yönetmeliklerine basitleştirilmiş bir şekilde dahil edilerek daha güvenli bir yapısal tasarımın önünü açacaktır.

Seçilen bir deprem hareketi altında yerel zemin koşullarının etkisi, yaygın olarak tek boyutlu (1D) saha tepki analizleri ile kolayca belirlenebilmektedir. Serbest saha zemin modeli çerçevesinde yapılan bu analizlerde zemin tabakalarının yatayda sonsuza uzandığı ve cisim dalgalarının düşey yayıldığı kabul edilmektedir. 1D için yapılan kabuller ve sınır koşulları sığ ve geniş (genişlik/derinlik $B/D \geq 10$) havzaların orta bölgelerinde geçerli olmaktadır. Yerel zemin koşulların etkisi ülkemiz yönetmeliğinde standart durumlar için coğrafi konuma, yerel zemin sınıfına ve deprem düzeyine bağlı olarak önerilen tasarım ivme spektrumu ile dikkate alınmaktadır. Özel durumlarda ise bir, iki ve üç boyutlu (1D, 2D, 3D) sahaya özel zemin davranış analizinin yapılması önerilmektedir. Tabakalar gerçekte yatay olmayıp sınırlı genişliğe sahiptir ve genelde kenarlarda eğimli bir anakaya ile son bulmaktadır. Kenarlarda rijit anakaya ile sınırlı zemin tabakalarından oluşan kapalı alanların oluşturduğu yapı havza olarak değerlendirilmektedir. Tabakaların davranışı bu sınır koşullarına bağlı olmakta, boyut etkisi de önem kazanmakta, havza geometrisi ve boyutları ile sismik hareketin dalga boyu rezonans durumlarını ortaya çıkarmakta, havzanın bütün olarak davranışı ile kenar bölgelerdeki zemin tabakalarının davranışı arasında dinamik etkileşim olmakta ve etkileşim, kenardan havza ortasına doğru farklılık göstermektedir. Bu yanal düzensizliklerden kırılan ve yansıyan dalgalar, dalga dönüşümlerine neden olmakta ve cisim dalgalarına ek olarak yüzey dalgalarına dönüşmekte, sismik hareketin genliği, süresi ve frekans içeriği olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu koşullar altında sismik davranış tek boyutlu durumdan çok boyutlu probleme dönüşmekte ve tek boyutlu analizler yetersiz kalmakta, 2 ve 3 boyutlu analizler gerekli olmaktadır. Büyük depremlerde havza kenarına yakın bölgelerde hasarın daha fazla olması araştırmaların bu yönde artmasına neden olmuştur.

Ülkemizde de geçmişte yaşanan depremlerden elde edilen veriler artıkça, geoteknik deprem mühendisliği alanında yapılan araştırmalar ile hem uygulama hem de akademik ortamda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Yerel zemin koşullarının etkisinin ilk defa yer aldığı ülkemiz 1975 deprem yönetmeliğinde, 1992 Erzincan ve 1995 Dinar depremlerinden sonra 1997-98'de revizyona gidilmiş, 2007'de önemli değişiklikler olmuştur. 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sonrasında ise 2018 deprem yönetmeliğinde konu daha kapsamlı olarak ele alınmış, uluslararası diğer yönetmeliklerle uyumlu hale getirilmiştir. Aşağıda geoteknik deprem mühendisliğinin gelişimine önemli katkısı olduğu düşünülen geçmişte ülkemizde yaşanan bazı önemli depremlerden sonra sahada yapılan çalışmalar ve sayısal analizlerin birlikte değerlendirilmesiyle ulaşılan sonuçlar paylaşılmaktadır.

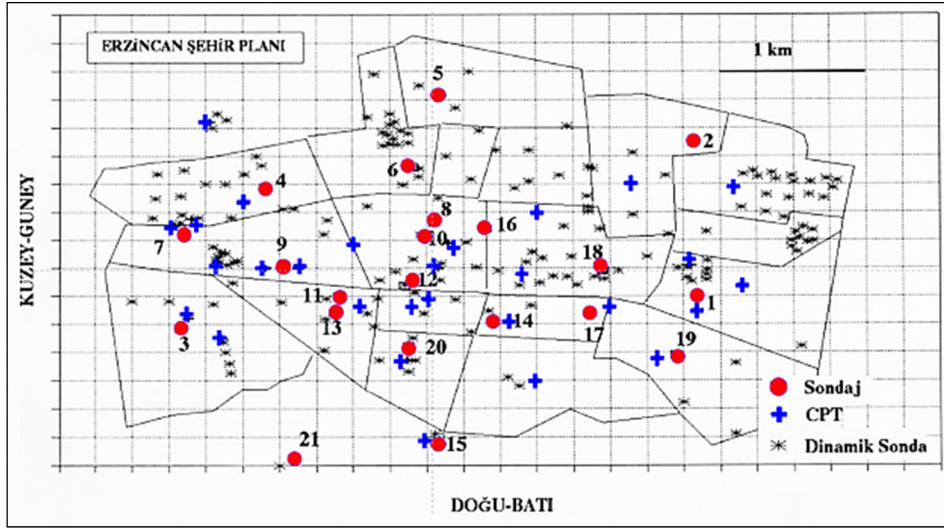
2.1. 1992 Erzincan Depremi Sonrası Yapılan Çalışmalar ve Yerel Zemin Koşullarının Etkisi

Doğu Anadolu Bölgesinin kuzey batı bölümünde yukarı Fırat Havzasında, denizden yüksekliği yaklaşık 1200 m olan, Kuzey ve Doğu Anadolu fay sistemlerinin birleştiği, depremselliği yüksek olan bir bölgede yer alan Erzincan, cumhuriyet tarihi içinde iki büyük deprem yaşamıştır. 27 Aralık 1939 Büyük Erzincan depremi ($M_w=7.8$), arkasında bıraktığı yaklaşık 33000 can kaybı ve 100000 yaralı ile dünyanın büyük depremleri arasındadır. Erzincan'da 13 Mart 1992'de meydana gelen depremde ($M_s=6.8$) ise 653 can kaybı olmuş,



3850 kişi yaralanmış, 18000 konut farklı derecede hasar görmüş, şehir merkezi tamamen yıkılmıştır. Yapılan hasar tespitinde 28000 konutun %5'i yıkık veya ağır, %10'u orta ve %14'ü hafif hasarlı olarak belirlenmiştir.

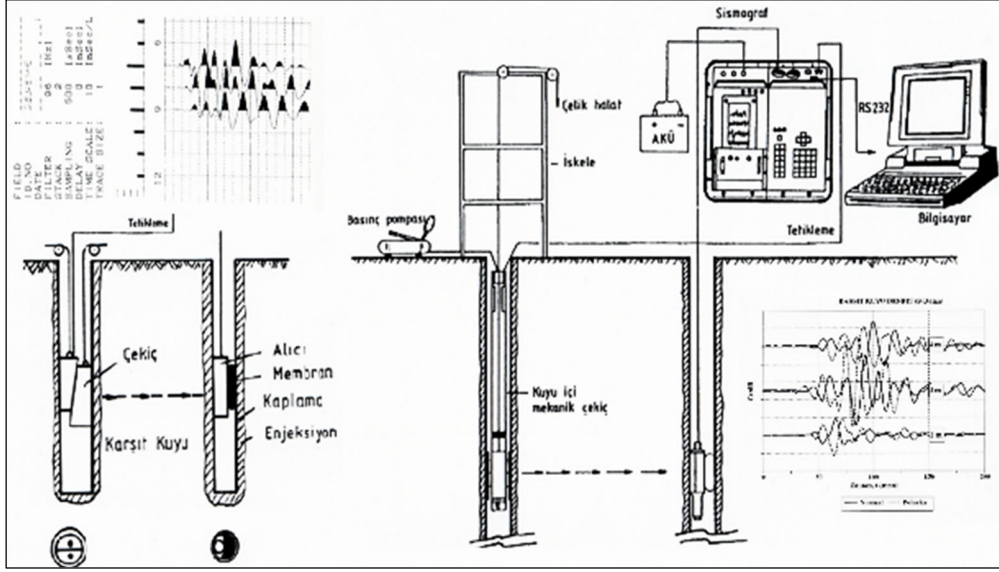
Şehir merkezindeki orta hasarlı konutların güçlendirmesi için temel zemini özelliklerinin belirlenmesi ve yerel zemin koşullarının hasara etkisinin araştırılması amacıyla bölgede yapılan geoteknik incelemeler genelde arazi deneyleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda sondajlar açılmış, arazi penetrasyon deneyleri yapılmış, yüzey ve kuyu içi yöntemlerle kayma dalgası hızı ölçülmüştür. Sınırlı sayıda uygulanabilen SPT ve CPT gibi bilinen arazi penetrasyon deneylerinin yanında yaklaşık 300 adet dinamik sonda (DS) deneyi yapılmıştır. Sondajlar ve arazi deneyleri yerleşim planı Şekil 1'de gösterilmiştir.



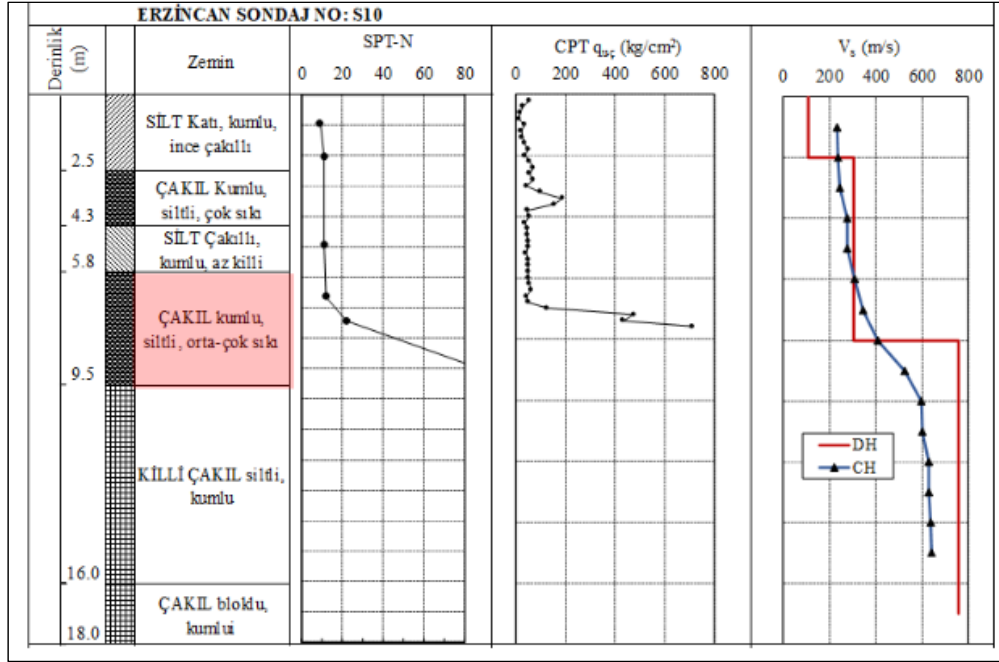
Şekil 1. Arazi deneyleri yerleşim planı

Sondajın olmadığı yerlerde mahalle bazında ve bina yerleşim alanlarında sığ tabakaların kalınlığını ve dirençlerini belirlemek için oldukça yararlı olan dinamik sonda (DIN 4095) deneyinde 10 cm penetrasyon için gerekli vuruş sayısı belirlenmiş, uygulanmasındaki benzerlikten dolayı sonuçları eşdeğer SPT-N sayısına dönüştürülerek kullanılmıştır. Birbirine yakın konumda kontrollü bir şekilde uygulanan penetrasyon deney sonuçları arasında uyum dikkate çekicidir. Dinamik analizlerde gerekli olan kayma dalgası hızı ilk defa geliştirilen aşağı kuyu (DH) ve karşıt kuyu (CH) gibi kuyu içi yöntemlerle ölçülmüştür. Karşıt kuyu yönteminde kuyu içinde kayma dalgası üretmek için önce eğik yüzeyli iki silindirik kütlelerden oluşan basit bir kaynak kullanılmış, sonra geliştirilerek tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir bir kuyu içi dalga üretme çekici geliştirilmiştir. Bu ölçümlerde kullanılan kuyu içi yöntemi şematik olarak alınan kayıtlar ile birlikte Şekil 2'de verilmiştir (İyisan ve Ansal, 1993). Derin inceleme için dinamit patlatmak suretiyle sismik kırılma ve yansıma yöntemleri uygulanmış ancak anakayaya ulaşamamıştır. Erzurum, Fırat Nehri ve etrafını çevreleyen dağlardan erozyonla taşınmış kil, silt, kum ve çakıl aralanmasından oluşan kalın ve heterojen alüvyon havza üzerinde kurulmuştur. Tabakalaşmada bir süreklilik bulunmamaktadır. Sondajlarda ve diğer arazi deneylerinde şehrin kuzeyinde 4~5 m, güneyinde ise 15~20 m derinliklerde çok sıkı ve zayıf çimentolu çakıl tabakası ile karşılaşmıştır. YASS şehir merkezinde 15~30 m derinliklerde ölçülmüştür. Sondajlardan elde edilen tipik bir zemin kesiti, CPT, SPT ve kayma dalgası hızının derinlikle değişimi ile birlikte Şekil 3'te verilmiştir.





Şekil 2. Kuyu içinde kayma dalgası hızı ölçümü



Şekil 3. Arazi deney sonuçları ve tipik zemin kesiti

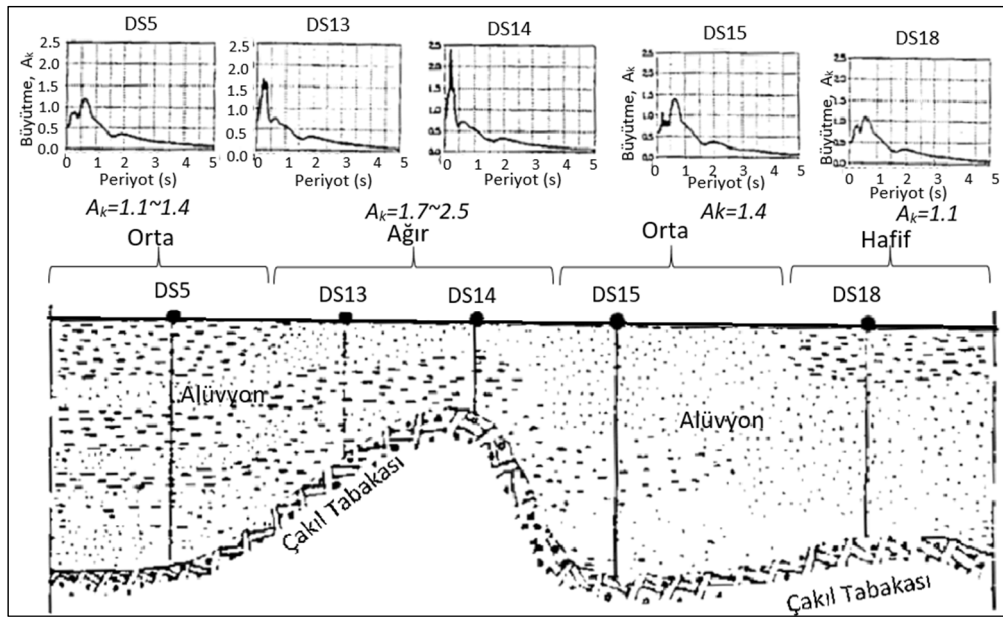
Geoteknik incelemelerde SPT, CPT yaygın olarak kullanılmakta ancak DH, CH gibi kuyu içi yöntemler arazide ek işlemler ve maliyet nedeniyle önemli projelerde tercih edilmektedir. Sismik yöntemlerin uygulanmadığı veya sınırlı sayıda uygulandığı durumlarda da dinamik özelliklerin tahmin edilmesi gereği, kayma dalgası hızı V_s ile penetrasyon dirençleri arasında ilişkilerin aranmasına yol açmıştır. Erzincan'da yapılan tüm deneysel çalışma sonuçları kullanılarak hem penetrasyon dirençleri arasında hem de V_s arasında korelasyonlar geliştirilmiş ve bu bağıntılara örnekler Tablo 1'de özetlenmiştir. Burada V_s ve V_p sırasıyla kayma ve basınç dalgası hızı; N , SPT vuruş sayısı; q_c , CPT uç direnci, σ_v , t/m² biriminde efektif düşey gerilmedir (İyisan, 1996).



Tablo 1. Arazi deney sonuçlarından üretilen korelasyonlar

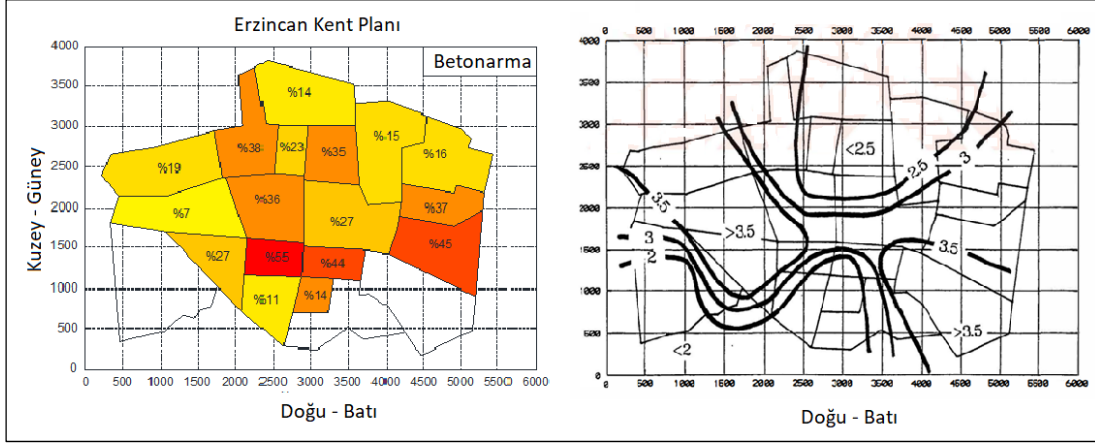
Kayma Dalgası Hızı	Basınç Dalgası Hızı	Penetrasyon Dirençleri
$V_s = 51.5N^{0.516}$	$V_p = 154N^{0.488}$	$N = 2.4N_{10}^{0.597}$
$V_s = 61N^{0.267}\sigma_v^{0.283}$	$V_p = 186N^{0.179}\sigma_v^{0.329}$	$q_c = 7.3N^{0.603}$
$V_s = 55.3q_c^{0.377}$	$V_p = 275\sigma_v^{0.409}$	$q_c = 6.7N_{10}^{0.658}$
$V_s = 47q_c^{0.212}\sigma_v^{0.395}$	$V_p = 246.4\sigma q_c^{0.182}$	$\log N = 0.025 + 0.675\log(2N_{10})$

Geoteknik inceleme ve hasar gözlemleri, yerel zemin koşullarının hasar üzerine etkilerinin araştırılması adına önemli bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır. Erzincan'da yoğun hasar, periyotları yaklaşık $T=0.20\sim 0.60$ s arasında değişen 3~6 katlı betonarme binalarda meydana gelmiştir. Bu davranışa çimentolaşmış çok sıkı çakıl tabakasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bu özellik dikkate alınarak 1D dinamik analizler ile yüzeyde spektrumlar ve zemin büyütme hesaplanmış, hasar dağılımı ile karşılaştırılmış, böylece ülkemizde deprem sonrasında ilk mikrobölgeleme çalışmaları başlatılmıştır. Yapılan tek boyutlu dinamik analizler sonucunda zemin büyütmesi ağır hasarlı bölgede $A_k=1.7\sim 2.5$ ve hafif hasarlı bölgede $A_k=1.0\sim 1.1$ olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Şekilden de görülebileceği gibi zemin büyütme değerlerinin çakıl tabakası derinliğinden etkilendiği anlaşılmaktadır. Aynı durum zemin yüzeyinde hafif, orta ve ağır hasar bölgelerinde hesaplanmış mutlak ivme spektrumlarında da görülmektedir. Yapılan sondajlarda ve sismik ölçümlerde anakaya derinliğine ulaşamadığından en büyük yüzey ivmeleri ve zemin büyütmesi, deprem hareketi sıkı çakıl tabakasından etkilenerek elde edilmiştir. Bölgenin tamamında bu değerler ile hasar dağılımı arasındaki ilişki incelendiğinde (Şekil 5) sadece yerel zemin koşullarının hasar dağılımını açıklamada yeterli olmadığı, etkiyen diğer faktörlerin de dikkate alınması gereği anlaşılmaktadır (Lav vd., 1993). Erzincan'da yapılan çalışmalar burada anlatılanlarla şüphesiz sınırlı kalmamış, elde edilen veriler yüksek lisans ve doktora çalışmalarında kullanılmış, ulusal ve uluslararası birçok yayın yapılmıştır. Erzincan Eksisu bölgesinde açık sahada zemin yüzeyinde gözlenen kum konilerinin işaret ettiği sıvılaşma olayı sonrasında konunun önemi daha iyi anlaşılmış ve bu yöndeki araştırmalar hız kazanmıştır.



Şekil 4. Tek boyutlu zemin büyütmesinin hasarlı bölgelere göre değişimi





Şekil 5. Hasarlı dağılımı ile zemin büyütmesi ilişkisi

2.2. Zemin Büyütmesine Anakaya Eğimi Etkisi Dinar ve Düzce Örneği

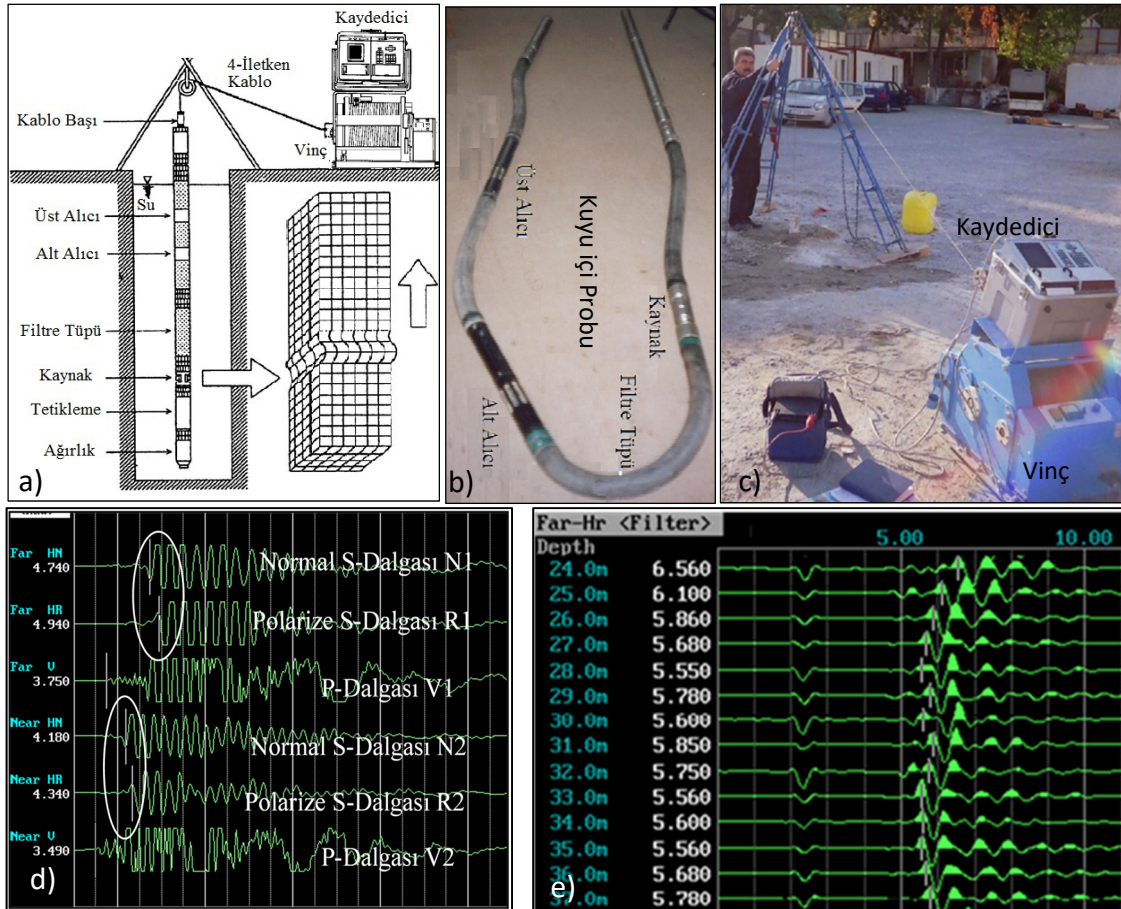
Bir sahada oluşan deprem hareketinin özellikleri tektonik yapı, kırılma mekanizması, odak derinliği gibi deprem kaynak özelliklerinin yanında jeolojik yapı ve yerel zemin koşullarına da bağlıdır. Anakaya derinliği ve eğimi, anakaya üzerindeki zemin tabakalarının kalınlığı, cinsleri, özellikleri, tabakalarının yatay doğrultudaki süreksizliği ve topografik özellikler gibi yerel etkiler yüzey ivmelerine ve zemin büyütmesine etkileyen önemli faktörlerdir. Yerel zemin koşullarının etkilerinin anlaşılabilmesi için karmaşık yapı basitleştirilip düşey yönde ilerleyen cisim dalgaları esasına dayanan bir boyutlu analizlerde, zemin ortamı yatay tabakalaşmış olarak kabul edilmektedir. Bir boyutlu analizde geçerli olan kabuller ve sınır koşulları zemin tabakalarının genişliğinin, derinliğinden çok daha büyük olduğu sığ ve geniş ova modellerinde sağlanmaktadır. Aksi durumlarda yani dar ve derin ova modellerinde iki boyutlu rezonans durumları ortaya çıkmakta ve tek boyutlu dinamik analizler yetersiz kalmaktadır (Pitilakis, 2004; Haşal, 2008). Farklı kalınlıktaki tabakalar ile jeolojik ve topografik düzensizliklerden oluşmuş doğadaki gerçek yapı oldukça karmaşıktır ve iki veya üç boyutlu modeller yardımıyla tanımlanabilmektedir. Bu nedenle bir tasarım depremi için yüzeydeki hareketi belirlemek amacıyla yapılacak saha tepki analizlerinde tüm yerel koşulların dikkate alınması gerekmektedir. Ovaları sınırlayan anakaya geometrisinin, zemin tabakalarının deprem hareketi karşısındaki davranışına etkisini anlayabilmek amacıyla 1995 Dinar ve 1999 Düzce depremlerinden sonra Dinar ve Düzce havzalarında geoteknik incelemeler yapılmış, eğimli anakaya geometrisinin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Ege graben sisteminde Göller Bölgesi içinde yer alan etrafı dağlarla çevrili bir ova olan Dinar, geçmişte önemli yıkıcı depremler yaşamış, tarihte 5 kez yıkılıp yeniden kurulmuş, 1944'e kadar bataklık olan bölgede yerleşim önce dağlık alanda gelişmiş, ova kurutulduktan sonra 1948'den itibaren yerleşim ovaya doğru kaymıştır. Şehir merkezinde yerleşim alanında kalın Kuvaterner yaşlı alüvyon formasyonlar, derinde ise Oligosen yaşlı konglomeratik birimler yer almaktadır. Öncü, ana ve artçı şoklara sahip bir deprem olan 1995 Dinar depreminde ($M_s=6.1$) yapı stokunun %36'sı değişik düzeyde hasar görmüş ve 90 can kaybı yaşanmıştır. Hasar gözlemlerinde 4023 konut ağır, 3091 konut orta ve 6609 konut hafif hasarlı olarak tespit edilmiştir. Yıkımın fazla can kaybının az olması, ana şok öncesi çok sayıda öncü depremin olmasına ve insanların dışarıda beklemiş olmasına bağlanmaktadır. Jeolojik



yapının farklı olması hasar dağılımında etkin olmuş, hasar ovalık bölgede fazla, dağlık bölgelerde az olurken en büyük hasar ise bu iki bölgenin arasındaki geçiş bölgesinde meydana gelmiştir (Ansal vd., 2002). Karadeniz Bölgesinde Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer alan, etrafı dağlarla çevrili kapalı bir ova olan, şehir merkezinde yerleşim alanında kalın nehir ve göl çökelleri – alüvyon, kenarlarda ise şeyl, kumtaşı ve siltaşı tabakalarının bulunduğu Düzce, 12 Kasım 1999 tarihinde yıkıcı bir deprem ile ($M_w=7.2$) sarsılmıştır. Bu depremde 12939 konut, 2450 işyeri hasar görmüş, 4948 kişi yaralanmış ve 845 kişi hayatını kaybetmiştir. Dinar ve Düzce havza yapıları yaklaşık benzer olup boyutları oldukça farklıdır. Her iki havzada da kenardaki anakaya derinliğini ve havza geometrisini belirlemek amacıyla bilinen yöntemlerin dışında tekil ve eş zamanlı geniş açıklıklı çoklu mikrotremor dizin ölçümleri yapılmış, kayma dalgası hızı ülkemizde ilk defa PS Logging yöntemi ile ölçülmüştür.

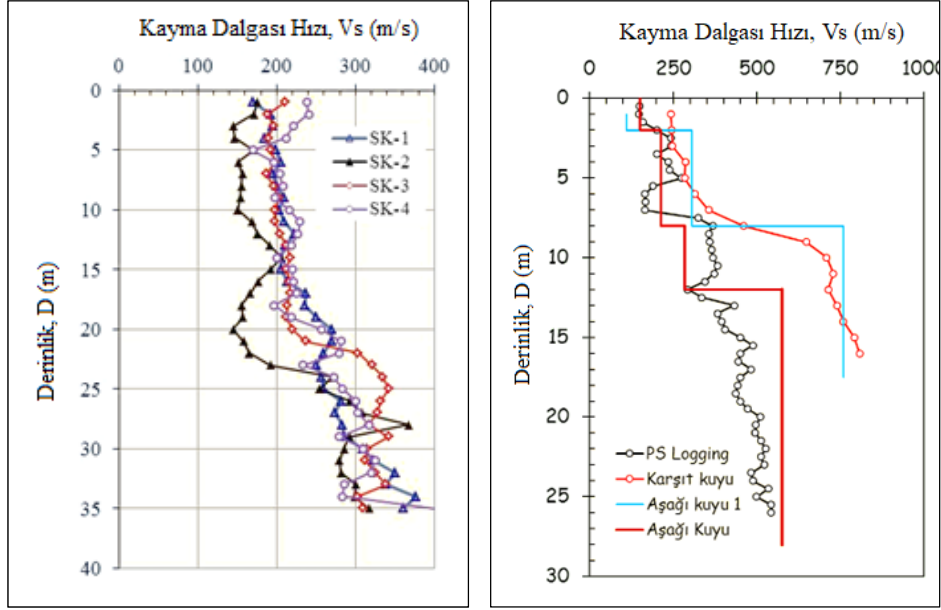
Açılan sondaj kuyusu içinde kayma dalgası hızının derinlikle değişimini belirlemek için bir alternatif bir yöntem olan PS Logging deney sistemi, mikrotremor deney sistemi ile birlikte İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına Erzincan depremi sonrasında diğer deney sistemleri ile birlikte kazandırılmıştır. Diğer kuyu içi yöntemlerinden farklı olarak tek kuyuda uygulanabilen bu yöntemde dalga üreten kaynak ve aralarında 1.0 m mesafe olan iki alıcı sabit yerleşimde aynı birimde bulunmakta, sistem sondaj kuyusundaki sıvı içinde askıda kalabilmektedir. Deney sisteminin şematik kesiti, dalga üretme kaynağı ve alıcıların bulunduğu birim, deneyin uygulanması ve alınan kayıtlara örnekler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. PS Logging deney sistemi ve kuyu içinde alınan kayıtlara örnekler



Bu deney yönteminde kuyu içinde istenilen aralıkta örneğin 5 cm gibi ölçüm yapılabilen ve çok detaylı hız kesiti elde edilebilmektedir. Sonuçları aşağı kuyu ve karşıt kuyu gibi diğer deney yöntemleri ile uyumlu olup deney sonuçlarına ve karşılaştırmasına bir örnek Şekil 7’de verilmiştir. Yöntem ile 300 m derinliğe kadar ölçüm alınabilmektedir. Bu deney yöntemi daha sonra geniş bir uygulama alanı bulmuş, İstanbul mikrobölgeleme çalışmaları, köprü ayakları ve viyadüklerin deprem güçlendirmesi gibi birçok uygulama ve projede kullanılmıştır. Sonrasında bazı kamu ve özel kuruluşlar sistemi kullanmaya başlamışlardır.



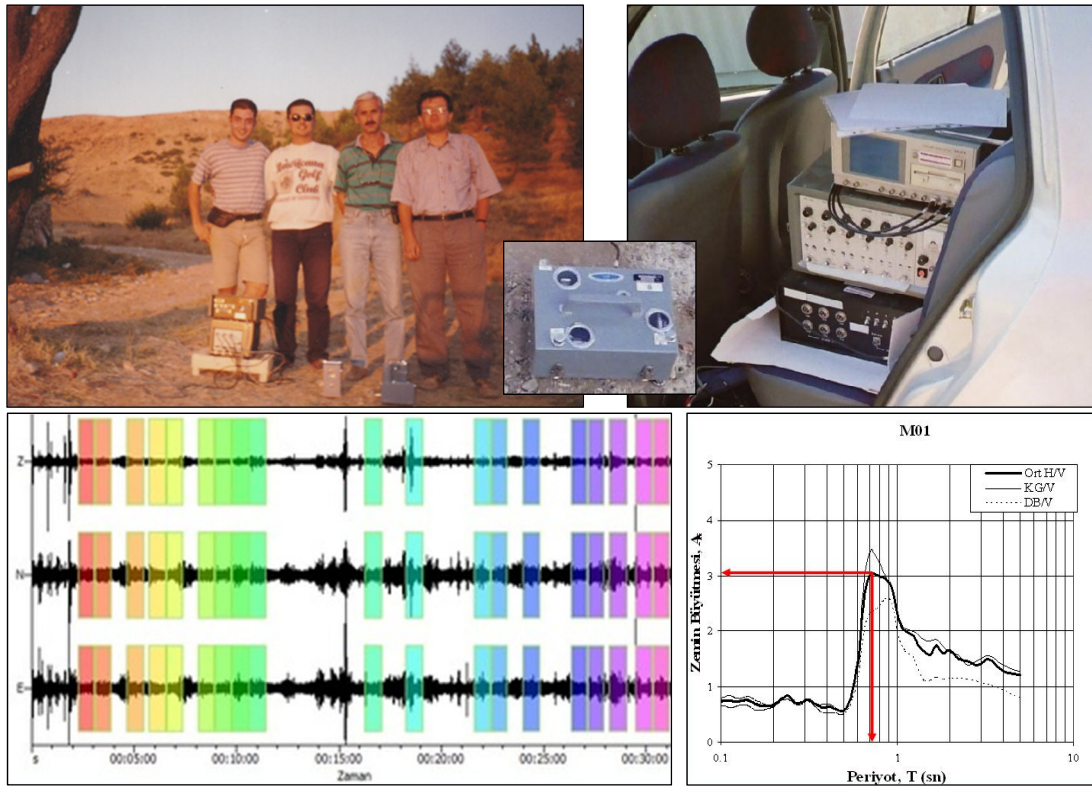
Şekil 7. PS Logging ve diğer deney sonuçlarının karşılaştırılması

Zeminlerin dinamik davranış özellikleri hakkında kısa sürede bilgi edinmek için uygulanan arazi deney yöntemlerinden biri de mikrotremor ölçümleridir. Mikrotremor, doğada her zaman var olan çok küçük genlikli titreşimlerdir. Genlikleri 1/1000-1/100 mm, periyotları ise genelde 1-20 s arasındadır. Bu dalgaların algılanabilmesi için çok hassas alıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgâr, deniz dalgaları, jeotermal reaksiyonlar, küçük manyetüdü sarsıntılar gibi doğal etkenler ile yaşamının neden olduğu hareketlilik, trafik, endüstriyel gürültü gibi kültürel titreşimler mikrotremor kaynağını oluşturmaktadır. Geoteknik deprem mühendisliğinde mikrotremor ölçümleri genel olarak zemin hakim periyodu, zemin büyütmesi, mikrobölgeleme, kayma dalgası hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Mikrotremor kayıtlarından elde edilen spektrumlar zemin tabakaları hakkında önemli bilgiler içermektedir. Tekil mikrotremor kayıtlarının analizinde ve yorumlanmasında doğrudan Fourier genlikleri, referans yöntemi metodu ve Nakamura yöntemi olmak üzere başlıca üç teknik kullanılmaktadır. Her üç yöntemin ortak özelliği yerel zemin etkisinin elastik yarı sonsuz bir ortam üzerinde yer alan tek bir yumuşak zemin tabakasından kaynaklandığını kabul etmeleridir. Bu durumda 2 ve 3 boyutlu zemin etkileri ihmal edilip, yumuşak zemin tabakası ile yarı sonsuz ortam arasındaki empedans oranı ile tanımlanan büyütme seviyesi ve hakim periyoda göre yerel zemin koşulları belirlenmiş olmaktadır. Kayıtların analizinde yaygın olarak Nakamura Yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde her periyotta yatay yöndeki mikrotremor kayıtlarının spektrumları (H), düşey yöndeki spektruma (V) oranlanmaktadır. H/V oranı spektral büyütme olarak bilinmekte, bu değer



maksimum olduğu andaki periyot ise hakim periyot olarak değerlendirilmektedir. Birçok bilinmeyen faktörün etkisinde olan mikrotremor ölçümlerinden periyotların doğru belirlenmesine karşılık bazı durumlarda oldukça yüksek büyütme değerleri ile karşılaşabilmektedir. Bu nedenle ölçümlerin uzman mühendisler tarafından uygun zaman ve ortamda yapılması ve yorumlanabilir kayıtların alınması gerekmektedir.

Dinar’da çalışma alanı uygun ölçekli karesel hücrelere ayrılmış her birinde yeteri kadar mikrotremor kayıtları alınmıştır. Alınan kayıtların analizinde Nakamura yöntemi kullanılarak zemin büyütmesi ve hakim periyotlar belirlenmiştir. Bu değerler daha sonra bölgenin 2. derece mikrobölgelemesi için kullanılmış, elde edilen sonuçlar diğer yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Dinar’da yoğun bir şekilde kullanılan mikrotremor ölçüm sistemi ile alınan kayıtlar ve kayıtların analizi sonucunda çizilen spektruma örnek Şekil 8’de verilmiştir.



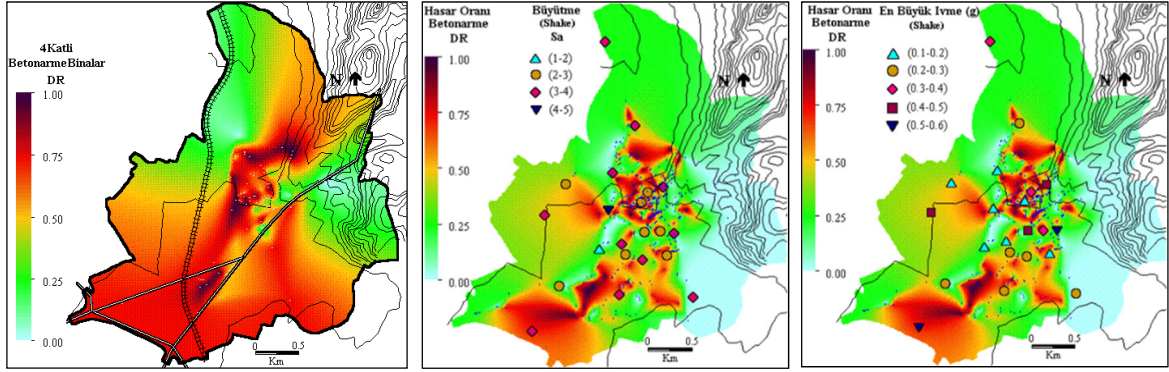
Şekil 8. Dinar’da kullanılan mikrotremor ölçüm sistemi, alınan kayıtlar ve spektrumu

Mikrotremor ölçümleri tekil bir noktada yapıldığı gibi çoklu alıcılarda eş zamanlı olarak da yapılmakta ve alınan kayıtların f-k spektrumu veya SPAC ile analizleri yapılarak kayma dalgası hızının derinlikle değişimi de belirebilmektedir. Mikrotremor ölçümlerinde yüzey dalgalarının düşey bileşeni olan Rayleigh dalgaları kaydedilmektedir. Rayleigh dalgası dispersiv özelliğe sahiptir, diğer bir deyişle dalga hızı (V_R), frekansa (f) ve dalga boyuna (λ) bağlı olarak değişmektedir ($V_R = \lambda \cdot f$). Sismik dalgaların bir frekanstaki yayılma hızı ise faz hızı (c) olarak tanımlanmaktadır. Faz hızının frekans veya periyotla değişimini gösteren grafiğe dispersiyon (yayılm) eğrisi adı verilmektedir. Bir zemin kesiti için teorik olarak da elde edilebilen dispersiyon eğrisi, kayma dalgası hızı (V_s), basınç dalgası hızı (V_p), yoğunluk (γ) ve tabaka kalınlığının (H) bir fonksiyonudur. Bu nedenle, mikrotremor ölçümlerinden elde edilen faz hızlarının frekansla değişimi, ölçümlerin yapıldığı bölgedeki zemin tabakalarının



özelliklerini belirlemede kullanılabilir. Arazi dispersiyon eğrisinden zemin tabakalarının özellikleri geri hesaplama yöntemi ile belirlenmektedir. Bunun için seçilen bir zemin modelinden hesaplanan teorik değerlerle ölçümler sonucu bulunan değerler benzer oluncaya kadar iterasyon yapılmaktadır. Dinar'da çok sayıda tekil mikrotremor ölçümlerinin yanında 7 alıcı kullanılarak genişliği 50~1500 m arasında değişen açıklıklarda mikrotremor ağ – dizin ölçümleri yapılmış, kayıtların analizi sonucunda kayma dalgası hızının derinlikle değişimi elde edilmiş ve bu değerler dinamik analizlerde kullanılmıştır.

Dinar anlamlı büyüklükte alt bölgelerde ayrılarak arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin özellikleri ve yüzeyde alınan deprem kaydının anakaya taşınmış hali kullanılarak tek boyutlu dinamik analizler yapılarak zemin yüzeyinde en büyük ivmeler ve büyütme hesaplanmıştır. 3. derece mikrobölgeleme yapılarak detaylı hasar dağılımı ile karşılaştırılmıştır. Hasar dağılımı ile 1D dinamik analizlerinden elde edilen yüzey ivmeleri ve zemin büyütmesi ilişkisine örnek Şekil 9'da verilmiştir (Güllü, 2001). Bu şekilden de görülebileceği üzere tek boyutlu analiz sonuçları özellikle ova kenarındaki bir bölgede yoğunlaşmış hasarı modellemede yeterli olmamıştır.

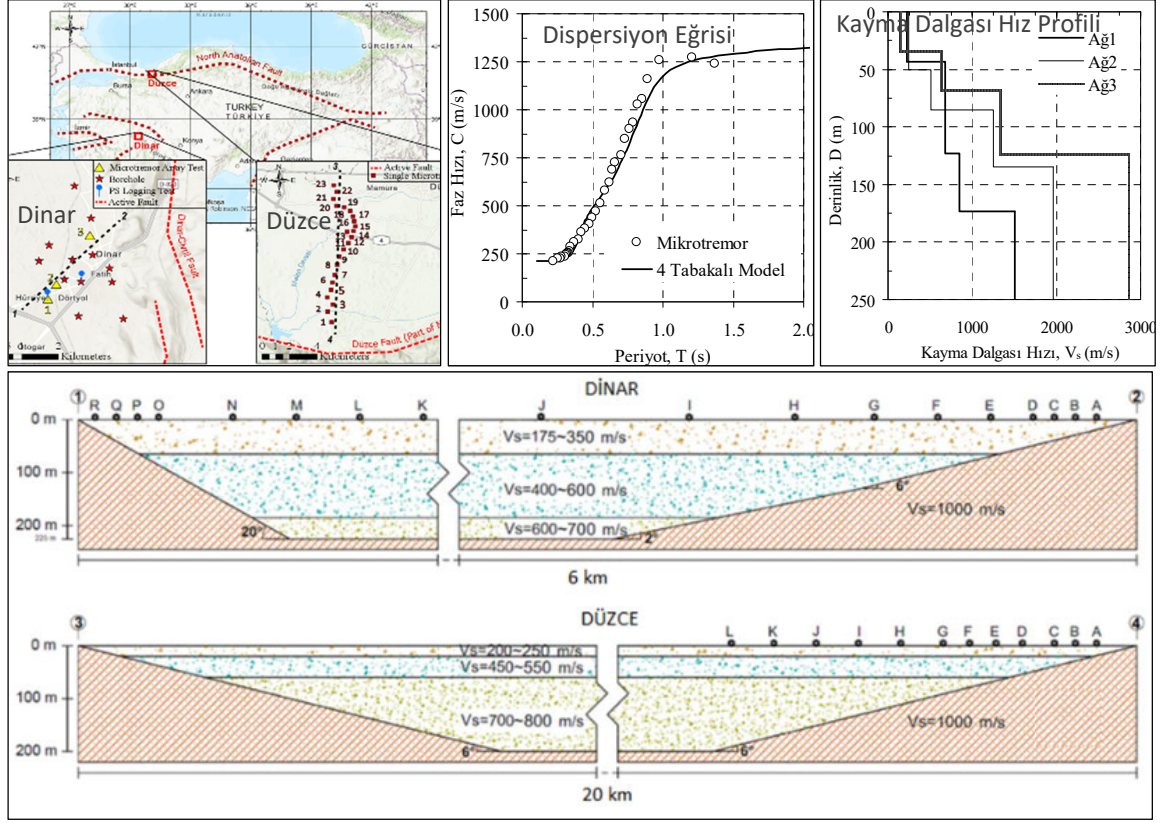


Şekil 9. Dinar'da hasar dağılımını ile yüzey ivmeleri ve zemin büyütmesi ilişkisi

Yerel zemin koşullarının hasarın tek sebebi olmadığını anlaşılması üzerine açıklığı 50~1500 m arasında değişen mikrotremor dizin ölçümleri yapılmış, alınan kayıtların f-k spektrumlarından arazi dispersiyon eğrisi ve kayma dalgasının derinlikle değişimi belirlenmiştir. Kayma dalgası hızının yaklaşık 1000 m/s olduğu değerlerde zeminin kaya olduğu kabul edilerek kenarlardaki anakaya eğimi yaklaşık olarak bulunmuştur. Aynı işlemler Düzce ovasında da yapılmış ve 2D havza geometrileri belirlenmiştir (Şekil 10). Yapılan değerlendirmelerde anakayanın en derin yerde 180~200 m olduğu anlaşılmıştır.

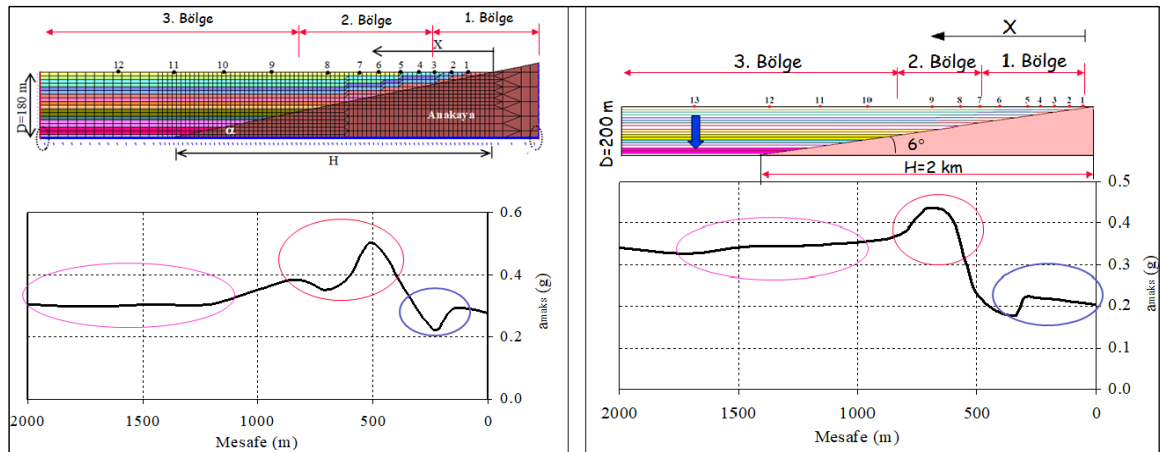
Dinar ve Düzce depremlerinde meteoroloji istasyonlarında alınan kuvvetli yer hareketi ivme kaydı, 1D geri dönüşümle anakaya ($V_s=1000$ m/s) taşınmış ve elde edilen bu ivme-zaman geçmişleri ($a_{maks}=0.11$ g), kenardaki anakaya eğiminin etkisini incelemek için kullanılmıştır. Her iki havza modelinin yüzeyinde belirlenmiş noktalarda 2D analizlerle ivme-zaman geçmişi ve mutlak ivme spektrumu elde edilmiştir.





Şekil 10. Dinar ve Düzce havza modeli

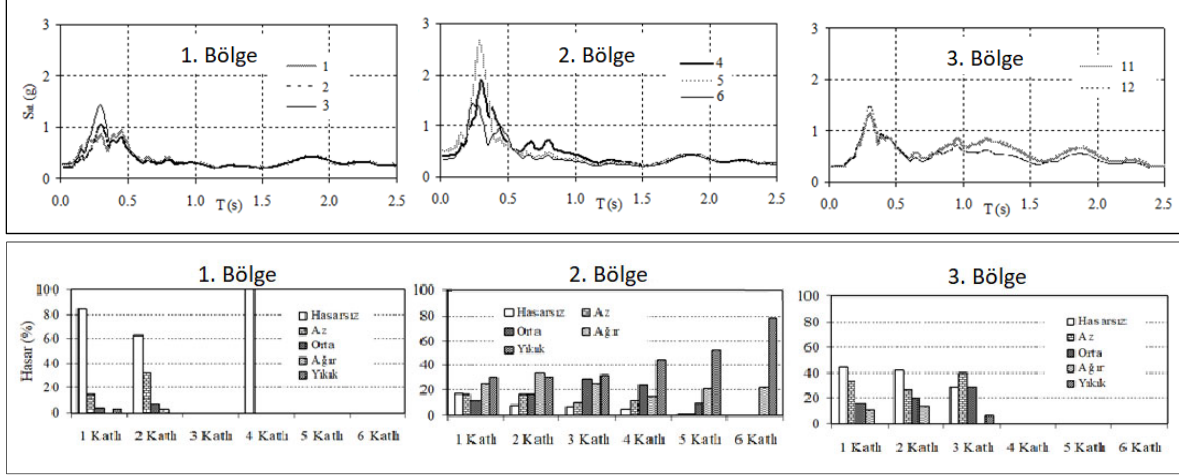
Hesaplanan en büyük yatay ivme değerlerinin mesafe ile değişimi incelendiğinde (Şekil 11), ivme değerlerinin kenarda belli bir bölgede diğerlerine oranla %30~40 artış gösterdiği ve birbirinden farklı üç ayrı bölgeye ayrılacağı görülmektedir (İyisan ve Haşal, 2011). Dinar'da hasarın yoğun olduğu 2. bölgede ivme değerlerindeki artış dikkat çekicidir ve ovanın dinamik davranışının kenardaki anakaya eğiminden etkilendiği, bu etkinin genelde anakaya mostrasından 500~700 m mesafe içerisinde kaldığı anlaşılmaktadır. Farklı noktalardaki maksimum zemin büyütme farklı periyotlarda meydana gelmektedir. Bu sonuçlar davranış analizi yapılacak sahanın ova içindeki konumunun da önemli olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 11. Dinar ve Düzce havza modelinde maksimum ivmelerin mesafe ile değişimi



Dinar'da yüzeyde hesaplanan spektral ivmelerin hasar dağılımı ile ilişkisi Şekil 12'de verilmiştir. 2D modelin yatay ivme spektrumları da benzer şekilde karakteristikleri bakımından birbirinden farklı üç ayrı bölgeye ayrılabilir. Ağır hasarın görüldüğü bölgede spektral ivme değeri diğer bölgelerin oldukça üzerindedir.

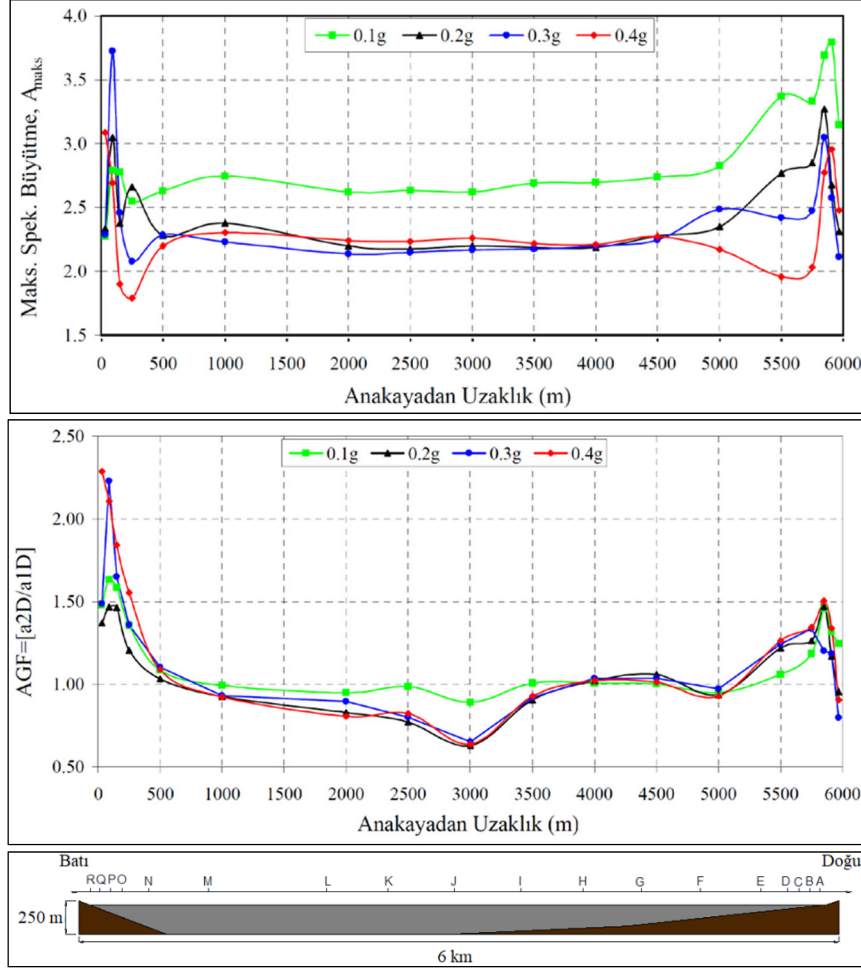


Şekil 12. Dinar'da gözlenen hasar ile ivme spektrumlarının karşılaştırılması

Kenarı eğimli anakaya olan havza modellerinde 1D ve 2D doğrusal olmayan sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla farklı ivme ve frekans içeriğine sahip kuvvetli yer hareketi altında analizler yapılmış, yüzeyde elde edilen en büyük zemin büyütmesi (A_{maks}) ve şiddet faktörü olarak değerlendirilen 2D/1D spektral ivme oranları (AGF) elde edilmiştir. Bu değerlerin mesafe ile değişimi Şekil 13'te verilmiştir (Khanbabazadeh vd., 2016). Bu şekilden de görüleceği üzere kenardaki eğimli anakaya üzerinde her ivme değerinde önemli büyütme meydana gelmektedir. Bu bölgelerde 1D ve 2D analizler arasında önemli farklılıklar oluşmakta ancak kenardan belli bir mesafeden sonra ova ortasına doğru bu fark ivme değerlerinden bağımsız olarak ortadan kalkmaktadır.

Dinar Ovası'nda 0.1 g ivme değerine sahip hareketlerin etkisi altındaki zemin büyütme daha büyük ivme değerlerine göre farklı olmaktadır. Bu ivme altında en büyük zemin büyütme 3.8 olmakta, etkisi ovanın doğusunda anakaya mostrasından yaklaşık 1500 m mesafeye kadar devam etmekte ancak ovanın ortasında tek boyutlu zemin büyütme daha kuvvetli hareketlerde meydana gelen zemin büyütmesinden daha büyük olmaktadır. 0.4 g ivme değerine sahip hareketlerin meydana getirdiği zemin büyütme ise zeminin doğrusal olmayan davranışı ve sönüm etkisi nedeniyle genelde diğerlerinden daha en düşük elde edilmiş ve etkilerinin kenardan yaklaşık 500 m mesafede azaldığı görülmüştür. Bu ivme değerlerindeki hareketlerde ovanın hem doğusunda hem de batısında daha düşük ivme değerine sahip hareketlerde görülen zemin büyütme olayından farklı bir düzenin ortaya çıktığı, havza geometrisinin davranışa önemli etkisi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Ovanın orta kısımlarında 0.4 g ivme değerindeki kuvvetli yer hareketlerinin etkisi altında meydana gelen zemin büyütme miktarının daha düşük ivme değerine sahip olan 0.2 g ve 0.3 g hareketlerdekilere yakın olduğu da görülmektedir. Benzer sonuçlar Düzce havzası için de elde edilmiş olup bulguların yer tepki analizlerinde yönteminin seçilmesinde yararlı olacağı düşünülmektedir (Haşal vd., 2018).



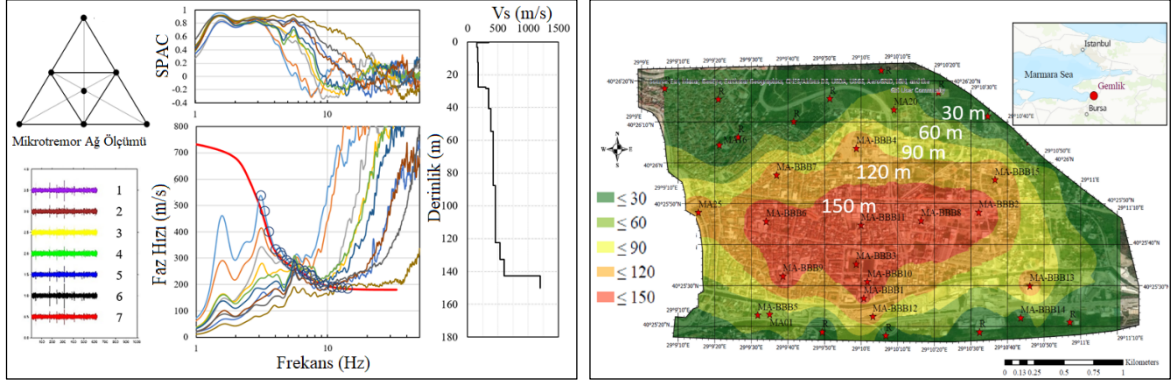


Şekil 13. Dinar'da zemin büyütmesi ve şiddet faktörlerinin mesafe ile değişimi

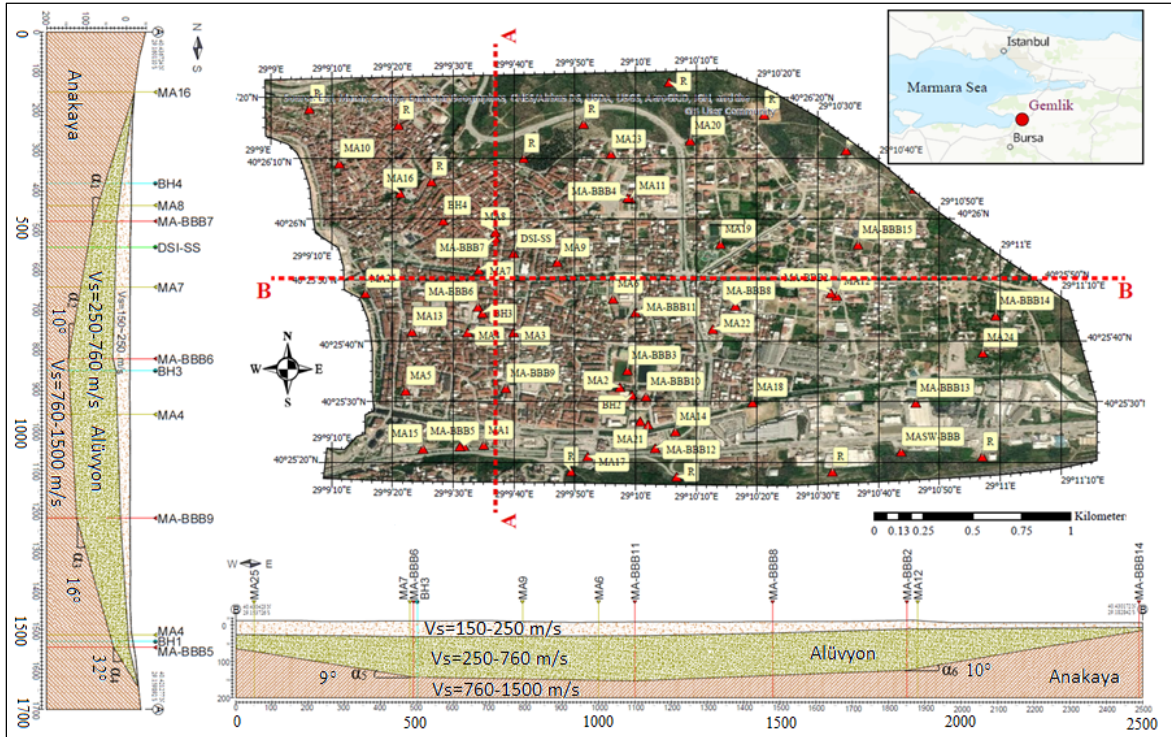
2.3. Sahaya Özel Tepki Analizlerine Havza Etkisi ve Gemlik Çalışmaları

Havza özelliklerinin kuvvetli yer hareketine etkisini incelemek, deprem yüklerini belirleyen tepki spektrumlarının hesaplanmasında havza etkilerinin şiddet faktörü ile bir boyutlu dinamik analiz sonuçlarına dahil edilebilmesini sağlamak amacıyla boyutları görece diğer çalışılanlara göre daha küçük olan Bursa ili Gemlik havzası seçilmiştir. Kuzey-güney doğrultusunda yaklaşık 1.5 km, doğu-batı doğrultusunda ise 2.5 km genişliğinde olan havza, Kuzey Anadolu Fayı'nın güneybatı kolunda iki fay segmenti ile çevrelenmiştir. Havzayı kaplayan alüvyon çökelti ve anakaya formu, çok sayıda sondaj ve mikrotremor dizin ölçümü ile değerlendirilmiştir. Mikrotremor dizin ölçümleri toplam 40 farklı araştırma noktasında açıklıkları 20~50 m arasında değişen 7 adet alıcı ile yapılmış, kaydedilen mikrotremorlar, havzanın ayrıntılı bir yeraltı modelini oluşturmak için SPAC yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir (Okada, 2006; Hayahi, vd., 2022). Bu yöntemin f-k yöntemine göre üstünlüğü yoğun yerleşim alanlarında daha küçük açıklımlarla oldukça derin tabakaların kayma dalgası hızının belirlenebilmesidir. Yapılan ölçümler sonucu elde edilen kayma dalgası hızının derinlikle değişimden benzer değerlerin birleştirilmesiyle anakaya derinliği ve Gemlik havzası geometrisi çıkarılmıştır. SPAC ölçümleri ve anakaya derinliğinin havza içinde değişimi Şekil 14'te, A-A ve B-B kesitlerinde anakaya eğimi ve havza geometrisi ise Şekil 15'te verilmiştir (Özaslan, 2021).





Şekil 14. Gemlik'te SPAC ölçümleri ve anakaya derinliğinin havza içinde değişimi

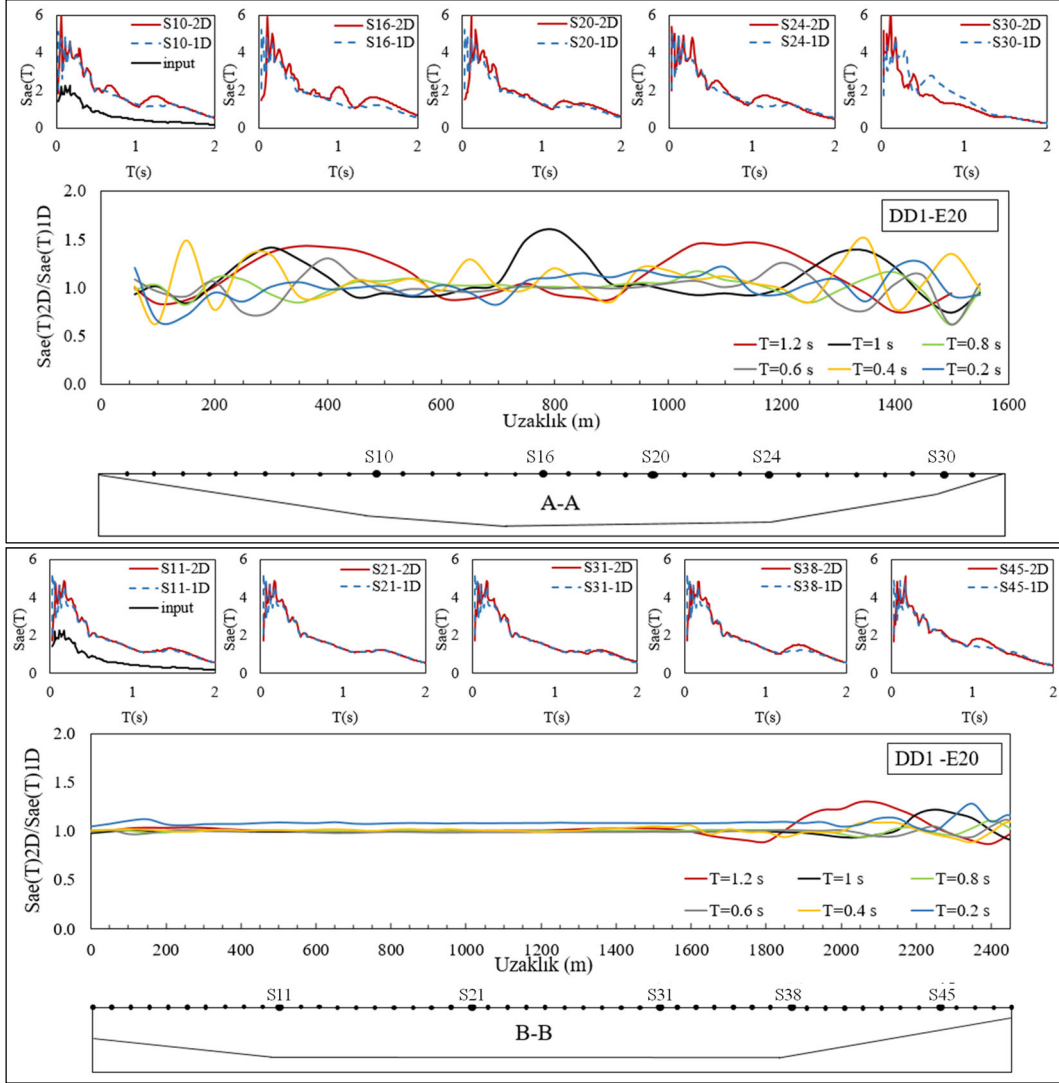


Şekil 15. A-A ve B-B kesitlerinde anakaya ve tabaka eğimlerinin değişimi – havza geometrisi

Havzanın karmaşık bir geometriye sahip eğimli bir kaya mostrası ile çevrili olduğu ve alüvyon tabakası kalınlığının merkez bölgesinde yaklaşık 140~180 m olduğu belirlenmiştir. Kayma dalga hızının iki boyutlu modelleri, havza kenarlarındaki anakaya eğimlerinin 10° ile 32° arasında değiştiğini, tabanda kısa doğrultudaki kesitte yaklaşık 400 m, diğerinde ise 1400 m ile daha geniş düz ara yüzeyler sergilediğini göstermektedir.

Havza etkilerinin deprem yer hareketi düzeyine göre değişiminin incelenmesi amacıyla Gemlik ilçesi için yatay elastik tasarım spektrumlarına uygun DD-1 ve DD-2 deprem düzeyinde 22 adet anakaya kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak 1D ve 2D sayısal analizler gerçekleştirilmiş, zemin yüzeyinde eşit aralıklarla belirlenmiş 30 adet noktada spektral ivmeler $S_{ae}(T)$ ve 2D/1D spektral ivme oranlarından şiddet faktörleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin mesafe ile değişimi A-A ve B-B kesitleri için Şekil 16'da gösterilmiştir.

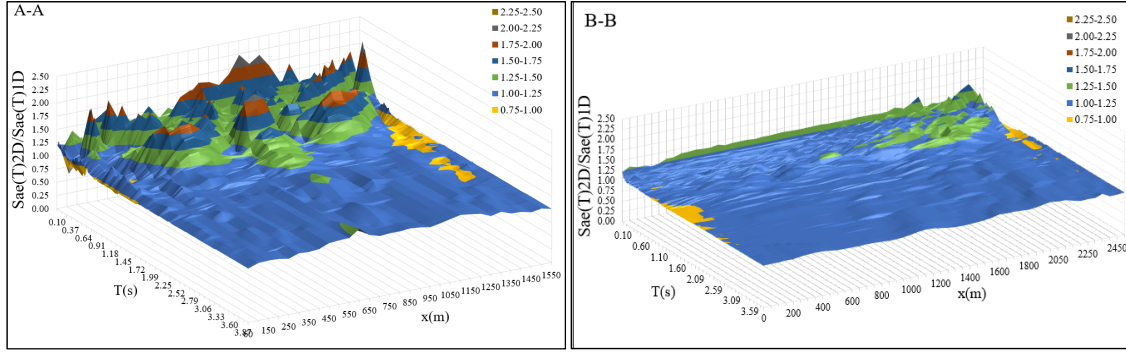




Şekil 16. Spektral şiddet faktörlerinin mesafeye bağlı değişimi

Sonuçlar incelendiğinde her deprem düzeyi için havza karşı kenarlarının birbirine daha yakın olduğu A-A kesitinde özellikle 1.0 s periyotlarında havza merkezinde bir odaklanma meydana geldiği, şiddet faktörlerinin 2 değerine yaklaştığı ve daha büyük periyotta eğimli bölgenin üzerinde 1.5 değerlerine ulaştığı anlaşılmaktadır. Daha düşük periyotlarda ise havza boyunca şiddet faktörlerin kenarlara yakın bölgede oluşan birden fazla pik değerleri gözlenmektedir. Eğiminin daha düşük olduğu B-B kesitinde, yüksek frekanslardaki şiddetlenme 1.2 değerinin altında kalmakta ve havza merkezindeki 1D ve 2D saha tepki analizi sonuçları A-A kesiti ile yaklaşık aynı kalmakta ve merkezde bir odaklanma görülmemektedir. En büyük şiddet faktörü değerleri doğu kenarına yakın olan bölümlerde 1.3-1.5 arasında elde edilmiştir. Deprem düzeyinin değişimi, eğimin az olduğu doğrultuda şiddet faktörlerinde belirgin bir fark yaratmamıştır. Havza modeli boyunca 22 depremle belirlenen şiddet faktörleri bütün noktalarda ve hesaplanan bütün periyotlarda deprem seviyelerine bağlı gruplanarak en büyük değerleri Şekil 17'de sunulmuştur. Dar kesitte deprem düzeyindeki artışın havza merkezindeki bölgede yüksek periyotlarda oluşan şiddetlenmeyi arttırdığı anlaşılmış diğer frekanslarda belirgin farklılaşma görülmemiştir.

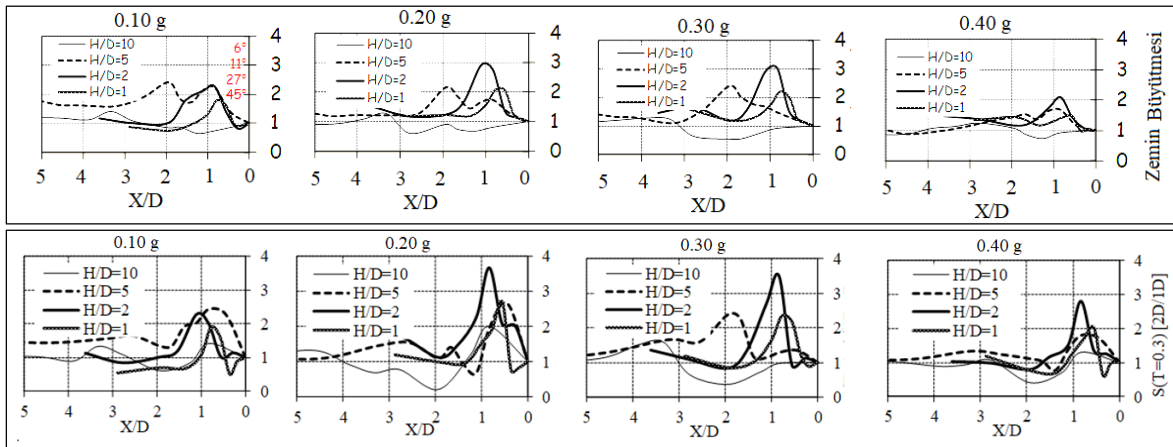




Şekil 17. En büyük spektral şiddet faktörlerinin mesafe ve periyotla değişimi

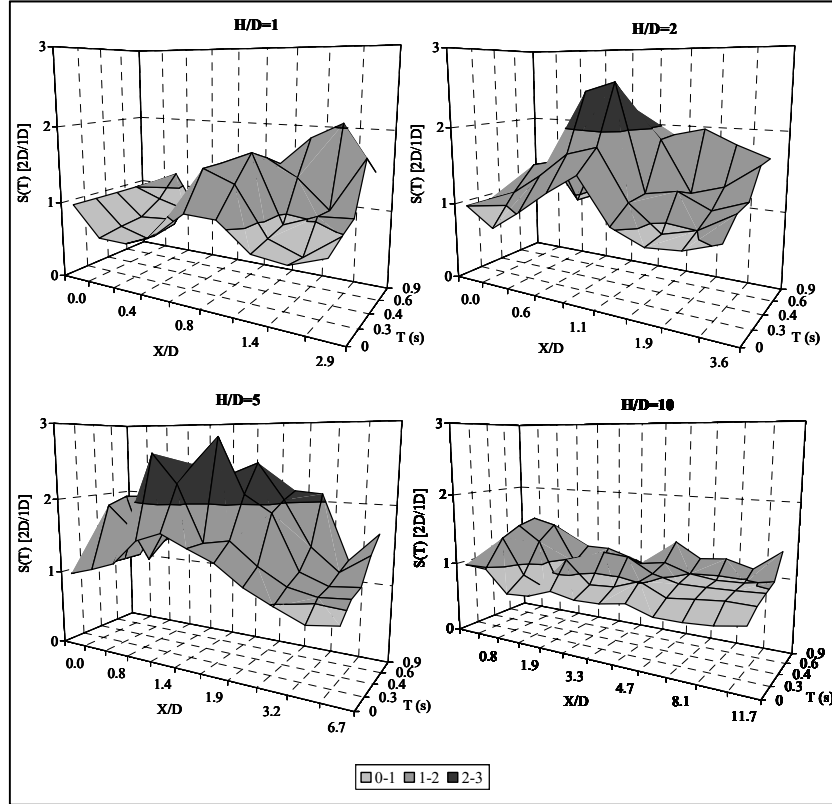
3. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARI

Anakaya eğiminin zemin yüzeyindeki deprem hareketine etkisini incelemek, analiz yöntemini ve sınırlarını belirlemek, tek boyutlu analiz sonuçlarına ikinci boyutun etkisini bir şiddet faktörü olarak dahil edebilmek ve sonuçları olabildiğince genelleştirebilmek amacıyla Dinar ve Düzce havzalarının kendi eğimini de içeren farklı modeller üzerinde farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak 1D ve 2D analizler yapılmış, yüzeyde belirlenen çok sayıda noktalarda zemin büyütme ile her periyot için 2D/1D spektral ivme oranları hesaplanmıştır. Bir örnek teşkil etmesi açısından dört farklı anakaya eğimi (yatay/düşey) $H/D=10, 5, 2, 1$ ($6^\circ, 11^\circ, 27^\circ, 45^\circ$) için yapılan analizler sonucu elde edilen zemin büyütme ile şiddet faktörü olarak tanımlanan 2D/1D spektral ivme oranları $T=0.3$ s periyot için boyutsuz mesafeye bağlı olarak Şekil 18’de verilmiştir. Farklı deprem hareketleri altında 5 ayrı periyot için hesaplanmış (2D/1D) spektral ivme oranlarının ortalama değerlerinin X/D ve periyoda bağlı değişimi dört anakaya eğimi için üç boyutlu yüzeyler biçiminde Şekil 19’da gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği üzere genelde en büyük etki $X/D=0.5\sim 2$ arasında meydana gelmekte, daha sonra her bir deprem hareketi ve farklı anakaya eğimleri için büyütme ve şiddet faktörleri birbirlerine yaklaşmaktadır. En büyük artışlar ise $H/D=2$ (27°) olduğu durumda ortaya çıkmakta, eğim arttıkça etkiler kenar bölgesine kaymakta ve daha yüksek ivme değerlerinde zemin tabakalarının doğrusal olmayan davranışı nedeniyle düşük büyütme oluşmaktadır. Farklı periyotlar için 2D/1D oranlarında $X/D < 2$ bölgesinde 2~4 kat fark artış gözlenmektedir.



Şekil 18. Farklı anakaya eğimi için hesaplanmış büyütme ve şiddet faktörlerinin mesafe ile değişimi





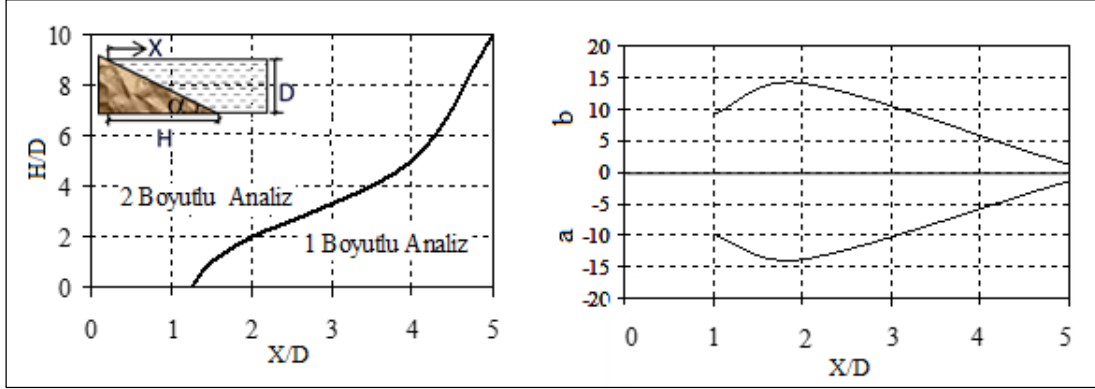
Şekil 19. 2D/1D spektral ivme oranlarının X/D ve periyoda bağlı değişimi

En yüksek şiddet faktörüne H/D=5 olan modelde ulaşmakta, daha düşük anakaya eğimlerinde spektral oranlar oldukça azalmaktadır. Bütün modeller için en yüksek değer $T=0.2\sim 0.5$ s aralığında elde edilmiştir. Hem Dinar hem de Düzce ovası modelinde ortalama şiddet faktörleri periyot değerlerinden fazla etkilenmemekte H/D=10 için X/D=5, H/D=5 için X/D=4, H/D=2 için X/D=2 ve H/D=1 için X/D=1.5 noktasından sonra genellikle 1 değerine yakınsayarak 2D etkiler azalmaktadır. Bu sonuçlar anakaya eğimi etkisinin 1D sonuçlarına 2D/1D spektral ivme oranı ile yansıtılabileceğine işaret etmektedir. Yapılan dinamik analizlerde, ova modellerinin kenarı için hesaplanan spektral oranların X/D boyutsuz büyüklüğüne bağlı değişimi incelenmiştir. Bu amaçla farklı periyotlarda hesaplanmış spektral ivme oranlarının ortalamaları alınmış ve yapılan değerlendirme sonucunda 2. boyut etkisinin hangi bölgelerde dikkate alınması gerektiği yaklaşık olarak belirlenmiş ve $X/D > 0$ olmak koşuluyla aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

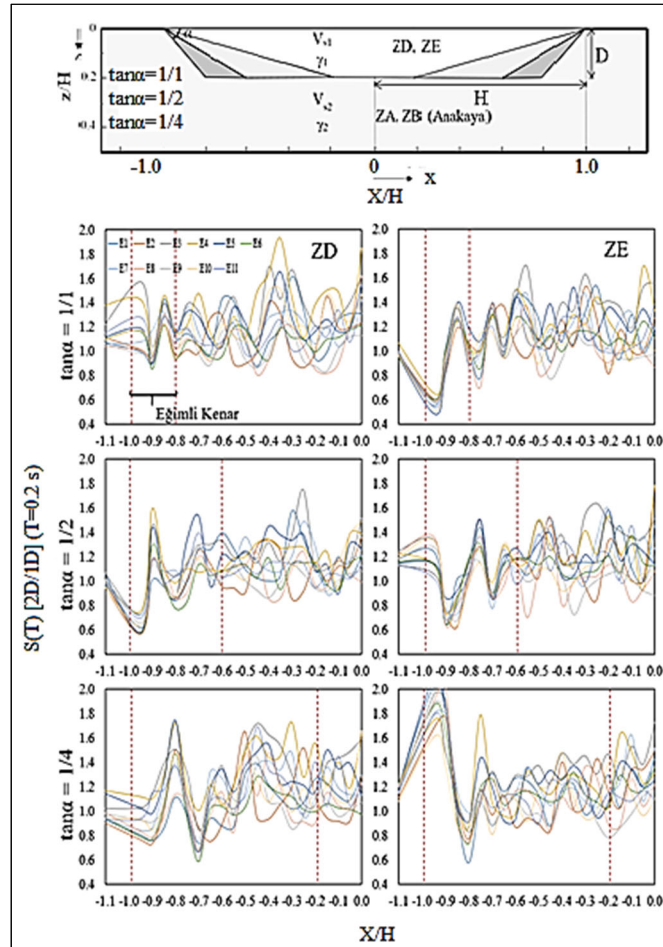
$$m = S(T) \left(\frac{2D}{1D} \right) = e^{\left\{ a + \frac{b}{(X/D)} + b \ln \left(\frac{X}{D} \right) \right\}} + 1 \quad (1)$$

Bağıntıda X ova kenarındaki anakaya sınırından uzaklığı, D derinliği, a ve b ise anakaya eğimi ve periyoda bağlı katsayıları göstermektedir. Bu katsayıların aldığı değerler birbirleri ile de ilişkili olup, spektral oranların en yüksek değerlere ulaştığı H/D=5 olan modelde bu parametreler sırasıyla 15 ve -15 değerlerini almaktadır. 1D ve 2D analizlerinin geçerli olduğu sınırlar havza geometrisine bağlı olarak Şekil 20'de grafik olarak verilmiştir. Aynı şekilde önerilen şiddet faktörünün hesaplanmasında kullanılacak katsayılar da yer almaktadır.



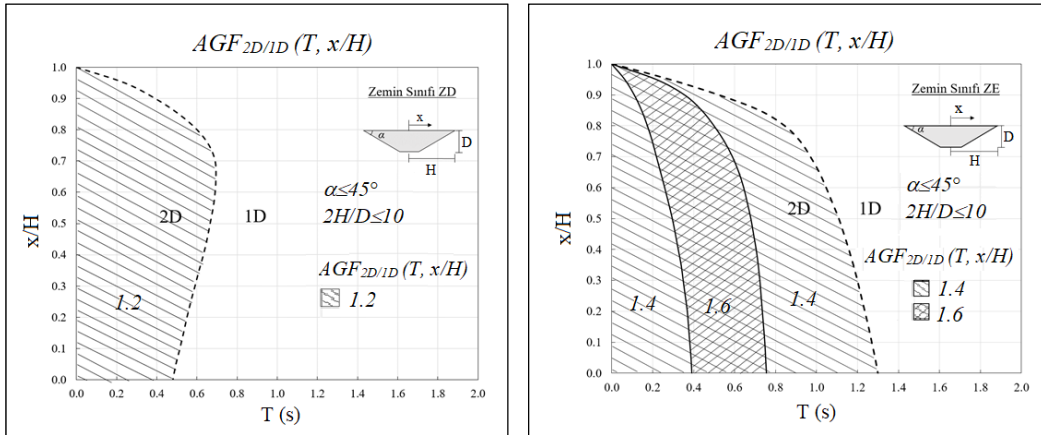


Havza yapısındaki sahalarda yüzeydeki deprem yer hareketi, eğimli ana kaya ile üstünde yer alan daha yumuşak-gevşek zemine geçiş bölgelerinde dalga dönüşümü, yansıması, belirli bölgelere odaklanması ve üst üste binmesi nedeniyle daha karmaşık bir yapıdadır. Havza etkisinin yüzeydeki deprem hareketine etkisini araştırmak amacıyla önceki yapılanlara benzer bir şekilde farklı eğime sahip Gemlik gibi dar havza modellerinde ZD ve ZE zemin sınıfı için farklı depremler kullanılarak analizler yapılmış ve şiddet faktörleri hesaplanmış ve sonuçları Şekil 21’de verilmiştir.



Analizler sonucunda özellikle yerel zemin sınıfı ZE olan modellerde 2D analizde, 1.0 s periyodunda şiddet faktörü değerinin $\tan\alpha=1/1$ eğimli modelde belirgin şekilde 1.4 değerine yükseldiği ve eğimli bölgenin hemen yanında x/H değerlerinin 0.6 ve 0.7 olduğu bir bölgede toplandığı görülmektedir. ZE sınıfı en az eğime sahip modellerde 0.2 s periyodundaki tepkilerin $x/H=-0.95$ değerinde şiddet faktörünün 2 değerine yükseldiği, yüksek frekanslı dalgaların kenara oldukça yakın bir bölgede toplandığı anlaşılmaktadır.

Yapılan sayısal analizler, etkiyi oluşturan temel değişkenlere göre incelenen modellerde elde edilen bulguların ancak genel yaklaşımlarla uygulamaya kazandırılabilceğini göstermiştir. Yapılan saha tepki analizlerinde, ZD ve ZE olmak üzere iki farklı görece yumuşak zemin sınıfından oluşan havza yapısında dar ve simetrik modeller kullanılmıştır. Bu tür havzalarda depremlerde oluşacak 2. ve 3. boyut etkilerinin, genel yaklaşımda yaygın yer bulan 1D dinamik analiz sonuçlarına dahil edilebilmesine yönelik önerilen şiddet faktörleri grafik olarak Şekil 22'de verilmiştir. Böylelikle, havza etkilerinin en çok ortaya çıktığı bölgelerin ve periyotların sayısal olarak tanımlandığı bu nicel çalışma, ortaya çıkan yer hareketlerinin güvenilir tahminine ilişkin belirsizliklerin belli oranda ortadan kaldırılmasına, deprem haritalarının geliştirilmesine ve güvenli yapılaşmaya katkı sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 22. ZD ve ZE zemin sınıfı havzalarda spektral şiddet faktörü

4. SONUÇLAR

Geoteknik deprem mühendisliğinin başlıca amacı beklenen deprem hareketi karşısında, etkileyecek olası tüm faktörleri olabildiğince dikkate alarak zemin tabakalarının davranışının incelenmesi ve depreme dirençli yapı tasarımında kullanılacak yüzeydeki en büyük ivmenin ve tasarım spektrumunun belirlenmesidir. Bu alanda beklenen gelişim, insanların yaşam alanlarındaki güvenliğinin artırılması ve yapısal hasar kaynaklı kayıpların en aza indirilmesi yönündedir. Geçmişte yaşanmış yıkıcı depremler sonrasında meydana gelen yapısal hasar ve kuvvetli yer hareketi kayıtları ile yerel zemin koşullarının ilişkili olmasının anlaşılması ile birlikte geoteknik deprem mühendisliğinde araştırmalar yoğunlaşmış, buna paralel olarak ülkemizde de önemli gelişmeler olmuştur. Bu alandaki gelişimler önce üniversitelerde kurulan laboratuvarla başlamış, akademik çalışmalar deney sonuçlarına bağlı olarak yürütülmüş, doğal koşullarda zemin tabakalarının geoteknik özelliklerini belirleme ihtiyacı ile birlikte arazi deney sonuçları laboratuvar deney sonuçlarıyla birlikte



kullanılmış, gelişen teknoloji ile birlikte bünyesinde ileri seviyede malzeme modelleri bulunduran tek ve çok boyutlu zaman veya frekans ortamında doğrusal olmayan analizlere elverişli yazılımlarla günümüze kadar gelinmiştir.

Geçmişte yaşanan depremlerden elde edilen veriler ve tecrübelerin ışığında geoteknik deprem mühendisliği alanında yapılan araştırmalar hem bilimsel camiada hem de pratik uygulamada önemli gelişmeler sağlamış ve bu gelişime İstanbul Teknik Üniversitesinin önemli katkısı olmuştur. Ülkemizde ağır kayıpların yaşandığı 1992 Erzincan, 1995 Dinar, 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri sonrasında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları, hasar analizleri, sayısal çözümlenmeler, uygulama projelerinin hazırlanması ve bilimsel çalışmaların birlikte değerlendirilmesi geoteknik deprem mühendisliğine önemli katkılar sunmuştur. Araştırmacılara önemli çalışma olanaklarının sunulduğu açık bir laboratuvar olan özellikle Erzincan depremi, geoteknik deprem mühendisliği açısından ülkemizde bir dönüm noktası olma niteliğini taşımaktadır. Burada yapılan çalışmaların, veri okuma adına kazanılan deneyimlerin olumlu etkileri sonraki depremlerde görülmüştür. Bu yazıda yakın geçmişte yaşanmış yıkıcı depremler sonrasında yapılan geoteknik incelemeler kapsamında uygulanan arazi deney yöntemleri, mikrobölgeleme çalışmaları, bir ve iki boyutlu dinamik analizlerle elde edilen tepki spektrumlarının karşılaştırması sunulmuştur. Zemin büyütmesine anakaya eğimi ve havza yapısının etkisi incelenmiş, bir ve iki boyutlu analizlerin geçerli olduğu sınırlar yaklaşık olarak belirlenmiş, ikinci boyutun etkisini dikkate alan bir şiddet faktörü ile uygulamada yaygın olan deprem hesabı yöntemlerinde eksikliği görülen havza etkilerinin tasarım yüklerine dahil edilmesini sağlayan bir yöntem önerilmiştir.

Araştırma sonuçlarının beklenmeyen hasar ve kayıpların önüne geçilmesinde yardımcı olacağı, deprem haritalarının geliştirilmesine, deprem tehlikesinin doğru tahmin edilmesine ve depreme dayanıklı yapı tasarım sürecine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Araştırmada izlenen yöntemin havza özelliği taşıyan bölgelerde gelecekte yapılacak sahaya özel incelemelerde bir yöntem olarak izlenebileceği, deprem kuşağında yer alan ülkemizde yönetmeliklerin geliştirilmesine, ekonomik ve sosyal hayatı olumsuz etkileyen hasar ve kayıpların en aza indirilmesine katkı sunacağı öngörülmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, deprem tehlikesi yüksek bölgelerde önceden edinilen bilgi ve tecrübeler ışığında teknoloji ile birlikte gelişen yeni nesil laboratuvar ve arazi deney yöntemlerinin bir program çerçevesinde kullanılarak yerel saha ve zemin koşullarının daha detaylı incelenmesi hedeflenmelidir. 3D dinamik analizler gibi ileri analiz yöntemlerinin yanı sıra, yapay zeka ve makine öğrenme destekli modelleme tekniklerinin kullanılması, deprem tepkilerinin daha doğru öngörülmesine yararlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, sismik izleme ağlarının genişletilmesi, mikrobölgeleme çalışmalarına ve yönetmelik hükümlerine yerel zemin koşullarının yanında anakaya eğimi ve havza etkisi gibi saha etkilerinin de dahil edilmesi, depremler sonucunda ortaya çıkan yapısal atıkların geri dönüştürülerek geoteknik mühendisliği projelerinde kullanılması ve dinamik yükler altında davranışının belirlenmesi deprem risk yönetimi açısından ülkemizde güvenli ve sürdürülebilir yapı tasarımlarına katkı sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Ansal, A. M., İyisan, R., and Güllü, H. (2002), "Microtremor measurements for the microzonation of Dinar", Earthquake Microzoning, 2525-2541.
- Bagheri, O. ve Bayat, E. E. (2024), "Laminar Soil Container's Performance Study for Dynamic Laboratory Tests: Comprehensive Review and Numerical Verification", KSCE Journal of Civil Engineering, 1-17.
- di Lernia, A., Papadimitriou, A. G., ve Elia, G. (2024), "Approximate decoupling of topographic, stratigraphic and valley effects on the peak seismic acceleration", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 183, 108758.
- Haşal, M. E. (2008), "Topografik Düzensizliklerin Zemin Büyütmesine Etkisi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hasal, M. E., İyisan, R. And Yamanaka, H. (2018), "Basin Edge Effect on Seismic Ground Response: A Parametric Study for Duzce Basin Case, Turkey", Arabian Journal for Science and Engineering. 43, 4, p. 2069-2081 13.
- Hayashi, K., Asten, W., Yamanaka, H. (2022), "Microtremor array method using spatial autocorrelation analysis of Rayleigh-wave data", J Seismol, 26:601–627.
- Güllü, H. (2001), "Dinar'ın Zemin Büyütmelerine göre Coğrafik Bilgi Sistemleri ile Mikrobölgelemesi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İyisan, R. (1996), "Zeminlerde kayma dalgası hızı ile penetrasyon deney sonuçları arasındaki bağıntılar", Teknik Dergi, Vol 7, 32.
- İyisan, R., ve Ansal, A. (1993), "Erzincan'da dinamik zemin özelliklerinin kuyu içi sismik yöntemlerle belirlenmesi", 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 10-13.
- İyisan, R., and Haşal, M. E. (2011), "The basin edge effect on dynamic response: Dinar basin model", Teknik Dergi, Vol 22, 1499-1518.
- İyisan, R., and Khanbabazadeh, H. (2013), "A numerical study on the basin edge effect on soil amplification", Bulletin of Earthquake Engineering, 11(5), 1305-1323.
- Khanbabazadeh, H. (2014), "The effect of the bedrock slope on the soil amplification", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Khanbabazadeh, H., İyisan, R., Ansal, A., and Hasal, M. E. (2016), "2D non-linear seismic response of the Dinar basin, Turkey", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 89, 5-11.
- Lav, A., Erken, A., İyisan, R., ve Ansal, A. (1993), "Erzincan'da yerel zemin koşulları ve yapısal hasar üzerindeki etkisi". Türkiye İnşaat Mühendisliği, Vol 12, 25-39.
- Okada, H. (2006), "Theory of Efficient Array Observations of Microtremors with Special Reference to the SPAC Method", Exploration Geophysics, 37 (1): 73–85.
- Özaslan, B. (2021), "Sahaya Özel Tasarım Spektrumlarının Belirlenmesinde Yerel Zemin Koşulları ve Havza Etkisi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Özaslan, B., İyisan, R., Hasal, M. E., Khanbabazadeh, H., and Yamanaka, H. (2022), "Assessment of the design spectrum with aggravation factors by 2D nonlinear numerical analyses: a case study in the Gemlik Basin, Turkey", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 20, 1371-1395.
- Özaydın, K. (2021), "Türkiye'de Geoteknik Deprem Mühendisliğinde Gelişmeler", İMO İstanbul Bülten, Sayı 169, 4-14.
- Pitilakis, K. (2004), "Site effects. In Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation", Dordrecht: Springer Netherlands, 139-197.

