KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BETONARME KAZIKLARDA TDR YÖNTEMİYLE HASAR TESPİTİ

MEHMET ÖZGÜR

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

BETONARME KAZIKLARDA TDR YÖNTEMİYLE HASAR TESPİTİ

MEHMET ÖZGÜR

Prof. Dr. Sami ARSOY **Danışman, Kocaeli Üniv.**	.....
Prof. Dr. Erhan BÜTÜN **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	.....
Prof. Dr. Semih KÜÇÜKARSLAN **Jüri Üyesi, İTÜ**	.....
Prof. Dr. Seyhan FIRAT **Jüri Üyesi, Gazi Üniv.**	.....
Yrd. Doç. Dr. Berna UNUTMAZ **Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.04.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yapısal hasar görüntüleme son yıllarda gelişen teknolojinin kazandırdığı ivme ile her türlü alanda olduğu gibi inşaat mühendisliği alanında da daha sık kullanılmaya başlamıştır. Yapılarda can güvenliğinin arttırılmasının yanı sıra yapıların mümkün olan en uzun süre kullanımda kalmaları ve bu süre boyunca tadilat masraflarının en aza indirilmesi gibi sosyal ve ekonomik faydalarıyla yapısal hasar görüntüleme ulusal menfaatler açısından da önemli bir araçtır. Bu aracın en etkin şekilde kullanılabilmesi için yapılan çalışmalar ile Zaman Tanım Alanında Yansıma (Time Domain Reflectometry) yöntemi ülkemizde ilk kez yapısal hasar görüntüleme yöntemi olarak kullanılmıştır.

Bana bu konuda çalışma fırsatı veren ve bu çalışmanın bir tez olarak değer kazanmasında fikirleri ile destek olan KOÜ İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof. Dr. Sami ARSOY'a teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem Suham ÖZGÜR'e ve rahmetli babam Mustafa ÖZGÜR'e sonsuz minnetlerimi sunarken sevgili eşim Meltem Tarı ÖZGÜR'e bana vermiş olduğu sevgi, moral ve destek için sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK'ın 108M297 numaralı "Kazık Hasarlarının İnovatif Yaklaşımla Hızlı Belirlenmesi" projesinden sağlanan destek ile gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple desteğinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Mart-2013 Mehmet ÖZGÜR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ ix
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR x
ÖZET xiv
ABSTRACT xv
GİRİŞ 1
1. TDR YÖNTEMİ 4
1.1. Ölçüm Prensipleri 5
1.1.1. Empedans 5
1.1.2. Yansıma katsayısı 6
1.1.3. İletim hızı 9
1.2. Çoklu Empedans Eşleşmezliği 14
1.3. Çözünürlük 15
1.4. Ölçümü Etkileyen Faktörler 18
1.5. Voltaj Duran Dalga Oranı ve Eşleşmezlik Kaybı 21
2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE TDR UYGULAMALARI 23
2.1. Zeminlerin Hacimsel Su İçeriğinin Belirlenmesi 23
2.2. TDR ile Şev Stabilitesinin Kontrolü 32
2.3. TDR Yöntemi ile Yapısal Hasarların Belirlenmesi 40
2.4. İnşaat Mühendisliğinde Diğer TDR Uygulamaları 46
3. KAZIKLAR VE HASARLARININ BELİRLENMESİ 51
3.1. Kazıklı Temeller 51
3.2. Kazıklarda Muhtemel Göçme Mekanizmaları 58
3.3. Gözlemlenmiş Kazık Hasarları 64
3.3.1. Showa Köprüsü (Niigata Depremi, 1964) 64
3.3.2. Niigata Family Court House Binası (Niigata Depremi, 1964) 67
3.3.3. NHK Binası (Niigata Depremi, 1964) 69
3.3.4. Landing Köprüsü (Edgecumbe Depremi, 1987) 71
3.3.5. On katlı betonarme bina (Mexico City Depremi, 1985) 73
3.3.6. Higashi-Nada Binası (Kobe Depremi, 1995) 74
3.3.7. Hanshin Otoyolu (Kobe Depremi, 1995) 75
3.4. Gözlemlenmiş Kazık Performanslarının ve Göçme Mekanizmalarının Özeti 76
3.5. Kazık Hasarlarının Belirlenmesi için Kullanılan Mevcut Yöntemler 78
3.5.1. Gerilme Dalgasına Dayalı Yöntemler 78
3.5.1.1. Sonik yansıma (Sonic echo) yöntemi 81
3.5.1.2. İmpuls yanıtı (impulse response) yöntemi 83
3.5.1.3. Empedans kaydı (impedance logging) yöntemi 86
3.5.1.4. Çok kanallı sonik kayıt (cross-hole sonic logging, CSL) yöntemi 87
3.5.1.5. Paralel sismik yöntemi 89

3.5.2. Nükleer yöntem (Gamma-gamma logging, GGL) 90
3.5.3. Radar yöntemi (Ground penetrating radar, GPR) 92
3.6. Kazık Hasarlarının Belirlenmesinde Kullanılan Mevcut Yöntemlerin Özeti 93
4. MALZEME VE YÖNTEM 94
4.1. Genel 94
4.2. Malzeme 94
4.2.1. Beton ve donatı çeliği 94
4.2.2. Sensör kablo 96
4.3. Numune Geometrisi 97
4.4. Üç Noktalı Eğilme Testi 98
4.5. Yükleme ve Ölçüm Prosedürü 100
4.6. TDR ile Kazıklarda Yapısal Hasar Görüntüleme Yaklaşımı 103
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 106
5.1. Genel 106
5.2. Eğilme Testi Sonuçları 106
5.2.1. RG59/U-6 S1 M numunesi 111
5.2.2. RG6/U-4 S1 M numunesi 117
5.2.3. RG59/U-6 S1 N numunesi 120
5.2.4. RG6/U-4 S1 N numunesi 123
5.2.5. RG59/U-6 S2 N-M numunesi 126
5.2.6. RG6/U-4 S2 N-M numunesi 129
5.2.7. RG S2 M-M numunesi 132
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 136
KAYNAKLAR 138
EKLER 146
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 159
ÖZGEÇMİŞ 160

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. TDR bileşenleri ve ölçüm prensibi (HP, 1988) 4
Şekil 1.2. Koaksiyel kablonun yapısı 5
Şekil 1.3. İletim hattı (Bird, 2003) 7
Şekil 1.4. Z_i empedanslı hatlarda farklı sonlandırmalar için yansıma katsayıları 8
Şekil 1.5. Z_i =50 ohm için yansıma katsayısının Z_t ile değişimi 9
Şekil 1.6. Hız testi düzeneği 11
Şekil 1.7. RG59U4 kablo sensörün hız testi 12
Şekil 1.8. Birinci türev yöntemi (Drnevich ve diğ., 2003) 13
Şekil 1.9. Birinci türev yöntemine örnek bir uygulama 13
Şekil 1.10. Çoklu empedans eşleşmezliği (Lin ve Thaduri, 2005) 14
Şekil 1.11. Bir iletim hattında iki empedans eşleşmezliği 14
Şekil 1.12. İki empedans eşleşmezliği durumunda örnek iletim hattında voltaj değerleri 15
Şekil 1.13. TDR cihazlarında çözünürlük problemi (Agilent Technologies, 2003) 16
Şekil 1.14. (a) Adım başlangıç sinyali (b) İmpuls başlangıç sinyali (Picosecond, 2004) 17
Şekil 1.15. Aşma, düşme ve stabilizasyon süresi 18
Şekil 1.16. Farklı desibel seviyelerinde oluşan kayıplar 19
Şekil 1.17. Farklı uzunluklar için düzeltilmemiş yansıma katsayıları 20
Şekil 2.1. HSİ ölçümü için örnek düzenek (Blonquist ve diğ., 2005) 24
Şekil 2.2. Zemin numunesinden alınan TDR ölçümü 25
Şekil 2.3. Zemin numunesinde farklı HSİ değerlerinde yapılan TDR ölçümleri 26
Şekil 2.4. Zemin bileşenlerinin kutuplanması (Hilhorst ve diğ., 2000) 27
Şekil 2.5. Farklı prob konfigürasyonları ile oluşan elektriksel alanlar (Jones ve diğ., 2002) 29
Şekil 2.6. Farklı yaklaşımlarla ε_s-θ_v ilişkisi (Jones ve diğ., 2002) 31
Şekil 2.7. TDR ile kayma düzleminin belirlenmesi (Lin ve diğ., 2006) 32
Şekil 2.8. Kablo sensör parametrelerinin belirlenmesi için kurulan test düzeneği 33
Şekil 2.9. Yansıma katsayısının kayma deformasyonu ile değişimi 34
Şekil 2.10. Kesme kutusu deneyi (Lin ve diğ., 2006) 35
Şekil 2.11. Kesme kutuları ve deney düzeneği (Dennis ve diğ., 2006) 36
Şekil 2.12. Kayma deformasyonu ve yansıma katsayısının (Dennis ve diğ., 2006) 36
Şekil 2.13. Kayma deformasyonu ile yansıma katsayısının değişimi (Dennis ve diğ., 2006) 37
Şekil 2.14. Kesme kutusu deneyi (Blackburn, 2002) 38
Şekil 2.15. Yansıma genliği ve genişliği (Bordas, 1998) 39
Şekil 2.16. Yansıma genişliğinin cihaza olan uzaklıkla değişimi (Bordas,

1998) 40
Şekil 2.17. Farklı kablo sensörlerin hassasiyetleri (Lin ve diğ., 2003) 41
Şekil 2.18. Kiriş kalıp planı ve deney düzeneği (Lin ve diğ., 2003) 41
Şekil 2.19. Farklı yük seviyelerinde yansıma katsayıları, solda 1. yükleme, sağda 2. yükleme (Lin ve diğ., 2003) 42
Şekil 2.20. Özel tasarım kablo sensör ve hasar oluşumu (Chen ve diğ., 2005) 43
Şekil 2.21. Kablo sensör (Chen ve diğ., 2005) 43
Şekil 2.22. Burulma test düzeneği (Chen ve diğ., 2005) 44
Şekil 2.23. Yakın uç (solda) ve uzak uç (sağda) ölçümleri (Chen ve diğ., 2005) 44
Şekil 2.24. Kazık profili ile empedans değişimi (Tang ve Yeung, 2006) 45
Şekil 2.25. Köprü ayağında çökelti yüksekliğinin izlenmesi (Yu ve Yu, 2009) 46
Şekil 2.26. Çökelti kalınlığı ile voltaj değişimi (Yu ve Yu, 2009) 47
Şekil 2.27. Paslanmanın TDR sinyaline etkisi (Liu ve diğ., 2002) 48
Şekil 2.28. Zemin çivisi içinde iletim hattı (Cheung ve Lo, 2011) 49
Şekil 2.29. Farklı kusurlarda TDR sinyalleri (Cheung ve Lo, 2011) 49
Şekil 2.30. Silindir numuneler için geliştirilen tüp sensör (Yu ve Liu, 2010) 50
Şekil 2.31. Kür süresine bağlı olarak TDR sinyalleri (Yu ve Liu, 2010) 50
Şekil 3.1. Kazıklarla zemin hareketinin sınırlandırılması (Ang, 2005) 52
Şekil 3.2. Fore kazığın yapım aşamaları 54
Şekil 3.3. Tekil kazığın serbest cisim diyagramı 55
Şekil 3.4. Düşey yük altında kazık kapasitesinin bileşenleri (Neil ve Reese, 1999) 55
Şekil 3.5. Zemin-kazık sistemi için eşdeğer konsol yaklaşımı (Haldar ve Babu, 2009) 57
Şekil 3.6. Kazıklarda pasif yatay yüklerle hasar oluşum mekanizmaları (Kanagasabai, 2010) 59
Şekil 3.7. Tekil kazıkların yatay yük altında göçme modları (Poulos ve Davis, 1980; Phanikanth ve diğ., 2010) 60
Şekil 3.8. Mesnetlenme şartlarına göre efektif burkulma uzunlukları 61
Şekil 3.9. Burkulma büyütme katsayısının eksenel yük oranıyla değişimi 62
Şekil 3.10. Burkulmanın modellenmesi ve ankastrelik noktası 63
Şekil 3.11. Showa köprüsünün çöken tabliyeleri (Nisee e-kütüphanesi) 65
Şekil 3.12. Deprem sonrası Showa köprüsünün şematik gösterimi (Takata ve diğ., 1965) 65
Şekil 3.13. P4 aksından çıkartılan kazığın deformasyon geometrisi (Fukuoka, 1966) 66
Şekil 3.14. NFCH binasından çıkartılan 2 kazığın yerleşimi (Madabhushi ve diğ., 2009) 67
Şekil 3.15. NFCH binası kazıklarında hasar paterni (Bobet ve diğ., 2001) 68
Şekil 3.16. NFCH binası kazıklarında hasarlar; a) 1 nolu kazığın üst kısmı b) 2 nolu kazığın alt kısmı c) 2 nolu kazığın üst kısmı (Madabhushi ve diğ., 2009) 68
Şekil 3.17. NFCH binasında 2 nolu kazık hasarının şematik gösterimi (Hamada, 1991) 69
Şekil 3.18. NHK binasının altında hasarlı betonarme kazıklar (Hamada, 1991) 70
Şekil 3.19. NHK binası kazıklarından birinde oluşan kırılmalar ve ötelenme (Hamada, 1992) 70
Şekil 3.20. Landing Köprüsü'nün havadan görünümü (Madabhushi ve diğ.,

2009) 71
Şekil 3.21. Landing Köprüsü'nün taşıyıcı sistemi (Yasuda ve Berrill, 2000) 72
Şekil 3.22. Landing Köprüsü kazıklarında oluşan plastik mafsallar (Berrill ve diğ., 2001) 72
Şekil 3.23. Mexico City depreminde devrilen bina (Mendoza ve Auvinet, 1988) 73
Şekil 3.24. Aynı bina altında kazıklarda iki farklı göçme paterni (Tokimatsu ve diğ., 1998) 74
Şekil 3.25. Hanshin otoyolunun 211 nolu köprü ayağı altındaki kazıklardan ikisinde gözlemlenen hasar paterni (Ishihara ve Cubrinovski, 1998) 75
Şekil 3.26. Kobe (1995) depreminde Port Island adasında kazıkta kesme göçmesi (Sitar, 1995) 77
Şekil 3.27. Loma Prieta (1989) depreminde Oakland Liman'ında bir eğimli kazık göçmesi (Eugene ve Meehan, 1991) 77
Şekil 3.28. Sonik yansıma yöntemi (Huang ve diğ., 2010) 82
Şekil 3.29. Hasar derinliğinin sonik yansıma genliğine etkisi (Huang ve diğ., 2010) 82
Şekil 3.30. İmpuls yanıtı test sonucu (ACI 228.2R, 2004) 83
Şekil 3.31. Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarlanan kazığın (a) hasar noktası (b) kesiti ve üzerindeki alıcı konumları (Ni ve Huang, 2012) 84
Şekil 3.32. Sonik yansıma ve impuls yanıtı yöntemi ile kazık bütünlüğü test sonuçlarının alıcı konumu ile değişimi (a) OA (b) OB (c) OC (d) OD (e) OE (Ni ve Huang, 2012) 85
Şekil 3.33. Empedans kaydı ölçümü ile kazık kesit profilinin elde edilişi (a) hasarlı üretilmiş kazık (b) Yansıma grafiği (c) impuls kaydı ile birleştirilen sonik yansımadan sağlanan görsel kazık profili (ACI 228.2R, 2004) 87
Şekil 3.34. CSL yöntemi çalışma prensibi ve örnek bir tüp yerleşimi 87
Şekil 3.35. Hasarlı bir kazıktan alınan CSL testi sonucu (ACI 228.2R, 2004) 88
Şekil 3.36. CSL testi ile hasarlı ve hasarsız kazık örnekleri 89
Şekil 3.37. Paralel sismik yöntemi (a) Ölçüm bileşenleri (b) Tipik bir sinyal iletim süresi - derinlik ilişkisi (Ni ve diğ., 2011) 90
Şekil 3.38. Çelik ve plastik tüplerle gerçekleştirilen GGL testinin sonuçları (Baker ve diğ., 1993) 91
Şekil 3.39. GPR yöntemi ile kazık bütünlüğünün irdelenmesi (Chakraborty ve Brown, 1997) 92
Şekil 4.1. Beton presi 95
Şekil 4.2. Temsili kazıkların kesit özellikleri ve kalıp planları (a) tek sensörlü kesit (b) çift sensörlü kesit 97
Şekil 4.3. Numuneler için kullanılan kalıp 98
Şekil 4.4. Yükleme düzeneği 99
Şekil 4.5. Numune yükleme geometrisi ve kesit tesirleri (a) Yükleme geometrisi (b) Kesme kuvveti diyagramı (c) Moment diyagramı 100
Şekil 4.6. Ölçüm sistemi 101
Şekil 4.7. TDR100 cihazı 102
Şekil 4.8. TDR ölçüm sisteminin bileşenleri 103
Şekil 4.9. PCTDR yazılımının arayüzü 103
Şekil 4.10. Açık uç ve kısa devre sonlandırmaları 104
Şekil 4.11. Kazıklarda TDR ile yapısal hasar görüntüleme yaklaşımı 105

Şekil 5.1. Çekme donatılı kesitte birim deformasyon dağılımı ve kuvvet çifti..... 107
Şekil 5.2. Çatlamış kesit tarafsız ekseni..... 110
Şekil 5.3. RG59/U-6 S1 M numunesi referans ölçümü 111
Şekil 5.4. RG59/U-6 S1 M numunesinin yük-deplasman eğrisi..... 112
Şekil 5.5. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak gelişiminin TDR ölçümleri ile izlenmesi..... 113
Şekil 5.6. RG59/U-6 S1 M numunesi TDR ölçümleri üzerinde yük-deplasman eğrisi noktaları..... 114
Şekil 5.7. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak paterni..... 114
Şekil 5.8. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak paterni..... 115
Şekil 5.9. İntegral alma yöntemiyle TDR ölçümünün değerlendirilmesi 115
Şekil 5.10. Türev alma yöntemiyle TDR ölçümünün değerlendirilmesi 116
Şekil 5.11. Göçme yükü ve referans ölçümü yansıma eğimleri..... 117
Şekil 5.12. RG6/U-4 S1 M numunesi yük deplasman eğrisi 118
Şekil 5.13. RG6/U-4 S1 M numunesi çatlak paterni..... 118
Şekil 5.14. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti 119
Şekil 5.15. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 119
Şekil 5.16. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 120
Şekil 5.17. RG59/U-6 S1 N numunesi yük deplasman eğrisi..... 120
Şekil 5.18. RG59/U-6 S1 N numunesi çatlak paterni 121
Şekil 5.19. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin TDR ile tespiti..... 122
Şekil 5.20. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 122
Şekil 5.21. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 123
Şekil 5.22. RG6/U-4 S1 N numunesi yük deplasman eğrisi 123
Şekil 5.23. RG6/U-4 S1 N numunesi çatlak paterni 124
Şekil 5.24. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin TDR ile tespiti..... 125
Şekil 5.25. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 125
Şekil 5.26. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 126
Şekil 5.27. RG59/U-6 S2 N-M numunesi yük deplasman eğrisi 126
Şekil 5.28. RG59/U-6 S2 N-M numunesi çatlak paterni 127
Şekil 5.29. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti..... 128
Şekil 5.30. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 128
Şekil 5.31. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 129
Şekil 5.32. RG6/U-4 S2 N-M numunesi yük deplasman eğrisi 130
Şekil 5.33. RG6/U-4 S2 N-M numunesi çatlak paterni 130
Şekil 5.34. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti..... 131
Şekil 5.35. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 132
Şekil 5.36. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 132
Şekil 5.37. RG S2 M-M numunesi yük deplasman eğrisi..... 133

Şekil 5.38. RG S2 M-M numunesi çatlak paterni 133
Şekil 5.39. RG S2 M-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti..... 134
Şekil 5.40. RG S2 M-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi 134
Şekil 5.41. RG S2 M-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi 135

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yükselme süresine bağlı çözünürlük değerleri (Tektronix, 2006) 16
Tablo 2.1. Zemin bileşenlerinin dielektrik katsayıları (Robinson, 2004) 24
Tablo 2.2. Prob konfigürasyonları (Lin ve diğ., 2006) 30
Tablo 3.1. Farklı malzemelerin akustik empedans değerleri (Sansalone ve Carino, 1991) 80
Tablo 3.2. Kazık hasarları için mevcut yöntemlerin kolaylıkları ve zorlukları 93
Tablo 4.1. Beton karışım tasarımı 95
Tablo 4.2. Sensör kabloların özellikleri 96
Tablo 4.3. Numunelerin tanıtımı 98
Tablo 5.1. Basınç dayanımına bağlı olarak betonun elastisite modülü için önerilen bağıntılar 109

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

a : Koaksiyel kablo iç iletken çapı
A : Düzeltme katsayısı
$A(T)$: Spektral ivme katsayısı
A_p : Kazık kesit alanı
A_s : Donatı alanı
A_z : Akustik empedans
b : Koaksiyel kablo dış iletken çapı
b_w : Kiriş genişliği
b_{wh} : Bant genişliği
b_{wc} : Kesim frekansı
c : Işık hızı
C : Kapasitans
C_p : P dalgası yayılma hızı
C_r : Yüzey dalgası yayılma hızı
C_s : S dalgası yayılma hızı
c_z : Zemin kohezyon katsayısı
d : Faydalı derinlik
D : Kazık çapı
D_f : Ankastrelik noktasının sıvılaşabilir zemin tabakasına olan uzaklığı
e_0 : Sensörün birim deformasyonu
E_p : Kazık malzemesi elastisite modülü
E_s : Donatı elastisite modülü
f : Birim sürtünme direnci
f_{3dB} : 3 dB frekansı
F_c : Beton gerilme bloğunun oluşturduğu kuvvet
f_{ck} : Beton basınç dayanımı
f_m : Mobilite-frekans eğrisinde doğrusal bölgenin bittiği frekans
f_r : Beton kopma modülü
F_{st} : Donatı alanında oluşan kuvvet
f_{su} : Donatı kopma dayanımı
f_y : Donatı akma dayanımı
G : Betonun kayma modülü
h : Kiriş yüksekliği
h_{te} : Tarafsız eksen derinliği
$h_{te,cr}$: Çatlamış kesit tarafsız eksen derinliği
I : Akım
I_{cr} : Çatlamış kesit atalet momenti
I_e : Efektif atalet momenti
I_g : Brüt atalet momenti
I_p : Kazık atalet momenti
k_d : Kazık dinamik rijitliği
k_h : Yatak katsayısı

l : Uzunluk
L : İndüktans
L_a : Kazığın zemin kotunun üstündeki uzunluğu
L_e : Efektif burkulma uzunluğu
L_f : Soketlenme derinliği
M : Moment
M_a : Belirli bir anda oluşan moment
M_{cr} : Çatlama momenti
M_{maks} : Kazığın taşıyabileceği en büyük moment
ml : Eşleşmezlik kaybı
M_p : Kazık kütlesi
M_y : Akma momenti
M_u : Göçme momenti
n : Porozite
N : Kazık düşey kapasite katsayıları
N_p : Mobilite
N_{pm} : Mobilite-frekans eğrisinde doğrusal bölgenin bittiği mobilite değeri
os : Aşma oranı
p : Sinyal gücü
P : Yük
P_{cr} : Çatlama yükü
P_e : Kritik burkulma yükü
Q : Elektriksel yük
Q_p : Kazık uç direnci
Q_s : Kazık çeper sürtünmesi
Q_u : Kazık düşey yük taşıma kapasitesi
r : Çözünürlük
R : Direnç
$R(T)$: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_a : Akustik kayıp oranı
R_D : Çatlak yüksekliğinin kazık çapına oranı
R_f : Rijitlik faktörü (yatak katsayısının değişmediği zeminlerde)
s : Beton gerilme bloğu yüksekliği
S : TDR sensörünün kayma deformasyonuna olan hassasiyeti
t : Zaman
T : Rijitlik faktörü (yatak katsayısının derinlikle değiştiği zeminlerde)
T_1 : Binanın birinci doğal titreşim periyodu
t_d : Yükselme süresi (impuls sinyal için)
t_g : Zaman gecikmesi
t_r : Yükselme süresi (adım sinyal için)
V : Voltaj
V_p : Sinyal iletim hızı
V_t : Kazık yatay kuvveti
W : Üst yapı ağırlığı
wr : Voltaj duran dalga oranı
X : Reaktans
z : Kuvvet çifti arası uzunluğu
Z : Empedans
Z_c : Koaksiyel kablo empedansı

α : Beton gerilme bloğu genişliği çarpanı
β : Beton gerilme bloğu yükseklik çarpanı
γ : Betonun yoğunluğu
γ_s : Zemin birim hacim ağırlığı
Δ : Kiriş orta noktasının düşey deplasmanı
δ : Kayma deformasyonu
δ_0 : Eşik kayma deformasyonu
δ_p : Kazık başındaki yatay ötelenme
δ_{sens} : Sensörün kayma deformasyonu
ε : Mutlak manyetik iletkenlik
ε_0 : Boşluğun manyetik iletkenliği
ε'_r : Rölatif manyetik iletkenlik (dielektrik sabiti)
ε_a : Havanın dielektrik sabiti
ε_s : Zeminin dielektrik sabiti
ε_{sb} : Zemin bulk dielektrik sabiti
ε_w : Suyun dielektrik sabiti
η : Yanal yatak katsayısı değişim çarpanı
η_s : Kesit modülü
θ_v : Zeminin hacimsel su içeriği
κ : Düzeltme katsayısı için frekansa bağlı bir değişken
μ : Mutlak manyetik geçirgenlik
μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ'_r : Rölatif manyetik geçirgenlik
ρ : Yansıma katsayısı
$\overline{\rho}$: Düzeltilmiş yansıma katsayısı
$\rho(\%)$: Rölatif yansıma katsayısı
ρ_{bs} : Dengeli donatı oranı
ρ_d : Zemin bulk yoğunluğu
$\rho_{\max}$: En büyük yansıma katsayısı genliği
ρ_s : Donatı alanı
σ_{vp} : Kazık uç seviyesindeki zemin gerilmesi
υ : Poisson oranı
φ : Zeminin kayma direnci açısı
ψ : Prob yerleşim geometrisi katsayısı

Kısaltmalar

ACI : American Concrete Institude (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
BAF : Buckling Amplification Factor (Burkulma Büyütme Çarpanı)
BNC : Bayonet Neill–Concelman (Bayonet Tipi Bağlantı Elemanı)

CEB	: Comite Euro-International du Beton (Avrupa Uluslararası Beton Komitesi)
CEM I	: Cement I (Portland Çimentosu)
CPT	: Cone Penetration Test (Koni Penetrasyon Testi)
CSL	: Cross-Hole Sonic Logging (Çok Kanallı Sonik Kayıt)
EM	: Elektromanyetik
EN	: European Norm (Avrupa Standardı)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
HSİ	: Hacimsel Su İçeriği
GGL	: Gamma-Gamma Logging (Gama-Gama Kaydı)
IAEA	: International Atomic Energy Agency (Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı)
GPR	: Ground Penetrating Radar (Zemine Gömülen Radar)
KOÜ	: Kocaeli Üniversitesi
NDT	: Non-Destructive Testing (Tahribatsız Test)
PIT	: Pile Integrity Test (Kazık Bütünlük Testi)
SEAOC	: Structural Engineers Association of California (California Yapı Mühendisleri Birliği)
SPT	: Standard Penetration Test (Standart Penetrasyon Testi)
TDR	: Time Domain Reflectometry (Zaman Tanım Alanında Yansıma)
TDY	: Türkiye Deprem Yönetmeliği
TE	: Tarafsız Eksen
TS	: Türk Standardı
TS500	: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USACERL	: United States Army Construction Engineering Research Laboratory (Birleşik Devletler Ordusu Yapım Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı)
USF	: University of South Florida (Güney Florida Üniversitesi)

BETONARME KAZIKLARDA TDR YÖNTEMİYLE HASAR TESPİTİ

ÖZET

Kazıklı temellerin deprem sonrasında hasar kontrolü, görsel tetkik mümkün olamadığından pahalı ve zaman gerektiren bir uygulamadır. Bu çalışmada, hasar kontrolünün Zaman Tanım Alanında Yansıma (Time Domain Reflectometry, TDR) yaklaşımı ile ekonomik ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve önerilmiştir. TDR, elektromanyetik dalgaların bir iletim hattında ilerlemesi ve süreksizlik noktasında dalganın bir kısmının kaynağa geri yansıması temeline dayanan bir uzaktan algılama teknolojisidir. Önerilen yöntem, kazıkları temsilen prizmatik betonarme kirişler üzerinde geliştirilmiştir. Bu amaçla numunelere yerleştirilen koaksiyel kablo, sensör olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen üç noktalı eğilme testlerinde, numunenin çekme yüzüne yakın yerleştirilen sensörde oluşan yansımalar yük artışlarıyla birlikte kaydedilmiştir. Sensörün topolojisinde herhangi bir değişim olmadığı sürece empedansı sabit kalmaktadır. Numunenin herhangi bir bölgesinde hasar (çatlak) oluşması durumunda, sensörün çatlakla eş konumlu bölgesinde betondan üzerine aktarılan gerilmelerle yapısı bozulmakta ve bu durum bir empedans eşleşmezliği yaratmaktadır. Çatlağın oluşturduğu süreksizlik bölgesinden yansıyan elektromanyetik dalganın test dalgasına oranı olarak tanımlanan yansıma oranı ile çatlak konumlandırılmıştır. Elde edilen TDR verileri değerlendirildiğinde geliştirilen yöntemle çatlağın varlığının ve konumunun önemli ölçüde çözünürlükle belirlendiği görülmüştür. Buradan hareketle, TDR yönteminin kazıklarda hasar görüntüleme için geçerli bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hasar, Kazıklar, TDR, Yapısal Hasar Görüntüleme

DAMAGE DETECTION in REINFORCED CONCRETE PILES with TDR METHOD

ABSTRACT

Inspection of deep piled foundations after an earthquake is an expensive and time consuming process due to the lack of visual inspection. In this study, a new method using TDR (Time Domain Reflectometry) is developed and proposed for damage monitoring in an economic and rapid way. TDR is a remote sensing technology based on the reflections of a propagating electromagnetic wave from the discontinuities along a transmission line. Proposed method was evaluated with prismatic reinforced concrete beams representing the piles. A coaxial cable acting as a sensor was inserted in the specimens. Three point bending tests were performed and the reflections from the sensor which is located near to the tension side of the specimen were recorded as the load increases. The impedance of the sensor remains the same, unless a change at the topology of the sensor occurs. If a damage (crack) formed in the specimen, the structure of the sensor changed with the stresses that are transferred from the concrete and this lead an impedance mismatch at the location of the crack. The crack locations were quantified with the reflection coefficient assessed by the normalization of the reflected wave with the incident test wave. In the light of the data obtained with the tests signed a significant resolution of determining of the crack presence and the location. Therefore, TDR concluded as a valid method for structural health monitoring of piles.

Keywords: Damage, Piles, TDR, Structural Health Monitoring

GİRİŞ

Yapılarda oluşan hasarların özellikle görsel tetkik imkanı olmayan durumlarda belirlenebilmesi yapıyı ayakta tutmak için büyük önem taşımaktadır. Çünkü yapı hasarları malzeme boyutunda başlayarak önce yapı elemanını daha sonra tüm yapı sistemini etkiler. Hasarla birlikte yapının rijitlik, kütle ve enerji tüketme özellikleri tamamen değişir ve yapı daha küçük yüklerle daha fazla deformasyona uğrar. Dolayısıyla daha zayıf bir yapı ortaya çıkar. Böyle bir hasarın belirlenebilmesi için yapıya yerleştirilmiş sensörlerden belirli aralıklarla ya da sürekli olarak toplanan verilerin değerlendirilmesi sürecine yapısal hasar görüntüleme (structural health monitoring) denmektedir.

Yapısal hasar görüntüleme sistemleri bir sensör yapısının oluşturulması, bu sensörden gelen verilerin toplanması ve işlenmesi, hasarın oluştuğuna karar verilebilmesini sağlayan bir modelin kurulması ve söz konusu hasarın ilgili kişi ya da kurumlara eş zamanlı bildirilmesi gibi ayaklardan oluşur.

Betonarme kazıklar kullanım yerleri göz önüne alındığında, hasarın belirlenebilmesi için görsel tetkik imkanı olmayan yapı elemanlarıdır. Yapı içinde, servis yüklerini, taşıma kapasitesi daha yüksek olan alt seviyelerdeki zemine iletmek için kullanılan kazıkların, bu görevlerini yerine getirebilmeleri için yük aktarımını bozacak bir hasar barındırmaları istenmez. Böyle bir hasarın varlığının belirlenmesi için günümüzde sıkça kullanılan yöntemler çoğu zaman belirli bir hasar boyutunun altında kalan hasarları çeşitli nedenlerden dolayı belirleyememektedirler. Buradan hareketle bu tez çalışması kapsamında yapısal hasar görüntüleme sisteminde Zaman Tanım Alanında Yansıma (Time Domain Reflectometry, TDR) yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1950'li yıllardan bu yana enerji tesislerinde, telekomünikasyon ve bilişim altyapılarında kablo hasarlarının tespit edilmesi için kullanılan TDR, kapalı devre çalışan bir radara benzetilebilir. Yöntemin ana prensibi bir iletim hattına gönderilen

elektromanyetik (EM) sinyalin hat boyunca ilerlemesinin ve geri yansımasının birlikte izlenmesidir. Eğer iletim hattı üzerinde empedans eşleşmezliğinden kaynaklanan bir süreksizlik varsa sinyalin bir kısmı bu noktadan geri yansır. Yansıyan sinyal, süreksizliğin yeri ve boyutu hakkında bilgi taşır.

Bu tez çalışması TDR yönteminin ana prensipleri, mevcut kullanım alanları ve yapısal hasar görüntüleme aracı olarak kullanımının sağlanması üzerine kurgulanmış olup aşağıda sıralanan bölümlerden oluşmaktadır:

1. bölümde TDR yönteminin ölçüm prensipleri, ölçüm çözünürlüğü ve ölçümü etkileyen faktörler tanıtılmıştır. Bu amaçla iletim hattı teorisi hakkında bilgiler verilerek yönteme ait bazı kavramlar detaylı olarak açıklanmıştır.

2. bölümde inşaat mühendisliği alanında TDR uygulamaları hakkında yapılan literatür araştırması yer almaktadır. Zeminlerde hacimsel su içeriğinin belirlenmesi, şev stabilitesinin kontrolü, yapı elemanlarındaki hasarların belirlenmesi ve TDR ile diğer inşaat mühendisliği uygulamalarında TDR yönteminin kullanımı üzerine bilgiler sunulmuştur.

3. bölümde bir derin temel yöntemi olarak kazıklı temeller hakkında genel bilgiler sunulduktan sonra, kazıklarda oluşabilecek muhtemel göçme mekanizmaları tanıtılmıştır. Ayrıca geçmiş yıllarda meydana gelmiş farklı depremlerde kazıkların performansları hakkında bilgilere yer verilmiştir. Son olarak kazık hasarlarının belirlenmesi için kullanılan mevcut yöntemler özetlenerek, kullanım kolaylıkları ve zorlukları açısından değerlendirilmişlerdir.

4. bölümde çalışmada kullanılan malzemeler ve yöntemler hakkında bilgiler yer almaktadır. Temsili kazık numunelerinin üretimi ve bu numunelerin basit eğilme testleri ile ilgili detaylar bu bölümde sunulmuştur.

5. bölümde basit eğilme testi uygulanan temsili kazık numunelerinde oluşan hasarların TDR yöntemi ile ne ölçüde belirlenebildiği ortaya konulmuştur. Bunu gerçekleştirebilmek amacıyla her numune için hasar boyutuna karşılık TDR ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir.

6. bölümde tez çalışmasında elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Ayrıca bu bölümde elde edilen sonuçlara dayandırılarak TDR yönteminin kazıklarda bir yapısal hasar görüntüleme aracı olarak kullanılabilirliği üzerine önerilere de yer verilmiştir.

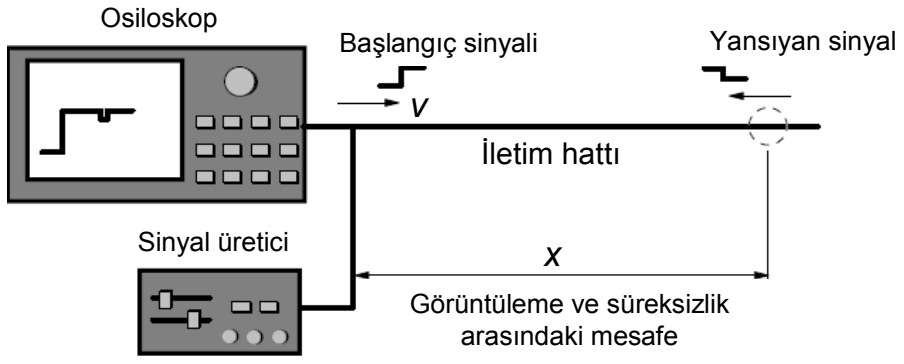
Yapılan çalışmalarda genellikle elektriksel gürültünün yoğun olduğu çevre şartlarında düşük güçte EM sinyalleri taşımak için tercih edilen koaksiyel (eş eksenli) kablo, iletim hattı olarak sensör vazifesi görmek üzere temsili kazık numunelerine yerleştirilmiştir. Numunelere basit eğilme testi uygulanarak üzerlerinde gelişen hasarların TDR ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Çatlak genişliği hasarın boyutu olarak değerlendirilmiş ve basit eğilme testlerinde çatlak genişliği ile TDR ölçümlerinin nasıl değiştiği takip edilmiştir.

1. TDR YÖNTEMİ

Zaman Tanım Alanında Yansıma (Time Domain Reflectometry, TDR), 1950'li yıllarda radar prensiplerinden yola çıkılarak enerji tesislerinde, telekomünikasyon ve bilişim altyapılarında kullanılan elektrik kablolarında oluşan süreksizliklerin (hasarın), varlığını, yerini ve boyutunu tespit etmek için geliştirilmiş bir elektriksel ölçüm yöntemidir. Daha sonrasında geoteknik, hidroloji, malzeme ve havacılık gibi alanlarda kullanılan TDR, bugünlerde geniş ölçekli bir uygulama sahasına sahiptir (Hartebrodt ve Kabitzsch, 2004).

Yöntemin ana prensibi bir iletim hattına gönderilen elektromanyetik (EM) sinyalin hat boyunca ilerlemesinin ve geri yansımasının birlikte izlenmesidir. Eğer iletim hattı üzerinde empedans eşleşmezliğinden kaynaklanan bir süreksizlik varsa EM sinyalin bir kısmı bu noktadan geri yansır. Yansıyan sinyal, süreksizliğin yeri ve boyutu hakkında bilgi taşır.

Şekil 1.1'den görülebileceği üzere TDR ile ölçüm sistemi, yüksek frekanslı sinyal üretici, örnekleme için kullanılan osiloskop ve monitor ile ölçüm yapılacak iletim hattı bileşenlerinden oluşur.



Şekil 1.1. TDR bileşenleri ve ölçüm prensibi (HP, 1988)

Bu bölümde yöntemin ölçüm prensipleri, çoklu yansıma, çözünürlük ve ölçümü etkileyen faktörler hakkında bilgiler yer almaktadır.

1.1. Ölçüm Prensipleri

Bu bölümde empedans, yansıma katsayısı ve iletim hızı gibi iletim hattı teorisinin önemli kavramlarına yer verilmiştir. Bu kavramlar aynı zamanda TDR yöntemi kullanılırken sıkça karşılaşılan kavramlardır.

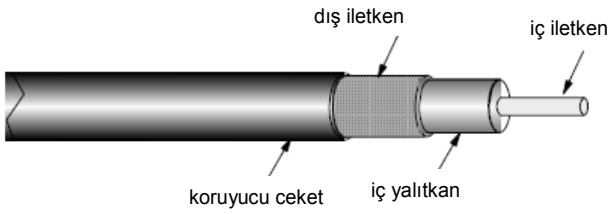
1.1.1. Empedans

Her iletim hattı geometrik yapısına ve malzeme özelliklerine göre bir empedans (Z) değerine sahiptir. Empedans bir elektrik devresinin elektrik akımına göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmıştır (Gamry Instruments, 2007). Empedans gerçek ve sanal olmak üzere iki bileşenden oluşur. Gerçek kısım direnci (R) ve sanal kısım reaktansı (X) ifade eder.

$$Z = R + jX \tag{1.1}$$

TDR yöntemiyle en sık kontrol edilen iletim hatları koaksiyel kablolardan oluşanlardır. Koaksiyel kablolar iç iletken, dış iletken, bunları birbirlerinden ayıran iç yalıtkan ve tüm diğer bileşenleri sargılayan koruyucu ceketten oluşur (Şekil 1.2).

Dış iletken bazı kablolarda sargı şeklinde (%50 ile %97 arasında kaplama) bazılarında ise tam kaplama şeklinde olabilir. Sargı oranı arttıkça gürültü sebebiyle oluşan sinyal zayıflaması azalır. Polietilen, polipropilen, PVC, teflon ve neopren gibi bazı termoplastikler ile termosetler iç yalıtkan olarak kullanılan malzemelerin başında gelirler.



Şekil 1.2. Koaksiyel kablonun yapısı

Koaksiyel kabloların empedansı (Z_c) kullanılan iç yalıtkanın malzemesine ve iç iletken ile dış iletken boyutlarına bağlıdır (Chung, 2005).

$$Z_c = \frac{\ln(b/a)}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}\sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r'}} \tag{1.2}$$

Denklem (1.2)'de, a ve b sırasıyla iç ve dış iletkenlerin çapları, ε_0: boşluğun dielektrik iletkenliği (8,854 E-12 F/m) ve μ_0: boşluğun manyetik geçirgenliği (4π E-7 H/m) olarak verilmiştir. ε_r' ise iç yalıtkanın rölatif dielektrik sabitidir ve tamamen kullanılan malzemeye bağlıdır.

İletim hatlarında sıkça kullanılan koaksiyel kablolardan biri için empedans değeri örnek olması açısından hesaplanacaktır. Söz konusu kablonun dış iletken çapı ve iç iletken çapı sırasıyla 2,9 mm ve 0,81 mm'dir. İç yalıtkan malzemesi olarak kullanılan polietilenin dielektrik sabiti 2,3 olarak bilinmektedir. Denklem (1.2)'de yer alan boşluğun dielektrik iletkenliği ve manyetik geçirgenliği sabit değerlerdir. O halde kablonun karakteristik empedansı,

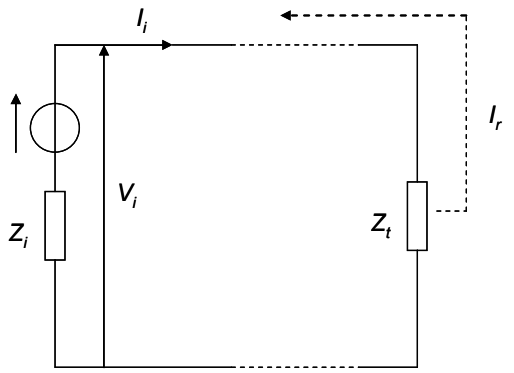
$$Z_c = \frac{\ln(2{,}9/0{,}81)}{2\pi}\sqrt{\frac{4\pi 10^{-7}}{8{,}854.10^{-12}}}\sqrt{\frac{1}{2{,}3}} = 50{,}4$$

ohm olacaktır. Bu değer 50 ohm kabul edilen referans değere oldukça yakındır. Koaksiyel kablolar, tipik olarak 50, 75 veya 93 ohm empedansa sahip olacak şekilde tasarlanırlar (Burgt, 2003).

1.1.2. Yansıma katsayısı

Yansıma katsayısı TDR yöntemini kullanan çoğu ölçüm cihazında ölçüm sonucu olarak değerlendirilen parametredir. Bir iletim hattında yapılan TDR ölçümünde hattın herhangi bir noktasında oluşan yansıma katsayısı değişimi o noktada bir süreksizliğe işaret eder. Bu süreksizlik bir koaksiyel kabloda ezilme, kopma veya kesit daralması gibi bir hasar anlamına gelir. Yansıma katsayısı Şekil 1.3'te Z_i empedansına sahip bir voltaj üretecinin, Z_t empedansı ile sonlandırılmasıyla oluşturulan iletim hattı yardımıyla açıklanabilir.

I_i başlangıç akımı devreyi dolaşırken Z_t empedansına geldiğinde, Z_t ve Z_i empedanslarının eşit olmaması halinde I_i'nin bir kısmı geri yansır (I_r).



Şekil 1.3. İletim hattı (Bird, 2003)

Başlangıç voltajı ve akımı Denklem (1.3) ile hesaplanır.

$$V_i = I_i Z_i \;\rightarrow\; I_i = \frac{V_i}{Z_i} \tag{1.3}$$

Benzer şekilde yansıyan voltaj ve akım Denklem (1.4) ile hesaplanır.

$$V_r = -I_r Z_i \;\rightarrow\; I_r = -\frac{V_r}{Z_i} \tag{1.4}$$

Yansıyan voltaj ve akım, başlangıç değerlerine göre ters yönlü olduğu için eksi işaretlidirler.

Z_t empedansı, devredeki toplam voltajın toplam akıma oranıdır.

$$Z_t = \frac{V_i + V_r}{I_i + I_r} = \frac{I_i Z_i - I_r Z_i}{I_i + I_r} = Z_i \frac{I_i - I_r}{I_i + I_r} \tag{1.5}$$

Denklem (1.5)'te gerekli düzenlemeler yapılırsa yansıyan akımın başlangıç akımına oranı Denklem (1.6) ile elde edilmiş olur.

$$-\frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} \tag{1.6}$$

Yansıyan akım ile başlangıç akımı arasındaki bu orana yansıma katsayısı (reflection coefficient, ρ) denir.

$$\rho = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} \tag{1.7}$$

Yansıma katsayısı boyutsuz bir büyüklük olsa da literatürde rho birimiyle kullanılır. Yansıyan voltaj ile başlangıç voltajı arasındaki oran Denklem (1.8) ile elde edilir.

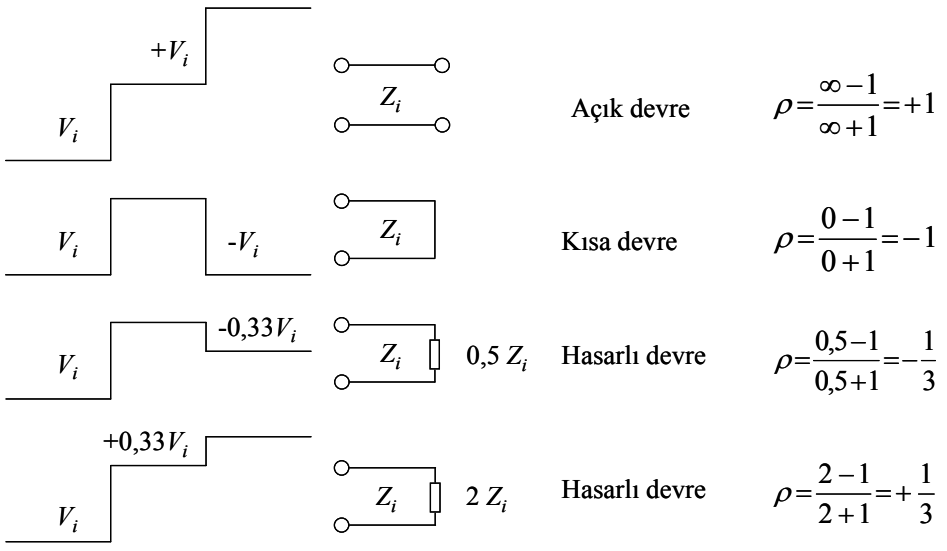
$$\rho = -\frac{V_r}{V_i} \tag{1.8}$$

$Z_i = Z_t$ olması halinde yansıma katsayısının sıfır olduğu görülür. Bu durum iletim hattında herhangi bir yansıma olmaması dolayısıyla hat üzerinde bir hasar olmaması anlamını taşır.

Denklem (1.7) ve Denklem (1.8) beraber ele alındığında yansıyan voltajın başlangıç voltajına oranı Denklem (1.9) ile bulunur.

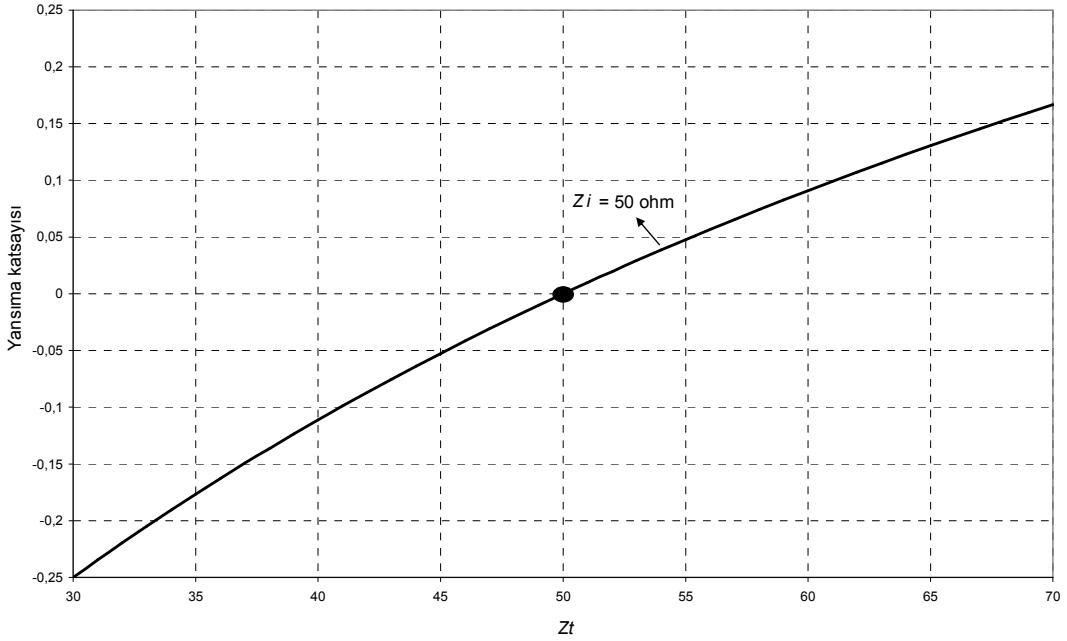
$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t} \tag{1.9}$$

Şekil 1.4'te Z_i empedansa sahip iletim hattının, farklı Z_t empedansına sahip devre elemanları ile sonlandırılması durumlarında oluşacak yansıma katsayıları ve yansıma katsayılarına bağlı voltaj değişimleri görülmektedir. Z_t, açık devrede (open ended) sonsuz, kısa devrede (short ended) ise sıfır olacaktır.



Şekil 1.4. Z_i empedanslı hatlarda farklı sonlandırmalar için yansıma katsayıları

Şekil 1.5'te Z_i empedansının 50 ohm olduğu bir iletim hattının Z_t ile sonlandırılması durumunda yansıma katsayısının Z_t ile nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 1.5. Z_i =50 ohm için yansıma katsayısının Z_t ile değişimi

1.1.3. İletim hızı

Elektriksel sinyaller havada ışık hızında (c = 30 cm/ns) ilerlerler. Dielektrik malzemelerde bu hız havada olduğundan daha düşüktür. İç yalıtkanı dielektrik malzemeden oluşan bir koaksiyel kabloda elektrik sinyalinin ilerleme hızı (V_p) kablonun kapasitansı (C) ve indüktansına (L) bağlıdır (Leung ve Lam, 1992). Denklem (1.10) ile bulunan kablo iletim hızı, ışık hızının yüzdesi olarak ifade edilmiştir (Örneğin V_p= 0,81 ise ışık hızının %81'i anlamına gelir).

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1.10}$$

Elektromanyetik alanda yerleşik, eşit ve ters işaretli yüklere (+Q ve –Q) sahip iletkenlerden oluşan sisteme kapasitör denir. Bu sistemin kapasitansı iki iletken arasındaki yükün (coulomb) potansiyel farkına yani voltaja (V) oranıdır. Yük birimi olarak coulomb, potansiyel farkı birimi olarak volt kullanıldığında kapasitansın birimi farad olacaktır (Whitaker, 2001).

$$C = \frac{Q}{V} \tag{1.11}$$

Bir koaksiyel kabloda oluşan voltaj, elektriksel yüke, iç yalıtkanın dielektrik sabitine ve kablonun geometrik özelliklerine bağlıdır ve Denklem (1.12) ile bulunur (Bird, 2003).

$$V = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \ln \frac{b}{a} \tag{1.12}$$

Denklem (1.11) ve Denklem (1.12) beraber değerlendirilirse, koaksiyel kabloların birim boydaki kapasitansının kabloda kullanılan iç yalıtkan malzemesine ve iletkenlerin çapları arasındaki orana bağlı olduğu görülür.

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r'} \ln \frac{b}{a}} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{\ln \frac{b}{a}} = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln \frac{b}{a}} \tag{1.13}$$

Denklem (1.13)'te, $\varepsilon = \varepsilon_0 \, \varepsilon_r'$, mutlak dielektrik iletkenlik olarak tanımlanmıştır.

İndüktans bir elektrik devresinde akımın zamanla değişimiyle birlikte manyetik akının değişmesi sonucunda devrede bir elektromanyetik kuvvet oluşması özelliğidir. Akımın zamanla değişimi amper/sn, oluşan elektromanyetik kuvvetin değeri volt olarak alındığında indüktansın birimi henry olacaktır. Koaksiyel kablonun birim boydaki indüktansı Denklem (1.14) ile bulunur (Bird, 2003).

$$L = \frac{\mu_0 \, \mu_r'}{2\pi} \ln \frac{b}{a} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \tag{1.14}$$

(1.14) bağıntısında μ_r', iç yalıtkanın rölatif manyetik geçirgenliği, μ ise yine iç yalıtkanın mutlak manyetik geçirgenliğidir. Denklem (1.13) ve Denklem (1.14), iletim hızını veren Denklem (1.10)'da kullanılırsa kablo iletim hızı Denklem (1.15) ile elde edilir.

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu}{2\pi}\ln\frac{b}{a}\frac{2\pi\varepsilon}{\ln\frac{b}{a}}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{1.15}$$

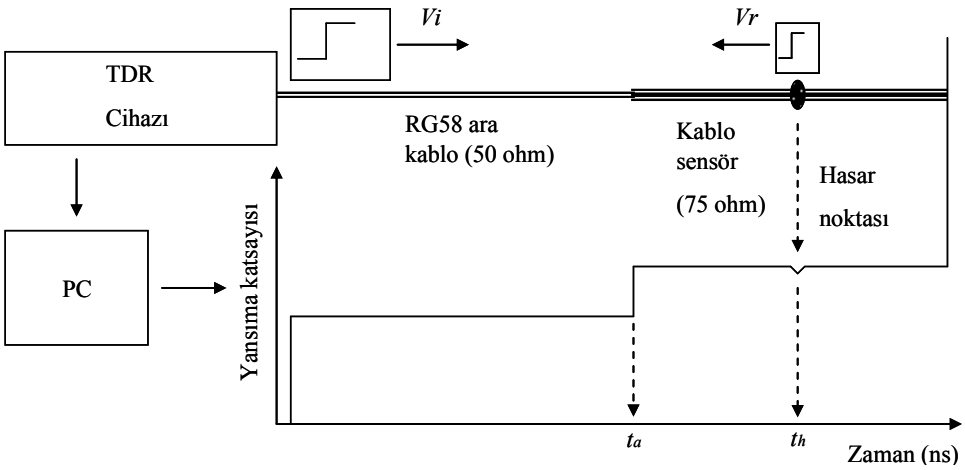
Koaksiyel kablolarda sinyalin başlangıç noktasından bir sonraki noktaya iletilmesi için gereken süreye zaman gecikmesi (time delay, t_g) ya da iletim süresi denir. Zaman gecikmesi birim boy için Denklem (1.16) ile hesaplanır.

$$t_g = \frac{1}{V_p} \tag{1.16}$$

Örneğin iletim hızı %82 olan bir koaksiyel kabloda zaman gecikmesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

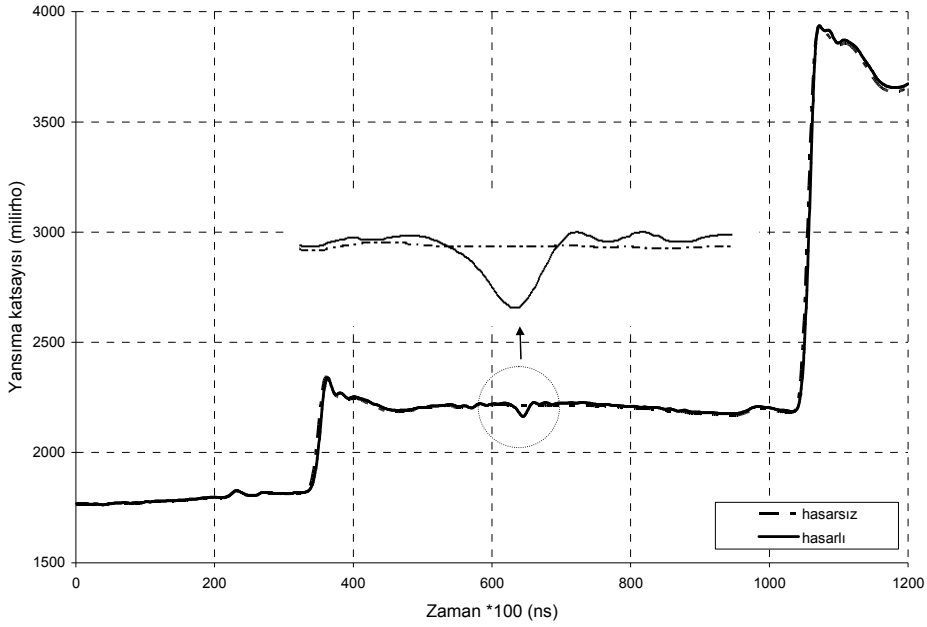
$$t_g = \frac{1}{0{,}82.30\,(cm/ns)} \times 100 = 4{,}065\,ns/cm$$

Koaksiyel kabloların iletim hızını belirlemek için kablolar aynı ölçüde ve aynı noktada deformasyona uğratılarak hasar oluşturulur. TDR cihazına bağlanan ara kablo üzerinden kablo sensörlere milivolt mertebesinde gönderilen elektromanyetik sinyalin (V_i) bir kısmı hasar noktasından geri yansır (V_r). Kablodan gelen veriler TDR cihazından bilgisayara aktarılarak bir yazılım yardımıyla yansıma katsayısı-zaman grafiği elde edilir. Şekil 1.6'da test düzeneği görülmektedir.



Şekil 1.6. Hız testi düzeneği

Şekil 1.7'de RG59U4 tipi koaksiyel kablonun hız testinden elde edilen yansıma katsayısı-zaman grafiği görülmektedir.



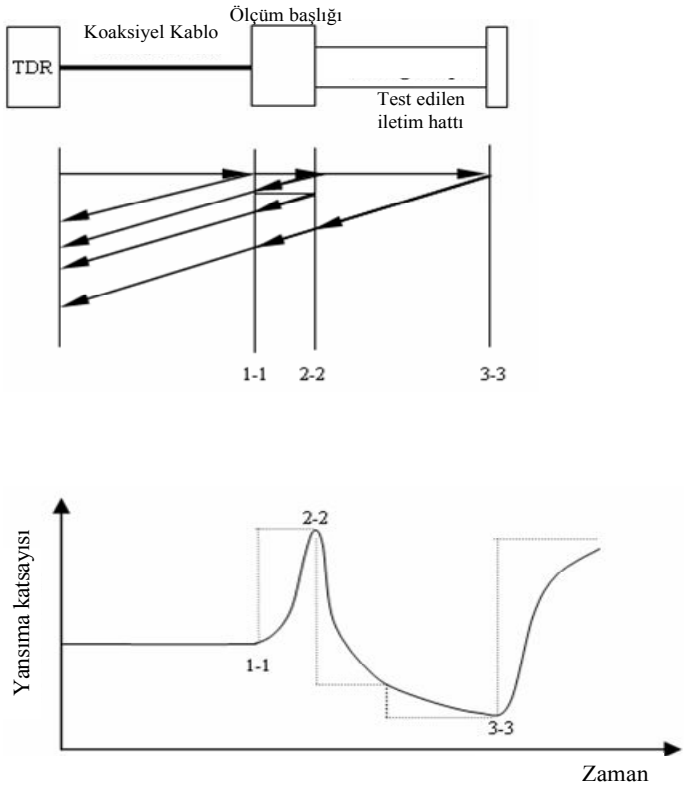
Şekil 1.7. RG59U4 kablo sensörün hız testi

Hasarsız durumla hasarlı durum karşılaştırıldığında t_h anında bir sıçrama gözlemlenmektedir. Bu sıçrama o noktada bir empedans eşleşmezliğini yani kablonun hasarlı olduğunu işaret eder. t_h süresinin ara kabloda geçen t_a süresini de kapsadığı unutulmamalıdır. Bu yüzden t_a süresi tam olarak belirlenmelidir.

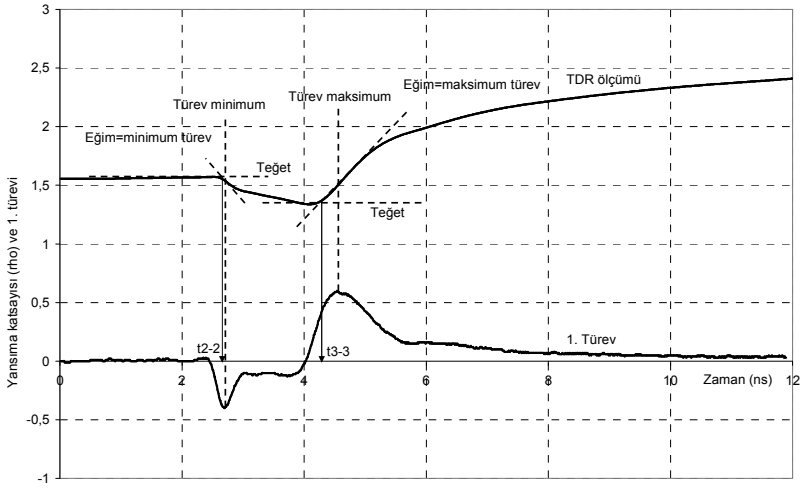
Yansıma katsayısı-zaman grafiğinde herhangi bir iletim hattında geçen sürenin belirlenebilmesi için kullanılan yöntemlerden en sıkça karşılaşılanı Baker ve Allmaras (1990) tarafından geliştirilen "birinci türev" isimli yöntemdir. Birinci türev yöntemi tüm TDR kaydını matematiksel olarak taramak yerine kritik noktalar kavramıyla yola çıkar. Şekil 1.8'de TDR ölçüm düzeneği ile TDR kaydı üst üste getirilip kritik noktalar tanımlanmıştır.

1-1 noktası TDR cihazından gönderilen EM sinyalin test edilecek iletim hattına bağlı ölçüm başlığına ulaştığı andır. Ölçüm başlığında geçen sürenin ardından test edilecek iletim hattı 2-2 noktasıyla başlar ve 3-3 noktasında biter. Bu noktaların birinci türev yöntemiyle belirlenebilmesi için yansıma katsayısının zamana göre türevi alındıktan sonra, TDR kaydının üzerinde türevin maksimum ve minimum değerlerine denk

gelen iki noktadan, eğimi türevin o noktalardaki değerleri olmak üzere iki doğru çizilir. Daha sonra yansıma katsayısının maksimum ve minimum değerlerinden geçen yatay teğetler daha önce çizilen iki doğruyla kesiştirilir. Böylelikle iletim hattının başlangıç ve bitiş noktası belirlenmiş olur. Yöntemin nasıl kullanıldığı Şekil 1.9'da görülmektedir.



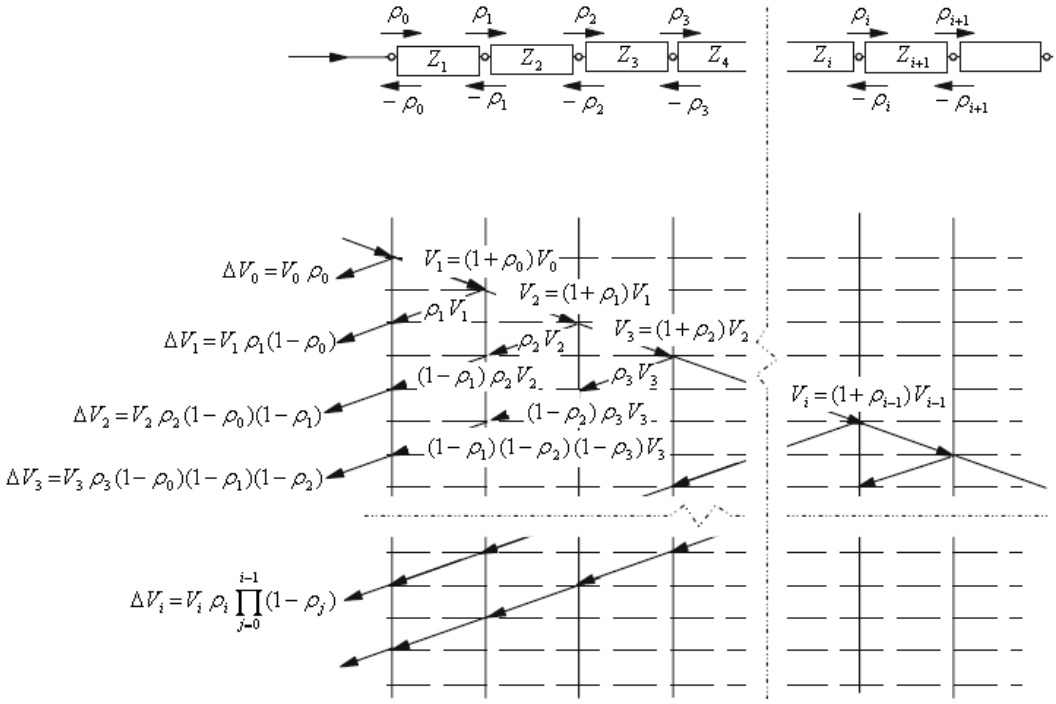
Şekil 1.8. Birinci türev yöntemi (Drnevich ve diğ., 2003)



Şekil 1.9. Birinci türev yöntemine örnek bir uygulama

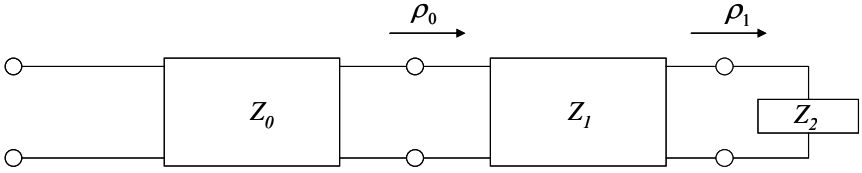
1.2. Çoklu Empedans Eşleşmezliği

Bir iletim hattında çok sayıda empedans eşleşmezliği bulunması durumunda TDR ölçüm kaydında da çok sayıda yansıma gözlenir. Her yansıma cihaza geri dönerken arkasında bıraktığı empedans eşleşmezliklerinden de yansıyacağı için çoklu empedans eşleşmezliğinde TDR ölçümünü değerlendirmek daha karmaşık bir hal alır. Şekil 1.10'da görülebileceği üzere yansıyan ve iletilen EM sinyalin genliği sinyalin iletim hattında geçtiği empedans eşleşmezliklerinden doğan yansıma katsayılarına bağlıdır.



Şekil 1.10. Çoklu empedans eşleşmezliği (Lin ve Thaduri, 2005)

Aynı iletim hattında iki empedans eşleşmezliği olması durumunda (Şekil 1.11) oluşacak yansıma katsayıları ve voltaj değişimi örnek olarak incelenmiştir. Başlangıç voltajı V_i = 50 volt, başlangıç empedansı Z_0 = 50 ohm, Z_1 ve Z_2 empedansları sırasıyla 30 ve 60 ohm olsunlar.



Şekil 1.11. Bir iletim hattında iki empedans eşleşmezliği

İlk yansıma katsayısı Z_0 ve Z_1 empedanslarına bağlı olarak bulunur. Benzer şekilde ikinci yansıma katsayısı da Z_1 ve Z_2 empedansları yardımıyla hesaplanır.

$$\rho_0 = \frac{30-50}{30+50} = -0{,}25$$

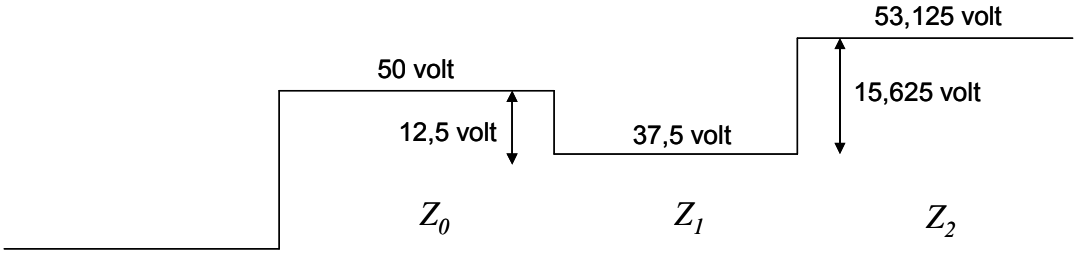
$$\rho_1 = \frac{60-30}{60+30} = 0{,}333$$

Şekil 1.10 yardımıyla ΔV_0 ve ΔV_1 hesaplanır.

$$\Delta V_0 = 50 \times (-0{,}25) = -12{,}5 \text{ volt}$$

$$\Delta V_1 = 50 \times (1-0{,}25) \times 0{,}333 \times (1+0{,}25) = 15{,}625 \text{ volt}$$

Yansıma katsayıları yardımıyla yapılan bu hesaplamalardan sonra TDR ölçümü sonucunda iletim hattında oluşan voltaj değerleri Şekil 1.12'de gösterildiği gibi olacaktır.

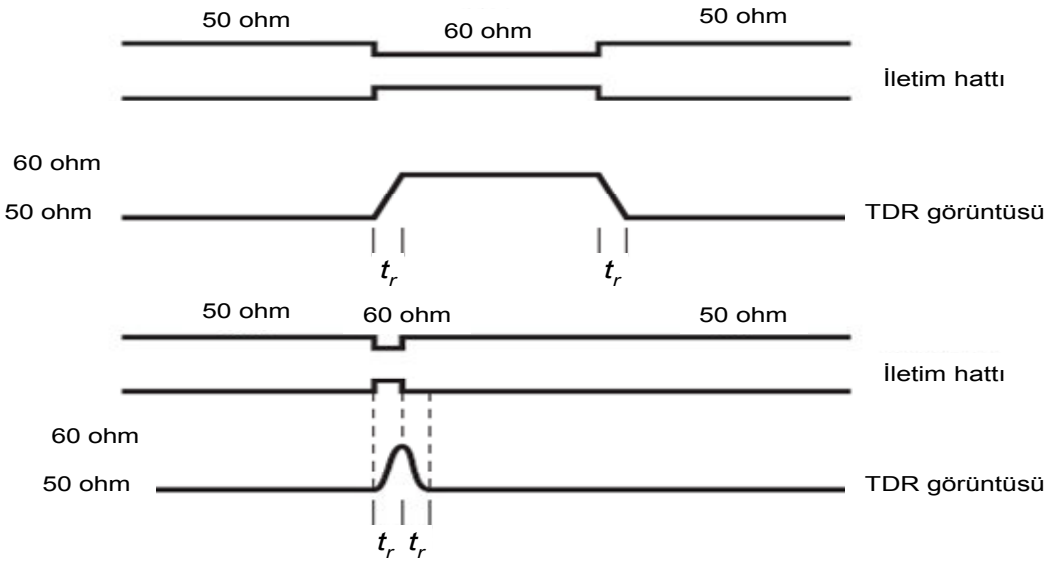


Şekil 1.12. İki empedans eşleşmezliği durumunda örnek iletim hattında voltaj değerleri

1.3. Çözünürlük

Her elektronik sistemde olduğu gibi çözünürlük, TDR yönteminin maliyet açısından önemli bir parametresidir. Yöntemde kullanılan cihazın çözünürlüğü, empedans eşleşmezliğinin arandığı kabloda iki farklı hasarı birbirlerinden ayırt edebilip doğru konumlandırabilmekle ilgilidir. Yeterli çözünürlüğün elde edilememesi sonucunda kablodaki hasarın yeri hakkında (şüpheli) bilgi sahibi olunabilse bile hasarın ne uzunlukta yayıldığını ve boyutunu sağlıklı yorumlamak mümkün olmayacaktır. Söz konusu durum Şekil 1.13'te görülmektedir. Empedansın değiştiği bölgede yeterli

çözünürlük sağlandığında görülmesi beklenen plato, iki empedans eşleşmezliği arasındaki mesafenin yeterli olması halinde oluşmaktadır. Fakat bu mesafenin yeterli değerden düşük olması durumunda, TDR ölçümünde voltaj genliğinin olması gereken değere ulaşamadan ikinci eşleşmezlikle karşılaşması sonucu söz konusu plato oluşamaz. Bu durumda ardışık iki eşleşmezliğin tek bir hasar olarak algılanması mümkün olabilir.



Şekil 1.13. TDR cihazlarında çözünürlük problemi (Agilent Technologies, 2003)

İki süreksizliğin birbirinden ayırt edilebilmesi için gereken mesafe (r), yükselme süresinin (rise time, t_r) yarısında sinyalin alabildiği mesafe olarak tanımlanmıştır (Agilent Technologies, 2003).

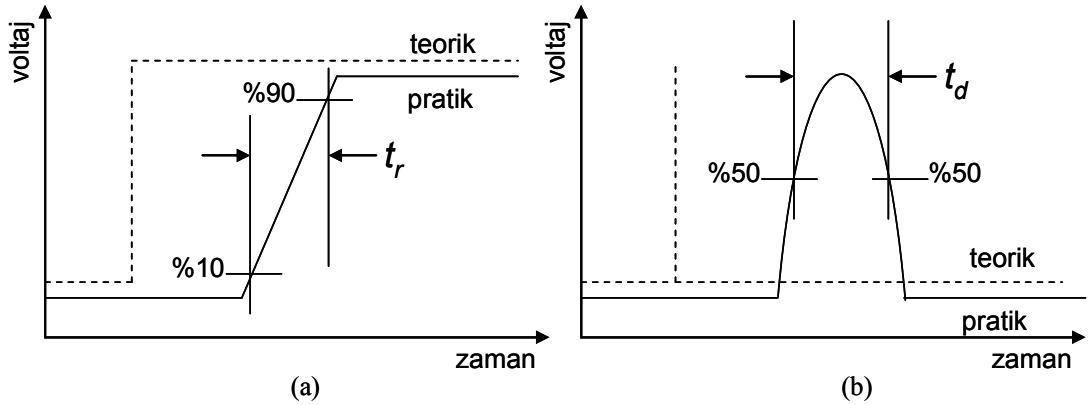
$$r = \frac{V_p \, t_r}{2} \tag{1.17}$$

Tablo 1.1. Yükselme süresine bağlı çözünürlük değerleri (Tektronix, 2006)

Yükselme süresi, ps	Havadaki çözünürlük, mm	FR4 kablodaki çözünürlük, mm (V_p = 0,446)
10	1,5	0,67
15	2,25	1,0
20	3,0	1,34
28	4,2	1,87
40	6	2,68
150	22,5	10,04

Tablo 1.1'de yükselme süresine bağlı olarak FR4 model bir kabloda ve havada (koaksiyel kablonun iç yalıtkanının hava olduğu varsayımıyla) sahip olunacak çözünürlük değerleri verilmiştir. Yükselme süresinin artmasıyla çözünürlük özelliğinin yitirildiği gözlemlenmektedir.

Yükselme süresinin tanımı TDR cihazından iletim hattına gönderilen EM sinyalin yapısına bağlıdır. Başlangıç sinyali olarak da adlandırılan bu sinyal TDR cihazlarında sıklıkla kullanılan iki tiptir. Bunlar adım (step) başlangıç sinyali ve impuls başlangıç sinyalidir (Şekil 1.14).

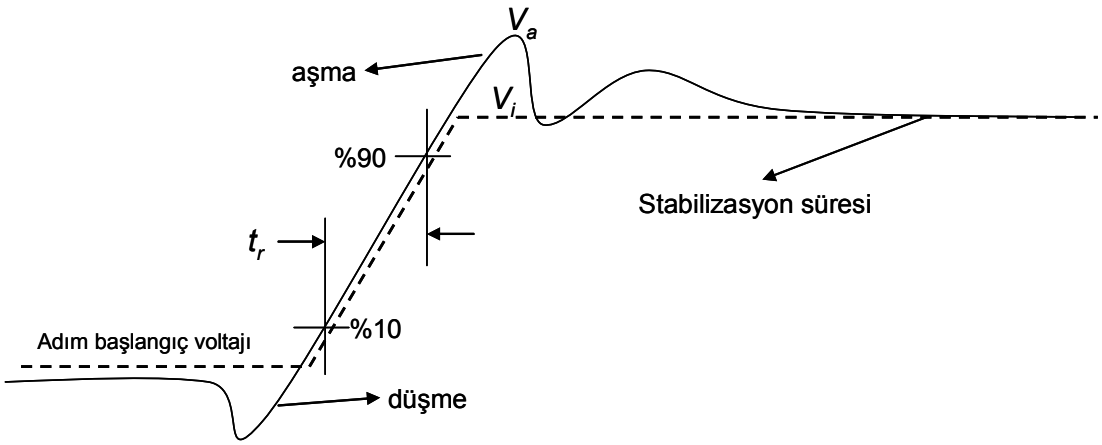


Şekil 1.14. (a) Adım başlangıç sinyali (b) İmpuls başlangıç sinyali (Picosecond, 2004)

Adım başlangıç sinyali, fiziksel olarak sıfır yükselme süresine sahip olunamadığından dolayı t_r yükselme süresine sahiptir. t_r, başlangıç sinyalinin sahip olması gereken genlik değerinin %10'undan %90'ına kadar yükselmesi için gerekli olan süre olarak tanımlanmaktadır (IPC, 2003). İmpuls sinyal ise adım başlangıç sinyalinin birinci türevidir. İdeal olarak sonsuz yüksekliğe, sıfır genişliğe ve birim alana sahip olması gerekse de (matematik dilinde Dirac delta fonksiyonu) bu mümkün olamayacağından t_d yükselme süresine sahiptir.

Tüm TDR cihazlarında elde edilmek istenen başlangıç voltaj sinyali ile görüntülenen arasında Şekil 1.15'te görüldüğü gibi bazı farklılıklar oluşur. Düşme ve aşma gibi etkilerin ortadan kalkması için gerekli olan süreye stabilizasyon süresi denir (Tektronix, 2007). Bu süre her cihaz için farklı olmakla beraber sürenin artması durumunda çözünürlük ve hassasiyet kaybı meydana gelir.

Aşma (overshoot, *os*), başlangıç voltajının indüktif etkilerle aşılması olayına denir ve yüzde olarak ifade edilir (Mahmoud ve Ismail, 2003).



Şekil 1.15. Aşma, düşme ve stabilizasyon süresi

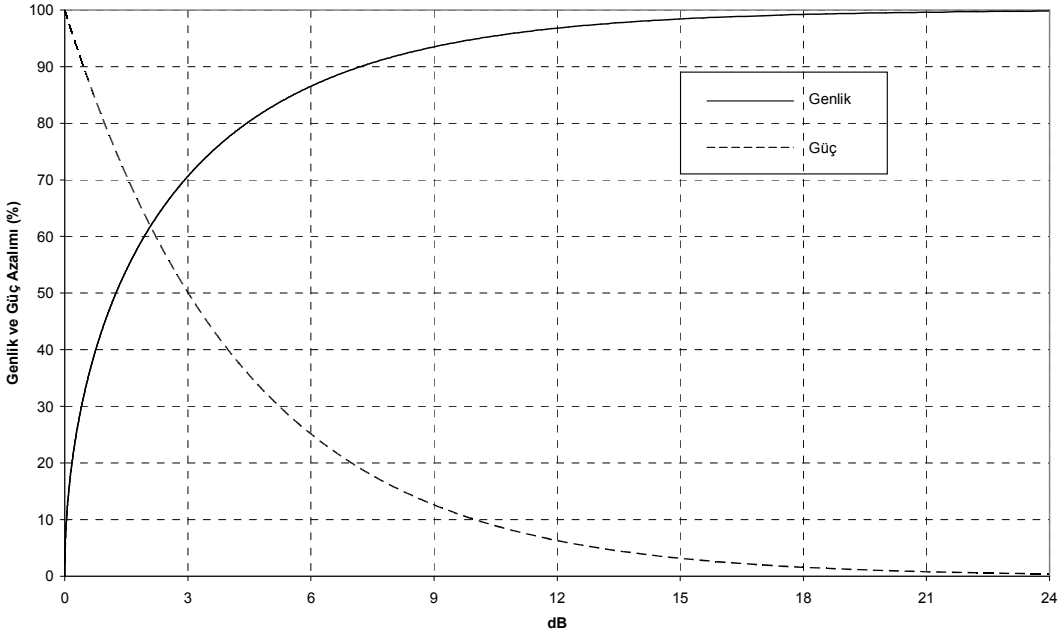
$$os\,(\%) = \frac{V_a - V_i}{V_i} \tag{1.18}$$

1.4. Ölçümü Etkileyen Faktörler

TDR yöntemi kullanılırken ölçümü etkileyebileceği için göz önünde bulundurulması gereken bazı faktörler vardır. Bu faktörlerin bir kısmı kullanılan TDR cihazına bazıları ise test edilecek iletim hattına özgüdürler.

TDR cihazına özgü en önemli faktörlerden biri olan bant genişliği (bandwidth, b_{wh}), 3 desibel frekansı (f_{3dB}) olarak da adlandırılır. Desibel genellikle sinyaller için kullanılan ve bir referans genliğe ya da güce oranı ifade eden logaritmik bir birimdir. Şekil 1.16'da farklı desibel seviyelerinde, genlikte ve güçte oluşan kayıplar görülmektedir.

Şekil 1.16'dan görülebileceği üzere 3 desibel başlangıç sinyali genliğinin %70'ine, başlangıç sinyal gücünün ise %50'sine düştüğü anlamına gelir. İletim hattına gönderilen başlangıç sinyalinin frekansının osiloskopun bant genişliğinin %20'sini geçmemesi önerilir (Tektronix, 2009). Bant genişliği ve yükselme süresi arasında bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki Denklem (1.19) ile ifade edilmiştir (Brown, 1992).



Şekil 1.16. Farklı desibel seviyelerinde oluşan kayıplar

$$t_r = \frac{0{,}35}{b_{wh}} \tag{1.19}$$

Denklem (1.19)'dan görülebileceği üzere daha küçük bir yükselme süresiyle daha büyük bir bant genişliği elde edilmiş olur. Denklem (1.19)'da yükselme süresi nanosaniye cinsinden ifade edildiğinde bant genişliği gigahertz olarak elde edilir. Örneğin yükselme süresi 17,5 pikosaniye olan bir sinyalin bant genişliği 20 GHz olmaktadır.

Kesim frekansı (cutoff frequency, b_{wc}) koaksiyel kablo olan iletim hatlarına özgü ve ölçümü etkileyebilecek önemli bir faktördür. Koaksiyel kabloların nominal özelliklerini kaybettikleri frekans değeri olarak tanımlanan kesim frekansı Denklem (1.20) ile hesaplanır (Demes Kablo, 2008).

$$b_{wc} = \frac{191 V_p}{a + b} \tag{1.20}$$

Örneğin iç ve dış iletken çapları sırasıyla 0,8 mm ve 5 mm, iletim hızı 0,66 olan bir koaksiyel kablonun kesim frekansı yaklaşık 22 GHz olacaktır.

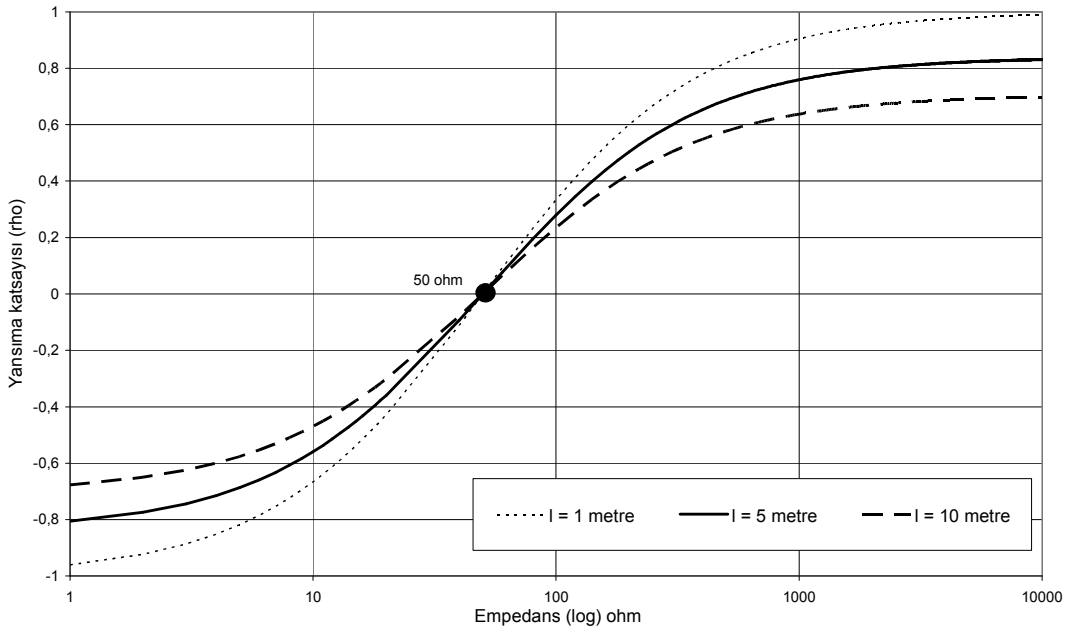
TDR ölçümü yapılacak iletim hattının koaksiyel bir kablo olması durumunda kablonun uzunluğu ölçümü etkileyebilir. Bunun sebebi kablo boyunca ilerleyen sinyalin zayıflamasıdır (attenuation). Bu yüzden düzeltilmiş yansıma katsayısı ($\overline{\rho}$), TDR tarafından ölçülen yansıma katsayısı (ρ) ve bir düzeltme katsayısı (A) kullanılarak Denklem (1.21) ile yeniden hesaplanmalıdır (Castiglione ve Shouse, 2003).

$$\overline{\rho} = \frac{1}{A} \frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{1}{A} \rho \tag{1.21}$$

Düzeltme katsayısı, kablo uzunluğuna (l) ve belli bir frekans için geçerli olan κ katsayısına bağlıdır (Castiglione ve Shouse, 2003).

$$A = e^{2\kappa l} \tag{1.22}$$

Şekil 1.17'de TDR ölçümünde farklı boylarda RG 58A/U koaksiyel kablo kullanılması halinde hesaplanan yansıma katsayıları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. RG 58A/U kablo için $\alpha_{100\,MHz}$ = 0,152 dB (0,0175 Neper) ve Z_i= 50 ohm değerleri geçerlidir.



Şekil 1.17. Farklı uzunluklar için düzeltilmemiş yansıma katsayıları

1.5. Voltaj Duran Dalga Oranı ve Eşleşmezlik Kaybı

İletim hattı üzerinde süreksizlikler yani hasarlar olması durumunda hat üzerinde iletilen ve yansıyan voltaj dalgaları oluşur. Bu durum iki yönde dalga girişimi anlamına gelir. Dolayısıyla iletim hattı üzerinde belirli noktalarda voltaj maksimumları ve minimumları gözlenir. Voltaj duran dalga oranı (voltage standing wave ratio, *wr*) adı verilen bu etki, yansıma katsayısına bağlı olarak Denklem (1.23) ile hesaplanır.

$$wr = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|} \tag{1.23}$$

Voltaj duran dalga oranı bir ile sonsuz arasında pozitif bir sayıdır. İletim hattı üzerinde bir süreksizlik yoksa yansıma katsayısı sıfır olacağından *wr* = 1 olur. Bu durum kaynaktan çekilen gücün tamamının yüke aktarılması yani iletim hattı üzerinde voltaj maksimumları ve minimumları oluşmaması anlamına gelir.

Eşleşmezlik kaybı (mismatch loss, *ml)* sinyalin bir kısmının süreksizlik noktasından yani empedansın değiştiği noktadan geri yansıması sonucunda sinyalin gücünde ortaya çıkan azalımı ifade eder ve Denklem (1.24) ile hesaplanır (NAWC, 1999).

$$ml\ (\text{dB}) = -10 \times \log\left(1-\rho^2\right) \tag{1.24}$$

Örneğin bir iletim hattında oluşan yansıma katsayısı -0,333 olsun. Bu durumda eşleşmezlik kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$ml\ (\text{dB}) = -10 \times \log\left(1-0{,}333^2\right) = 0{,}51\ \text{dB}$$

0,51 dB için güçte olacak kayıp, ilk güç 100 birim kabul edilirse şöyle hesaplanır:

$\text{dB} = 10 \log_{10} (p2/p1)$

$-\ 0{,}51\ \text{dB} = 10 \log_{10} (p2/100)$

$-0{,}051\ \text{dB} = \log_{10} (p2/100)$

$10^{-0,051} = p2/100 \rightarrow p2 = 88,9$

Yansıma katsayısının -0,333 olması durumunda eşleşmezlik kaybı 0,51 dB ve güçteki kayıp %11,1 (100-88,9) olmaktadır. Aynı yansıma katsayısı için voltaj genliği $0,333 \times 100$ = %33 azalmaktadır.

2. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNDE TDR UYGULAMALARI

Temel fonksiyonu iletim hattı olarak kullanılan elektrik kablolarında empedans eşleşmezliğine bağlı hasarları belirlemek olan TDR, özellikle son yirmi yıldır inşaat mühendisliğinde kullanılmaya başlanan bir yöntemdir. Yöntem için kullanılan cihazların bir kısmı el tipi olmakla birlikte bazıları daha gelişmiş ve farklı araçlarla donatılmış cihazlardır. Gelişmiş TDR cihazlarının büyük bölümünde kablosuz iletişim bileşenleri yer alır. Bu bileşenler sayesinde TDR yöntemi gerçek zamanlı görüntüleme (real time monitoring) amacıyla kullanılabilir. Aynı zamanda bir veya birden çok kanal bölücünün (multiplexer) birlikte kullanılmasıyla çok sayıda kanaldan aynı anda veri toplanabilmesi, yöntemi bir hasar görüntüleme (health monitoring) aracı olarak cazip kılmaktadır. Bu avantajlarıyla TDR yöntemi zeminlerin hacimsel su içeriğinin belirlenmesi, şevlerde kayma düzleminin belirlenmesi ve stabilite (duraylılık) kontrolü, yapısal elemanlarda hasar tespiti, su içinde kalan köprü ayaklarında oyulmanın (scour) belirlenmesi gibi konularda sık olmamakla birlikte kullanılmaktadır. Bu tür uygulamaların tamamı yine iletim hattı teorisi üzerine kurulmuş olup, uygulamanın amacına göre farklı düzeneklere sahiptir.

2.1. Zeminlerin Hacimsel Su İçeriğinin Belirlenmesi

Zeminlerin su içeriği özellikle doygun olmayan zemin mekaniğinde kilit rol oynar. Karayolu projeleri ve dolgularda kompaksiyon kalitesinin değerlendirilmesi, şev stabilitesinin bozulması riskinin belirlenmesi gibi konularda su içeriğinin bilinmesi önemlidir. Sulama için optimum zamanın ve sürenin belirlenmesi, geçirgenlik ve atık alanlarında potansiyel sızıntının belirlenmesi gibi zemin fiziği ve hidroloji konularında su içeriğinin belirlenmesi temel ihtiyaçlardan biridir (ASTM 6565, 2005).

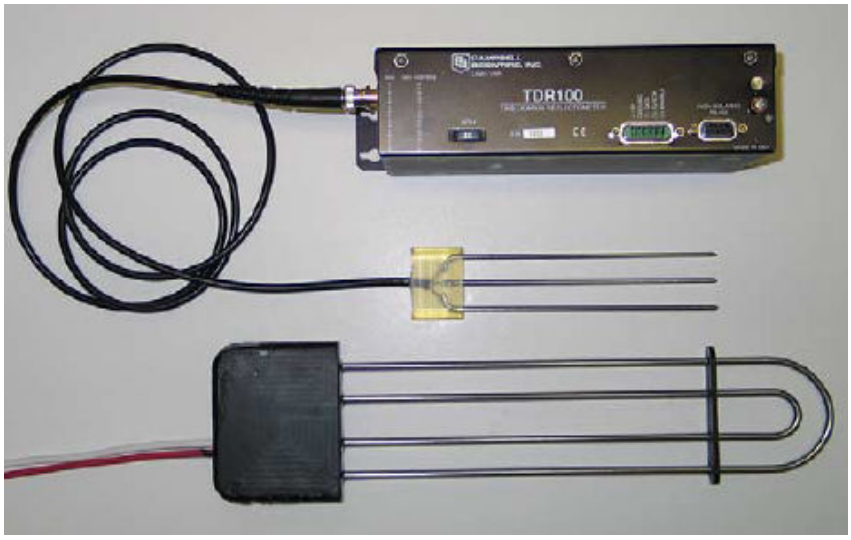
Bir elektromanyetik (EM) sinyalin geçtiği ortamdaki iletim hızı Denklem (1.15)'ten görülebileceği üzere ortamın dielektrik sabitine ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır. Eğer ortam herhangi bir şekilde manyetik etkileşim içinde değilse ($\mu=1$), iletim hızı

yalnızca ortamın dielektrik sabitine bağlı olacaktır (Becker ve diğ., 2006). Zeminin katı matris, su ve hava olmak üzere üç ana bileşene sahip kompozit boşluklu bir yapı olduğu bilinmektedir (Nussberger, 2005). Katı matris mineral partiküllerinden oluşmuştur. Mineral partikülleri, su ve havanın dielektrik sabitleri farklıdır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Zemin bileşenlerinin dielektrik katsayıları (Robinson, 2004)

Zemin Bileşeni	Dielektrik Sabiti
Hava	1
Mineral Partiküller	4,5-10
Su (25 ^{o}C, atmosferik basınç)	78,5

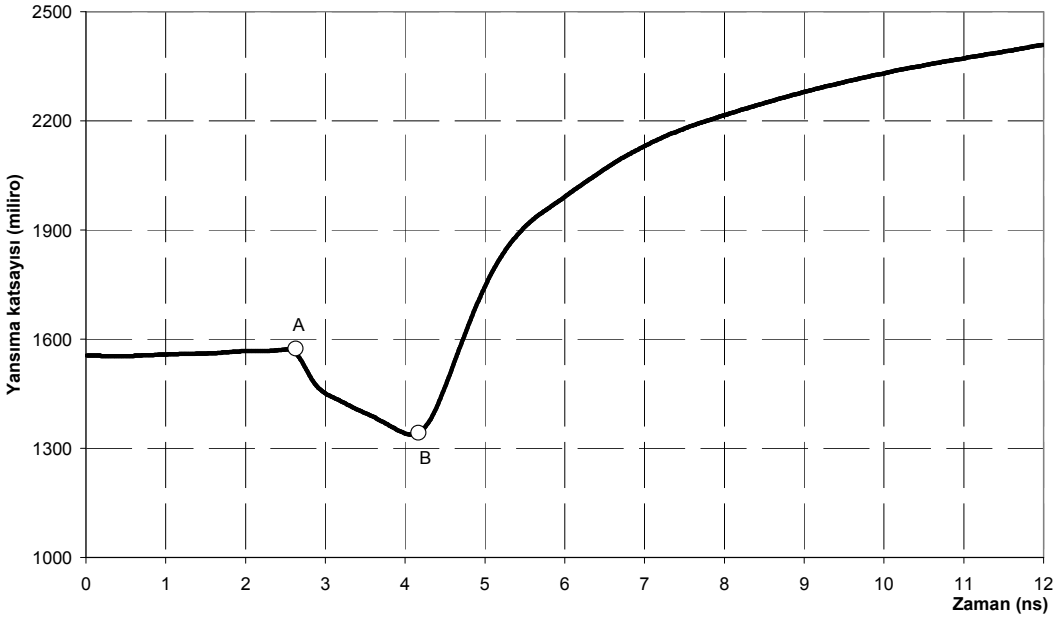
Suyun dielektrik sabitinin diğer bileşenlerinkine oranla oldukça yüksek olması, zemine gömülmüş bir iletim hattında ilerleyen EM sinyalin iletim hızının zeminin su içeriğine bağlı olması anlamına gelir. Zemine gömülmüş iletim hattı zeminlerin hacimsel su içeriği (HSİ) değerinin belirlenmesi için tasarlanmış problarla (dalga kılavuzu) oluşturulur. Problar TDR cihazına bağlanmış koaksiyel kablonun sonunda yer alır. Şekil 2.1'de örnek bir düzenek görülmektedir.



Şekil 2.1. HSİ ölçümü için örnek düzenek (Blonquist ve diğ., 2005)

Koaksiyel kablonun yapısı göz önüne getirildiğinde, iç ve dış iletkenleri ayıran bir iç yalıtkanın olduğu hatırlanacaktır. Zeminin içine gömülen probun iletken metallerden oluşturulduğu düşünülürse, söz konusu metallerin arasına dolacak zeminin iç yalıtkan gibi davrandığı düşünülebilir. Böylelikle TDR cihazından koaksiyel kabloya gönderilen voltaj sinyali kablo boyunca ilerler ve sonrasında proba ulaşır. Şekil

2.2'de bir zemin numunesinden alınan TDR ölçümü görülmektedir. Bu ölçüm yansıma katsayının zamanla değişimini göstermektedir.



Şekil 2.2. Zemin numunesinden alınan TDR ölçümü

EM sinyal proba ulaştığında kablo empedansı ve zemin empedansı arasında bir farklılık varsa sinyalin bir kısmı birleşim noktasından geri yansır (A noktası). Prob boyunca ilerleyen sinyal prob sonundan tekrar yansır (B noktası) ve iletim hattı tamamlanmış olur. Sinyalin prob boyunca (*l* uzunluğu) iletim süresi A ve B noktaları arasında kalan süredir (*t*). Bu süre ile zeminin dielektrik sabiti (ε_s) arasında Denklem (2.1) ile tanımlanmış bir ilişki vardır (SoilMoisture Equipment Corp., 2002).

$$\varepsilon_s = \left(\frac{c\,t}{l} \right)^2 \tag{2.1}$$

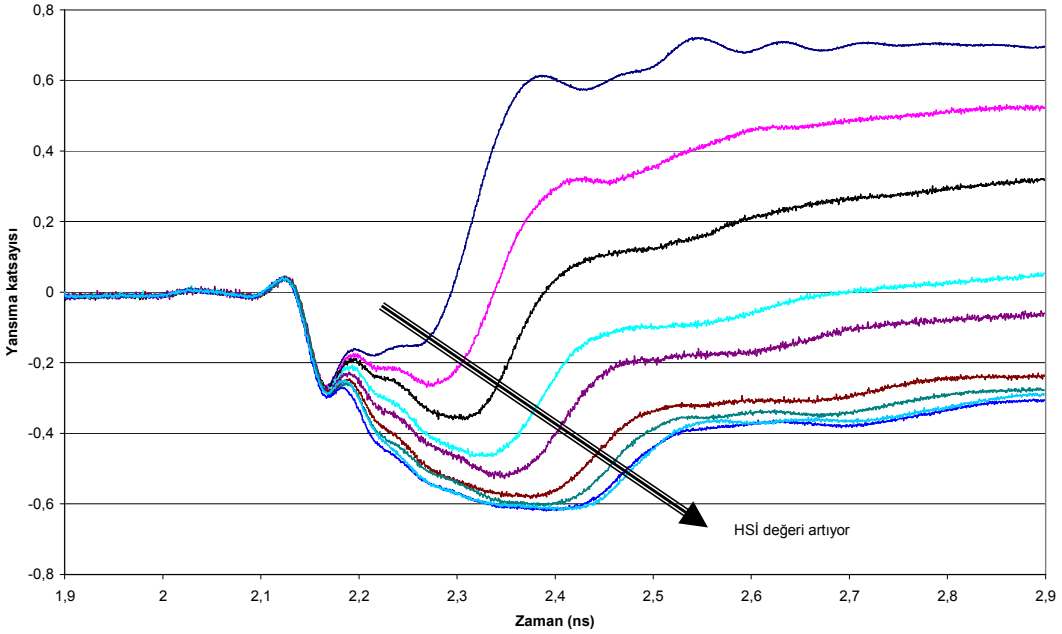
Şekil 2.2'de verilen TDR ölçümünde *t* süresi 1,33 nanosaniye, prob uzunluğu ise 19 cm'dir. Bu bilgiler ışığında ölçüm alınan zeminin dielektrik sabiti aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\varepsilon_s = \left(\frac{30 \times 1{,}33}{19} \right)^2 = 4{,}41$$

Topp ve diğerleri tarafından (1980) zeminin dielektrik sabiti ile zeminin HSİ (θ_v) arasında üçüncü dereceden bir polinom ile ampirik bir kalibrasyon kurulmuştur.

$$\theta_v = -5{,}3.10^{-2} + 2{,}92.10^{-2}\,\varepsilon_s - 5{,}5.10^{-4}\,\varepsilon_s{}^2 + 4{,}3.10^{-6}\,\varepsilon_s{}^3 \qquad (2.2)$$

Şekil 2.3'te bir zemin numunesinde farklı HSİ değerlerinde yapılan TDR ölçümlerinde yansıma katsayısının ara kablo ve prob boyunca nasıl değiştiği görülmektedir. Zemin numunesine su eklenerek yapılan ardışık ölçümlerde, EM sinyalin prob üzerinde geçirdiği sürenin arttığı görülmektedir. Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) hatırlanacak olursa bu durum zeminin dielektrik sabitinin ve dolayısıyla HSİ değerinin arttığına işaret etmektedir.



Şekil 2.3. Zemin numunesinde farklı HSİ değerlerinde yapılan TDR ölçümleri

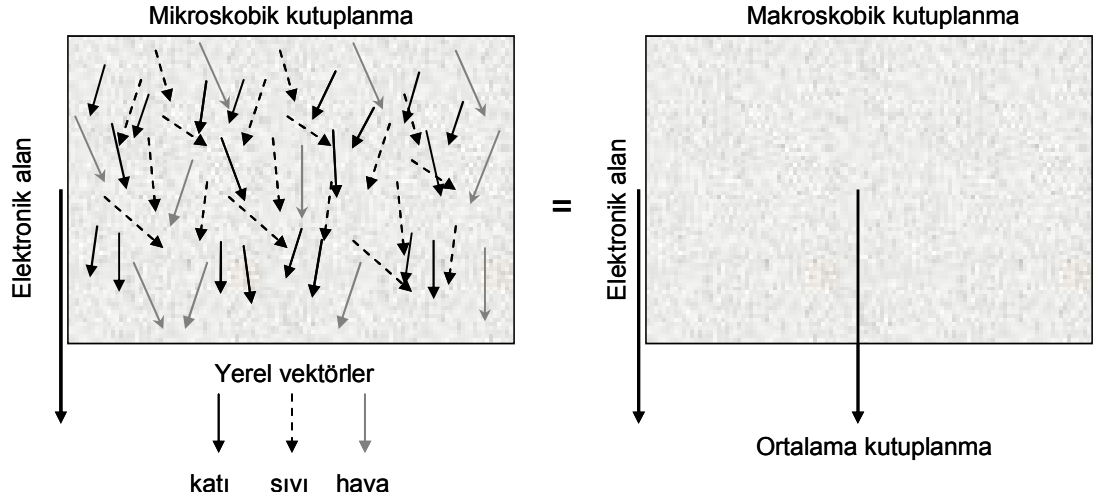
Denklem (2.2)'nin farklı zemin türleri için geçerli olamayabileceği ifade edilmiştir (Kim ve diğ., 2000). Zeminin içeriğine bağlı olarak TDR sinyallerini etkileyebilecek bazı faktörler olabilir düşüncesinin hakim olmasıyla bu yöndeki çalışmalar genişlemiştir.

Büyük spesifik yüzey alanına sahip olan malzemelerin su emme kapasitelerinin yüksek olması sebebiyle, %40'tan fazla kil içeren zeminlerde, genleşebilen mineral içerikli killerde ve %10'dan fazla organik madde içeren organik zeminlerde TDR

ölçümleri etkilenmektedir. Yine bulk yoğunluğu 1 gr/cm^3 değerinden küçük olan zeminlerde HSİ değerinin TDR yöntemiyle olduğundan küçük hesaplandığı, aynı değerin 1,7'den büyük olması durumunda ise olması gerekenden büyük hesaplandığı bilinmektedir. Dolayısıyla zeminlerin dielektrik sabitinin zeminin bulk yoğunluğuna da bağlı olduğu söylenebilir (Quinones ve diğ., 2003).

TDR yöntemiyle, tuz içeren zeminlerde su muhtevasının olduğundan yüksek bulunduğu rapor edilmiştir. Bunun sebebi tuzlu zeminlerin elektriksel iletkenliğinin, tuz oranının artmasıyla gelişmesi ve dolayısıyla prob içinde iç yalıtkan gibi çalışması beklenen zeminin bu özelliğinden uzaklaşmasıdır. Bu yüzden zeminin elektriksel iletkenliği ile dielektrik sabiti arasında bir korelasyon geliştirilmesi önerilmektedir (Mojid ve diğ., 2003).

Elektriksel alan altında zeminlerin kompozit yapısı içinde bulunan katı, sıvı ve hava bileşenlerinin elektriksel kutuplanması farklılık gösterir. Su elektronik, iyonik ve oryantasyonel kutuplanma gösterirken, katı ve hava bileşenler elektronik ve iyonik kutuplanma gösterirler. TDR ile zeminlerin HSİ değerlerinin bulunması, ortalama kutuplanma ile uygulanan elektromanyetik alanın paralel olması kabulüne dayanır (Şekil 2.4). Fakat TDR ölçüm frekansının artmasıyla bileşenlerin yerel kutuplanma vektörlerinin düzenli dizilişi bozulur. Bu dinamik fenomene dielektrik gevşeme (dielectric relaxation) denir. Bu durum bileşenlerin dielektrik sabitlerinde ani bir düşüşe yol açar (Zambrano ve diğ., 2006).



Şekil 2.4. Zemin bileşenlerinin kutuplanması (Hilhorst ve diğ., 2000)

Zemin içinde bulunan su iki çeşittir. Bunlar boşluk suyu ve adsorbe su olarak adlandırılır. Boşluk suyunun dielektrik gevşeme frekansı 17 GHz olarak bilinmektedir (Logsdon, 2000). Aynı değer adsorbe su için 1 GHz civarındadır. Adsorbe suyun dielektrik sabiti bu frekansta mineral partiküllerin dielektrik sabiti değerine düşer. Bu nedenle ölçüm frekansı olarak genellikle 1 GHz'e yakın değerler kullanılan TDR yönteminde sadece boşluk suyu algılanabilir. Bununla beraber sıcaklığın artmasıyla adsorbe su tabakasının kalınlığının azalması sonucu boşluk suyu miktarı artacaktır. Dolayısıyla sıcaklığın artmasıyla TDR ile bulunan HSİ değeri artar (Liu, 2007).

Bugüne kadar yapılan araştırmalar, zeminin kuru birim hacim ağırlığı ile dielektrik sabiti arasında bir bağıntının kurulabilmesini mümkün kılmamıştır. Sabit bir su içeriği değerinde, artan kuru birim hacim ağırlık (ya da azalan boşluk hacmi oranı) ile zeminin dielektrik sabitinin negatif veya pozitif yönde değişeceği akla yatkın gelse de sonuçlar bu kanıyı desteklememektedir (Curtis, 2001). Bununla beraber Ledieu ve diğerleri (1986) tarafından HSİ'nin belirlenmesinde zeminin dielektrik sabitinin yanı sıra zeminin bulk yoğunluğunu da (ρ_d) içeren bir yaklaşım geliştirilmiştir.

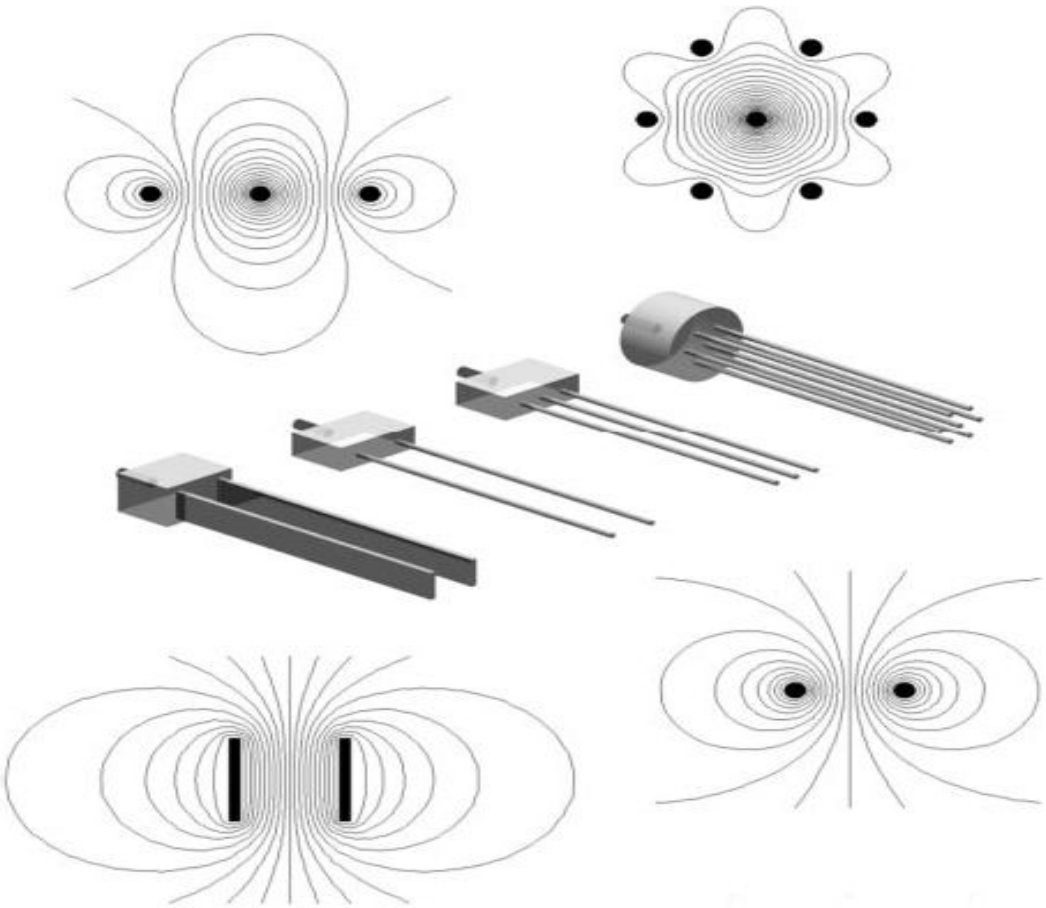
$$\sqrt{\varepsilon_s} = c_1 \rho_d + c_2 \theta_v + c_3 \tag{2.3}$$

c_1, c_2 ve c_3 kalibrasyon katsayılarıdır (c_1 = 0,297, c_2 = 8,79 and c_3 = 1,344).

Benzer şekilde Malicki ve diğerleri (1996) HSİ için farklı sınıflarda ve farklı yoğunluklarda zeminler kullanarak geliştirdikleri bağıntıda zeminin bulk yoğunluğunu kullanarak yüksek bir korelasyon sağladıklarını bildirmişlerdir.

$$\theta_v = \frac{\varepsilon_s^{0.5} - 0.819 - 0.168\rho_d - 0.159\rho_d^2}{7.17 + 1.18\rho_d} \tag{2.4}$$

Prob konfigürasyonu HSİ için yapılan TDR ölçümlerini etkileyecek önemli bir kriterdir. Şekil 2.5'te farklı konfigürasyonlar ile elde edilen elektriksel alanların ne ölçüde düzgün yayılabildiği görülebilir.

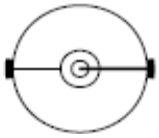
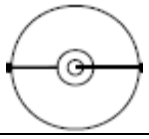


Şekil 2.5. Farklı prob konfigürasyonları ile oluşan elektriksel alanlar (Jones ve diğ., 2002)

İki çubuk iletkenli prob kullanılması halinde zemin bozulması en aza indirilirken, elektriksel alanın düzgün yayılmaktan çok uzak olduğu fark edilmiştir. Bu durum dengesiz bir sinyal oluştururken, bu sebeple sinyal kaybı ve istenmeyen gürültü meydana gelir. Prob seçimi uygulamanın amacına yönelik yapılmalıdır. Örneğin yatay olarak yerleştirilen iki ya da üç iletkenli problar, düşey yönde zemin profili içine doğru bir su hareketini algılamak için uygundur. Öte yandan düşey yerleştirilmiş paralel plaka iletkenli problar, HSİ değerinin belirlenmesi için yapılan rutin ölçümlerde daha fazla hacim örneklenebildiği için avantajlıdır (Jones ve diğ., 2002).

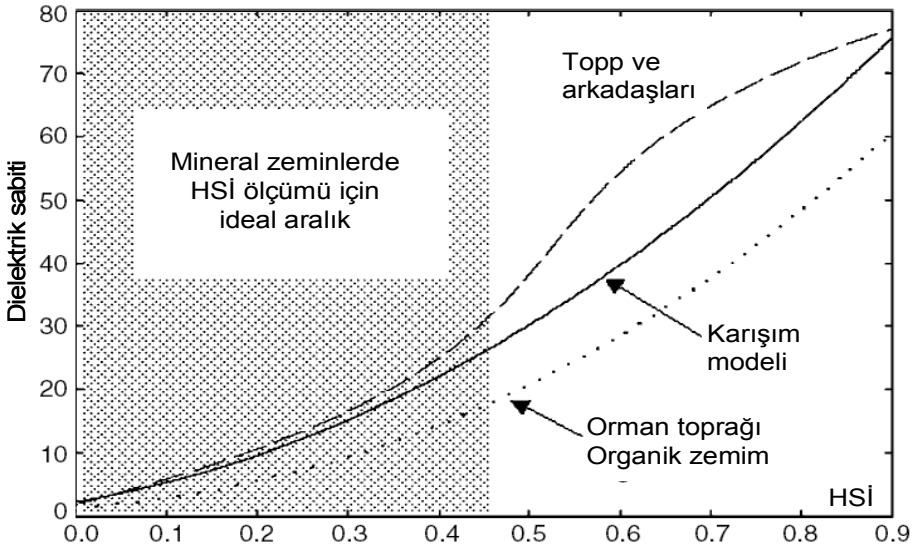
Prob konfigürasyonu ile ilgili çalışmalardan biri farklı iletken genişlikleriyle ve farklı iletkenler arası mesafe ile gerçekleştirilen TDR ile HSİ ölçümü deneyleridir. Tablo 2.2'de kullanılan prob konfigürasyonları görülmektedir.

Tablo 2.2. Prob konfigürasyonları (Lin ve diğ., 2006)

Tip No	İletken genişliği	İletken uzunluğu	İletken sayısı	Prob geometrisi
T1	20	200	4	
T2	30	146	3	
T3	20	200	2	
T4	10	200	2	
T5	3	200	2	

Problarda iletken olarak bakır çubuklar ve plakalar kullanılmıştır. Kullanılan iletkenlerin sayısı, dolayısıyla birbirlerine olan uzaklıkları ve ebatları deney parametreleridir. Karşılaştırma amacıyla bir adet koaksiyel prob (kesintisiz metal silindirin ortasında tek iletken) ile HSİ ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde iletken sayısı veya genişliğinin artmasıyla prob empedansının düştüğü ve daha büyük bir yansıma gerçekleştiği görülmüştür. Prob konfigürasyonunun ölçüm hassasiyetini değiştirmekten çok probun örnekleme karakteristiğini değiştirdiği ifade edilmiştir (Lin ve diğ., 2006).

Şekil 2.6'da Topp ve diğerleri (1980) tarafından geliştirilen korelasyonla ve Birchak (1974) tarafından sunulan "dielektrik karışım modeli" ile sağlanan dielektrik sabiti-HSİ ilişkileri görülmektedir. Şekil 2.6'da aynı zamanda ε_s-θ_v bağıntılarının kurulabileceği ideal aralık ile organik zeminlerde su içeriğine bağlı dielektrik sabiti değişimi yer almaktadır.



Şekil 2.6. Farklı yaklaşımlarla ε_s-θ_v ilişkisi (Jones ve diğ., 2002)

Dielektrik karışım modelinin kullanılabilmesi için porozitenin (n) bilinmesi ön şarttır. Bu model, zemindeki üç bileşenin dielektrik sabitlerinin kullanıldığı ve zemine yerleştirilen probun doğrultusunu göz önüne alan bir modeldir. HSİ, bu parametreler ve TDR ile bulunan dielektrik sabitine bağlı olarak Denklem (2.5) ile hesaplanır (Jones ve diğ., 2002).

$$\theta_v = \frac{\varepsilon_s^{\psi} - (1-n)\,\varepsilon_{sb}^{\psi} - n\,\varepsilon_a^{\psi}}{\varepsilon_w^{\psi} - \varepsilon_a^{\psi}} \tag{2.5}$$

(2.5) bağıntısında, ε_{sb}, ε_a ve ε_w sırasıyla katı, hava ve sıvı bileşenlerin dielektrik sabitleridir. ψ, probun zemine nasıl yerleştirildiği ile ilgili bir katsayıdır ve -1 ile +1 arasında bir değer alır (genellikle ψ=0,5 kabul edilir). Katı, hava ve sıvı bileşenlerin dielektrik sabitleri Denklem (2.5)'te yerlerine yazılırsa (ε_{sb} = 4, ε_a = 1 ve ε_w = 81) ve ψ = 0,5 kabul edilirse zeminin ölçülen dielektrik sabiti, HSİ değeri ve porozitesi arasında Denklem (2.6) elde edilir.

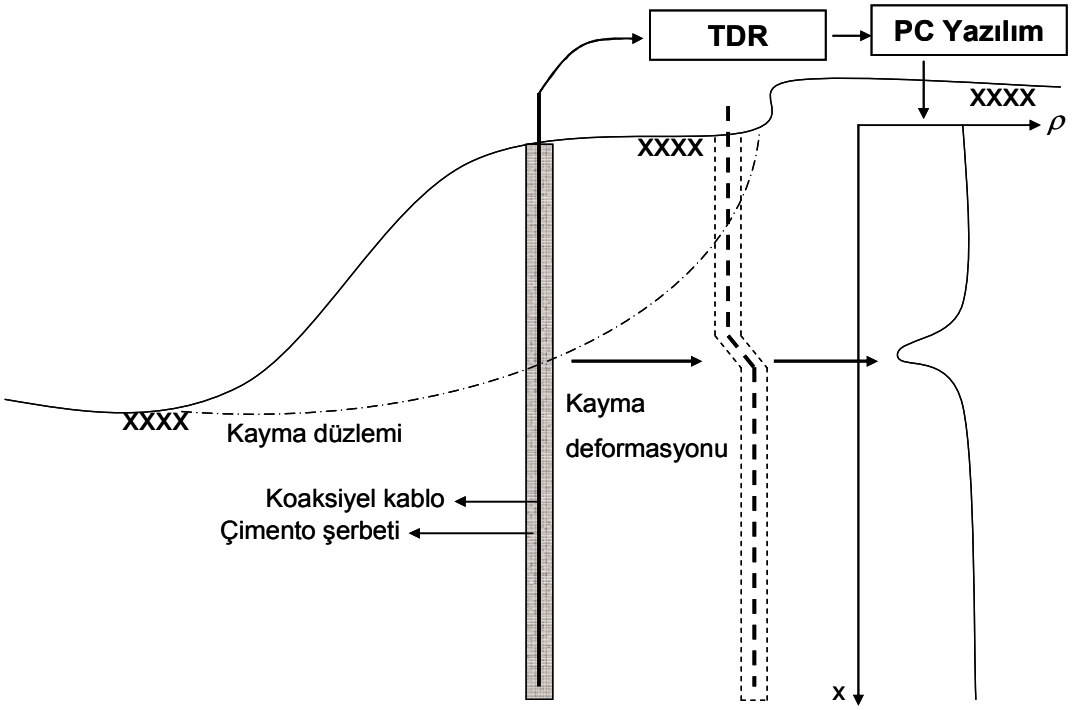
$$\theta_v = \frac{\sqrt{\varepsilon_s} - (2-n)}{8} \tag{2.6}$$

HSİ değerinin belirlenmesi için söz edilen yöntemlerin dışında yapay sinir ağlarının kullanılması da mümkün olmaktadır. Bu türden bir çalışmada zeminin inceler oranı,

TDR ile ölçülen dielektrik sabiti, özgül ağırlığı ve kuru yoğunluğu sinir ağının girdileri olarak değerlendirilmiş ve çıktı olarak HSİ değeri 0,009 cm^3 cm^{-3} kök ortalama kare hatası ile bulunmuştur (Arsoy ve diğ., 2013).

2.2. TDR ile Şev Stabilitesinin Kontrolü

TDR yöntemi son yıllarda toprak ve kaya şevlerde kayma düzlemini belirlemek ve dolayısıyla şev stabilitesinin kontrolü için kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemin ana prensibi şevin içine gömülen koaksiyel kabloya gönderilen EM sinyalin kablo boyunca ilerlemesinin izlenmesidir. Şekil 2.7'de örnek bir uygulama görülmektedir.



Şekil 2.7. TDR ile kayma düzleminin belirlenmesi (Lin ve diğ., 2006)

Şevin kayması durumunda kayma düzleminde kabloda oluşan hasar, EM sinyalin bir kısmının geri yansımasına yol açar. Bu durum yansıma katsayısı (ρ) grafiğinde bir sıçrama olarak gözlemlenir.

TDR cihazı ile kayma düzlemi arasındaki mesafe (x), EM sinyalin iki nokta arasındaki gidiş ve dönüş süresinin toplamı (t) ve sinyal iletim hızı (V_p) yardımıyla hesaplanır.

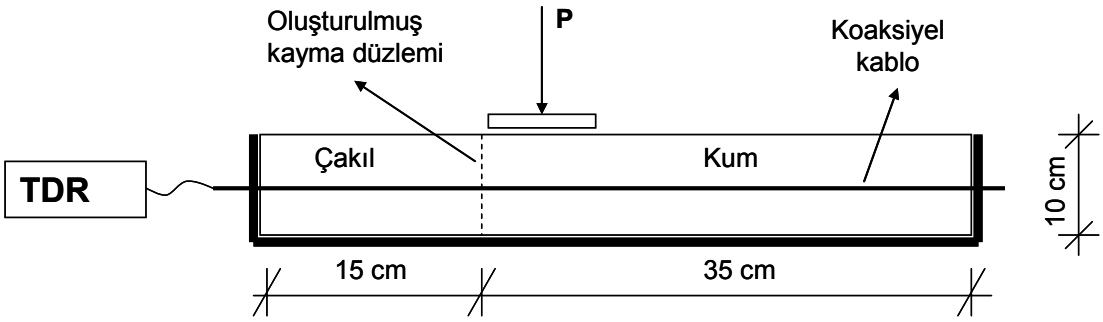
$$x = V_p \frac{t}{2} \tag{2.7}$$

Gerçekleşen yansımanın maksimum genliği (ρ_{max}) ile zeminin kayma deformasyonu (δ) arasında doğrusal bir ilişki Denklem (2.8) ile ifade edilmiştir (Lin ve diğ., 2009).

$$\delta = \left(\frac{\rho_{max}}{S} \right) + \delta_0 \tag{2.8}$$

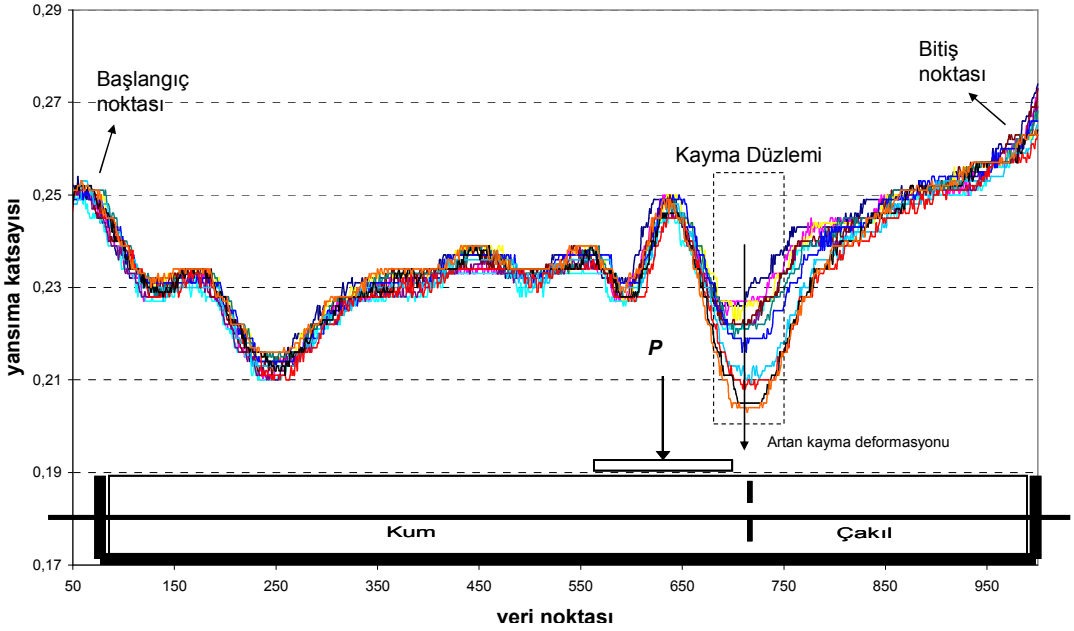
Denklem (2.8)'de *S*, sensör olarak kullanılan koaksiyel kablonun kayma deformasyonuna olan hassasiyeti, δ_0 ise bir yansıma olabilmesi için gerekli en az (eşik) kayma deformasyonu olarak verilmiştir. *S* ve δ_0 kullanılan kablo sensörün tipine bağlı parametrelerdir.

Özgür ve Arsoy (2011), TDR yönteminin kayma düzleminin belirlenmesindeki kapasitesinin araştırılması amacıyla yaptıkları çalışmada, *S* ve δ_0 parametrelerini belirleyebilmek için bir test düzeneği kurmuşlardır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Kablo sensör parametrelerinin belirlenmesi için kurulan test düzeneği

Şekil 2.9'da artan *P* kuvveti karşısında tüm zemin kolonunda (yatay yerleştirilmiş) oluşan *P* yönündeki deformasyonların kablo sensör tarafından algılanması sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, koaksiyel kablodan elde edilen sensörün kayma deformasyonunu algıladığı, artan deformasyonla birlikte yansıma katsayısının orantılı bir biçimde değiştiği ve deformasyonun yerinin net biçimde belirlenebildiği görülmektedir.



Şekil 2.9. Yansıma katsayısının kayma deformasyonu ile değişimi

Çalışmada kayma deformasyonunun boyutlandırılabilmesi için herhangi bir deformasyona karşılık gelen TDR ölçümü ile referans ölçümü yansıma katsayısı bakımından değerlendirilmiştir ve rölatif yansıma katsayısı ($\rho(\%)$), Denklem (2.9)'da görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Denklem (2.9)'da yer alan referans ölçüm, *P* yükü etki ettirilmeden önce gerçekleştirilen ölçüme dayanmaktadır.

$$\rho(\%) = \frac{\textit{ölçüm} - \textit{referans ölçüm}}{\textit{referans ölçüm}} \times 100 \tag{2.9}$$

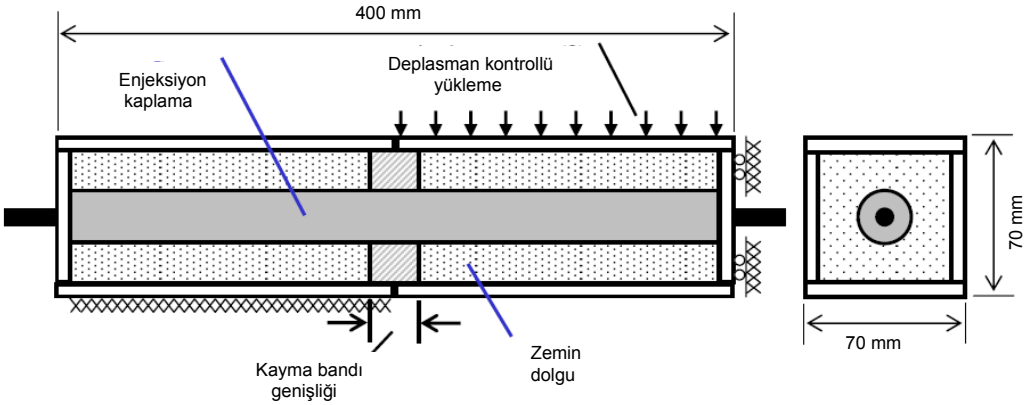
Sonuç olarak Denklem (2.8)'de ρ_{max} yerine $\rho(\%)_{max}$ kullanılmasıyla kayma deformasyonu ile yansıma katsayısı ilişkisi Denklem (2.10) ile oluşturulmuştur (Özgür ve Arsoy, 2011).

$$\delta = \left(\frac{\rho(\%)_{max}}{0{,}87} \right) + 5 \tag{2.10}$$

S ve δ_0 parametrelerini etkileyen ana faktörler kablo sensör direnci, malzeme etkileşimi (zemin, enjeksiyon ve kablo sensör etkileşimi) ve kayma bandı genişliğidir. Kablo sensör direnci, yansıma katsayısının maksimum genliğinde kablo uzunluğuna dolayısıyla sinyal kaybına bağlı olarak gerçekleşen azalımdır. Malzeme

etkileşimi ve kayma bandı genişliği, kayma deformasyonuyla birlikte kablo sensörde oluşan kayma deformasyonunun (δ_{sens}) ölçüsünü etkileyen faktörlerdir.

Lin ve diğerleri (2006), malzeme etkileşimi ve kayma bandı genişliğinin etkinliğinin araştırılması amacıyla yapılan bir çalışmada deplasman kontrollü kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde kablo sensörü sargılayan enjeksiyon malzemesi, zemin türü ve kayma bandı genişliği değişkenler olarak seçilmiştir. Şekil 2.10'da kullanılan deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.10. Kesme kutusu deneyi (Lin ve diğ., 2006)

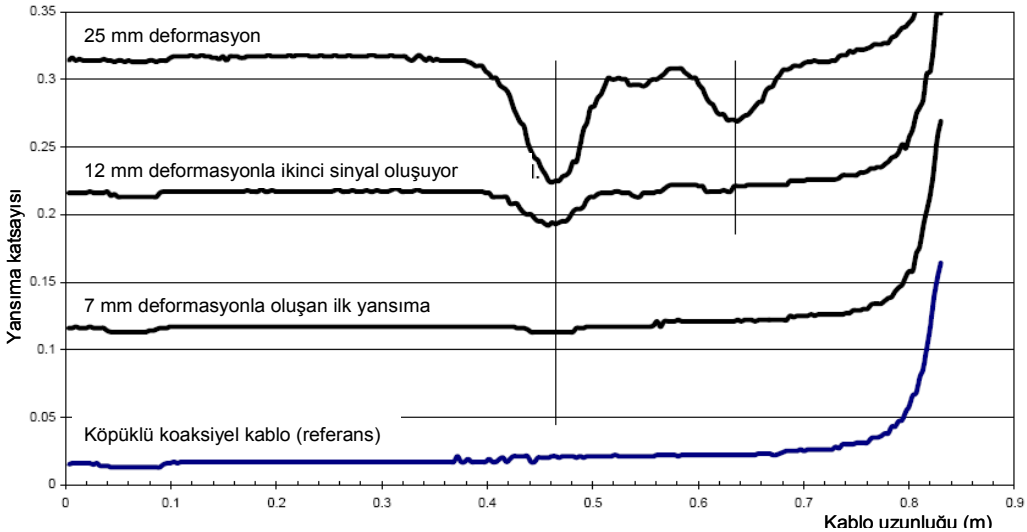
Kablo sensörün zemin dolgu olmaksızın enjeksiyon kaplama içinde ve enjeksiyon kaplamasız zemin dolgu içinde kesmeye maruz bırakılması halleri incelendiğinde, enjeksiyon kullanılmasının δ_0 değerini azaltırken, hassasiyeti etkilemediği anlaşılmıştır. Enjeksiyonla sargılanmış kablo sensör zemine yerleştirildiğinde yansıma katsayısı-kayma deformasyonu grafiğinin yukarıda bahsedilen iki halin grafiklerinin ortasına düştüğü görülmüştür. Aynı zemin tipi içinde enjeksiyon sargının rijitliğinin, δ_0 ve S değerlerini etkilemediği ortaya çıkmıştır. Aynı enjeksiyon sargı tipinde, zemin rijitliğinin azalmasıyla δ_0 değeri artarken S aynı kalmıştır. Kayma bandı genişliğinin artmasıyla δ_0 değeri de artmıştır (Lin ve diğ., 2006).

Dennis ve diğerleri (2006), otoyol kenarlarında kalan şevlerde stabilite kontrolünde kullanılacak kablo sensörleri, geliştirdikleri kesme kutusu deneyleriyle incelemiştir. Hazırlanan kesme kutuları ve deney düzeneği Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Kesme kutuları ve deney düzeneği (Dennis ve diğ., 2006)

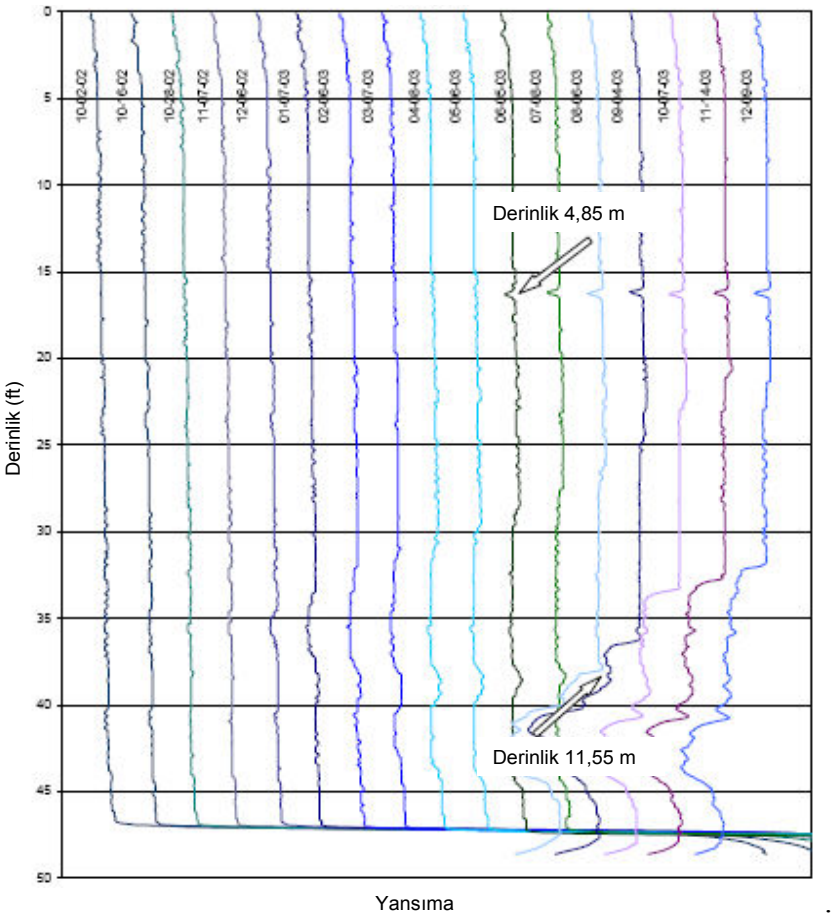
Üç farklı kablo sensör, çimento-bentonit harcı ile sargılanmış bir biçimde kesme kutularına yerleştirilmiştir. Kesme kutuları arasında bırakılan boşluğun genişliği 3 mm'dir. Altı boş olarak ortada yer alan kutuya üstten deplasman kontrollü yük uygulandığında, köpüklü iç yalıtkana sahip kablo sensörde farklı kayma deformasyonlarında oluşan yansıma katsayısı grafikleri Şekil 2.12'de yer almaktadır. Grafikler incelendiğinde kayma deformasyonu ve yansıma katsayısı arasında doğrusala yakın bir ilişki olduğu sonucuna varılmaktadır. Söz konusu kablo sensörün δ_0 değerinin 7 mm olduğu görülmüştür.



Şekil 2.12. Kayma deformasyonu ve yansıma katsayısının (Dennis ve diğ., 2006)

Sargant ve diğerleri (2004), şev stabilitesinin izlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmada TDR ve eğim ölçer (inclinometer) sistemlerini kullanmıştır. Şekil 2.13'te bir gözlem noktasından bir yıl boyunca elde edilen TDR ölçümleri görülmektedir. İki

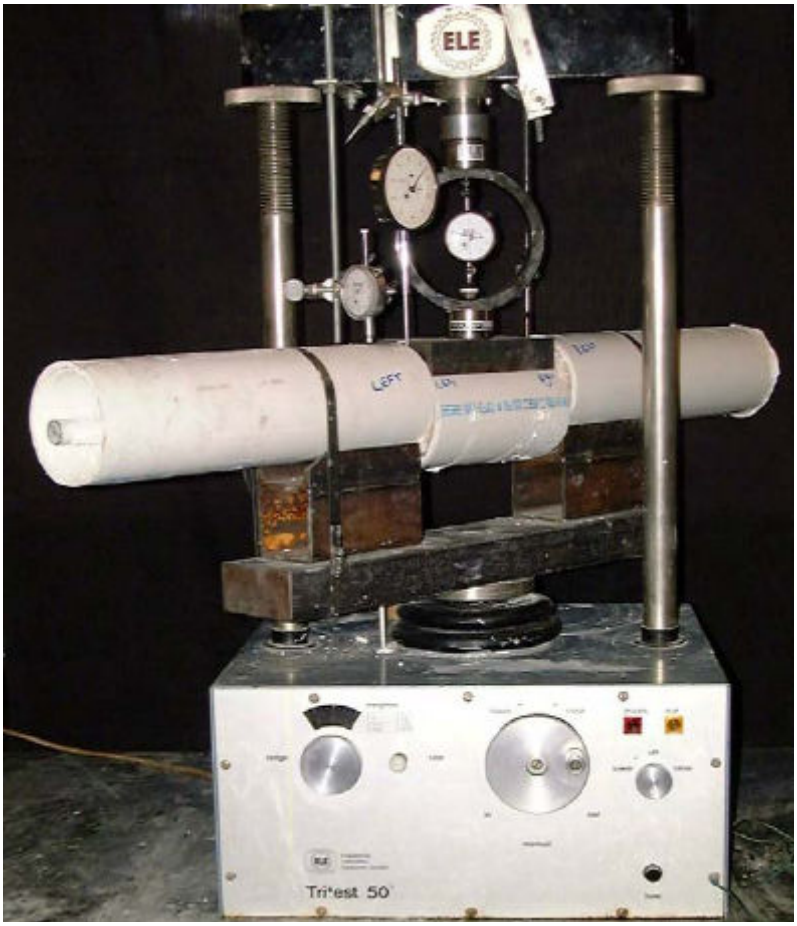
farklı derinlikte birer kayma düzleminin oluştuğu ve bunlardan daha aşağıda olanın zamanla göçmeye sebep olabilecek şekilde hareketine devam ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.13. Kayma deformasyonu ile yansıma katsayısının değişimi (Dennis ve diğ., 2006)

TDR kayma düzlemlerinde oluşan hareketliliği algılamak açısından başarılı sonuçlar vermektedir. Yazarlar kayma deformasyonunun ölçüsü hakkında daha net bir fikir sahibi olunabilmesi için gelecekte bu konuda çalışmaların devam etmesini önermişlerdir. Amacın sadece kayma düzleminin derinliğini tespit etmek olması halinde TDR, eğim ölçere göre daha ekonomik ve kullanışlı olarak yorumlanmıştır.

Blackburn (2002) kablo sensörün enjeksiyon içinde davranışını araştırmak için kesme kutusu deneylerini kullanmıştır. Bu deneyler kurulan sonlu elemanlar modeliyle karşılaştırılmıştır. Laboratuvar deneyleri için kullanılan düzenek Şekil 2.14'te görülmektedir.

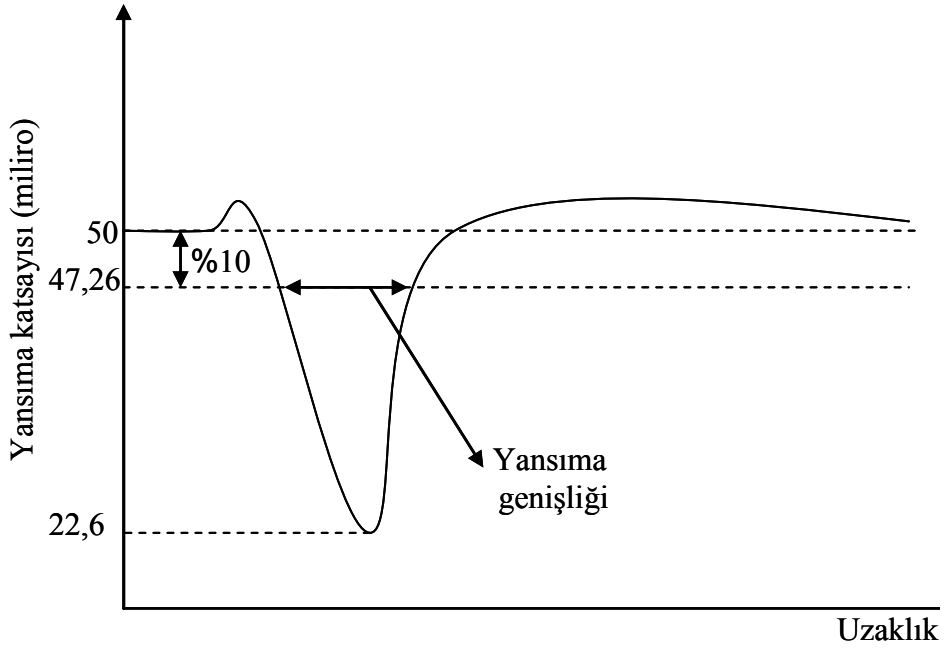


Şekil 2.14. Kesme kutusu deneyi (Blackburn, 2002)

Çalışma kapsamında birisi katı alüminyum dış iletkene diğeri ise kalaylı bakır örgü dış iletkene sahip iki farklı sensör tipi, içinde yer aldıkları enjeksiyon ile birlikte kompozit bir yapı olarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Genişletilmiş analizler sonucunda belli bir zemin mukavemeti için kablo sensörde kayma gerilmesini en büyük yapacak enjeksiyon harcı mukavemeti, zemin mukavemetinin 1 ile 5 katı arasında olarak açıklanmıştır.

Kayma düzleminin oluşması nedeniyle TDR ölçümünde gerçekleşen yansımanın geometrisi, deformasyonla ve deformasyonun TDR cihazına uzaklığıyla birebir ilişkilidir. Yansıma geometrisi yansımanın genliği ve genişliği ile açıklanır. Şekil 2.15'te TDR cihazına 6 m uzaklıkta kayma deformasyonu oluşturulan kabloya ait ölçüm görülmektedir. Ölçümün referans yansıma katsayısı 50 milirodur. Yansımanın en alt noktası 22,6 miliro olarak ölçülmüştür. Bu durumda yansıma genliği 27,4 miliro olmaktadır. Yansımanın başlangıç ve bitiş noktalarına yakın bölgelerde

oluşabilecek hataları en aza indirgemek için referans yansıma katsayısından yansıma genliğinin %10'u çıkartılır (50-2,74 = 47,26) ve yansıma genişliği bu seviyede ölçülür.

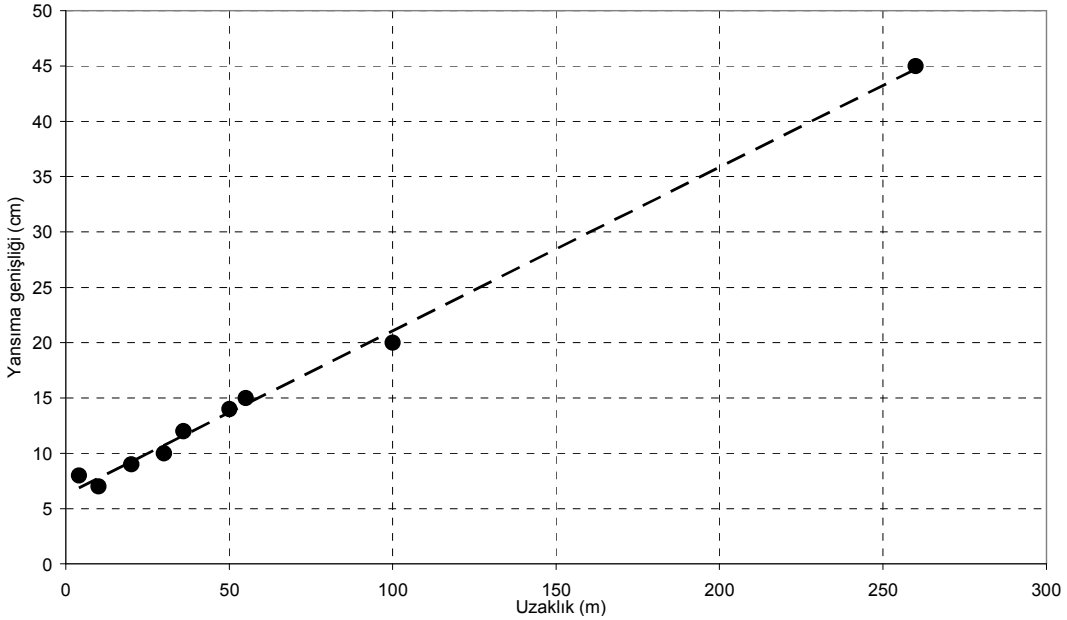


Şekil 2.15. Yansıma genliği ve genişliği (Bordas, 1998)

Yansıma genişliği, deformasyonun ölçüm cihazına olan uzaklığından doğrudan etkilenir. Şekil 2.16'da görüldüğü üzere aynı deformasyonun ölçüm cihazından farklı uzaklıklarda olması halinde yansıma genişliği değeri değişmektedir. Artan ölçüm uzaklığı ile yansıma genişliği de artmaktadır. Bu durum ölçüm uzaklığının çözünürlüğü olumsuz yönde etkilediğine bir işarettir.

Kablo sensörde oluşan kayma ve çekme deformasyonları, sırasıyla kapasitans ve empedans değişimleriyle modellenir. Kayma deformasyonu sonucu oluşan yansıma katsayısı ile kapasitans değişimi (ΔC) arasında bir ilişki mevcuttur (Turner, 2006).

$$\rho = \Delta C \frac{Z_i}{2 t_r} \tag{2.11}$$



Şekil 2.16. Yansıma genişliğinin cihaza olan uzaklıkla değişimi (Bordas, 1998)

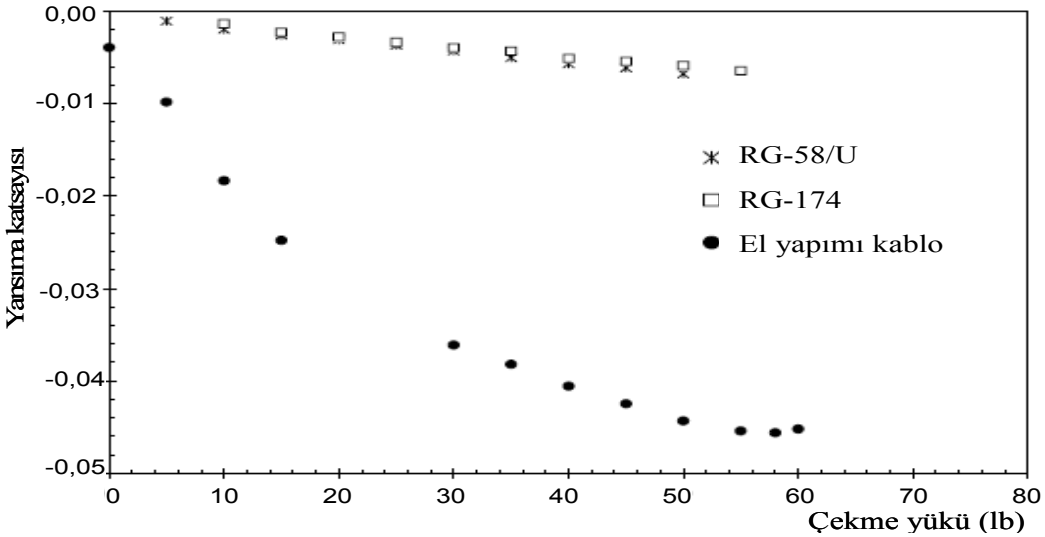
2.3. TDR Yöntemi ile Yapısal Hasarların Belirlenmesi

Koaksiyel kabloların yapı elemanlarına yerleştirilmesi suretiyle sensör olarak kullanılması, yapısal hasarların belirlenmesi için düşünülmüş bir yoldur. Örneğin betonarme bir kesitin içinde gömülü olan kablo sensör, kesitte oluşacak bir eğilme etkisinde betondan üzerine aktarılan gerilmelerden dolayı deformasyona uğrayacaktır. Deforme olan kablonun empedansının değişmesiyle yapılacak TDR ölçümünde bir yansıma gözlenecektir. Eğer yansımanın genliği ve genişliği ile kesitte oluşan deformasyonlar arasında bir ilişki sağlanabilirse TDR ile yapısal hasarlar boyutlandırılabilir. Bu konuda elde edilen literatür kısıtlı ve yenidir.

Ticari olarak elde edilebilen birçok koaksiyel kablo sensör olarak kullanılabilir. Fakat iç yalıtkan olarak polietilen ya da teflon kullanılıyor olması bu kabloları birim deformasyon algılamak açısından zayıf kılar. Aynı zamanda elektromanyetik sinyal iletimi için tasarlanan koaksiyel kablolar düşük sinyal-gürültü oranlarıyla mekanik deformasyonları algılamak için uygun değildir (Lin ve diğ., 2003). Bu yüzden yapısal elemanlarda hasar tespiti için kullanılmak üzere özel olarak tasarlanan kablo sensörler çalışılmıştır.

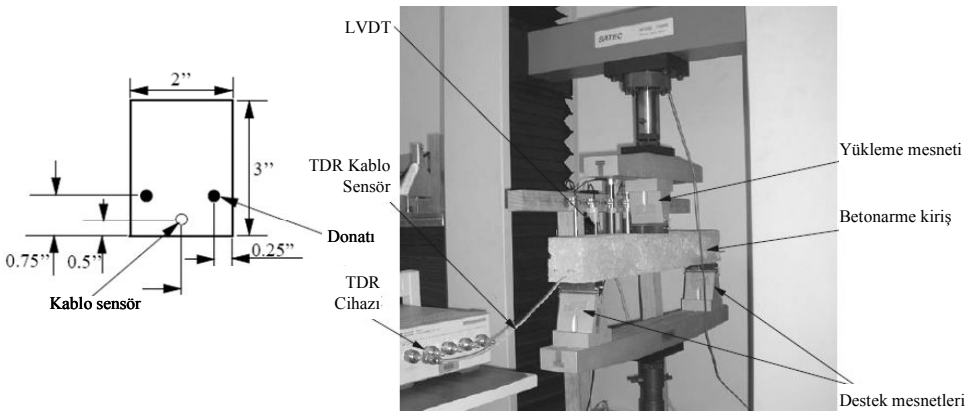
Bu çalışmalardan birinde kalaylı bakır sargı (strand) iç iletken, kauçuk iç yalıtkan, kalaylı bakır örgü (braid) dış iletken ve poliolefin koruyucu ceketle oluşturulmuş

koaksiyel kablo sensör, çekme yükü altında ticari koaksiyel kablolarla karşılaştırılmıştır. El yapımı kablo sensör diğerlerine oranla yüke ve dolayısıyla deformasyona çok daha hassas bulunmuştur (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Farklı kablo sensörlerin hassasiyetleri (Lin ve diğ., 2003)

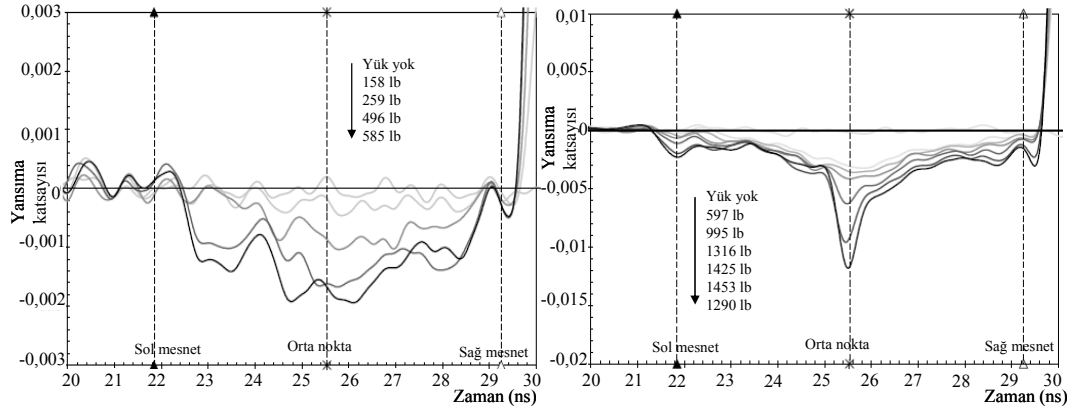
El yapımı kablo sensörün uygulamada ne kadar başarılı olacağını görmek için kiriş testleri yapılmıştır. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi kablo sensör faydalı derinliğin altına yerleştirilmiş ve 3 noktalı eğilme testi gerçekleştirilmiştir. İki farklı yük uygulanmıştır. Bunlardan birincisi kirişin elastik kapasitesinin %60'ına kadar yapılmıştır. Bu yüklemenin amacı elastik bölgede küçük eğilme birim deformasyonlarının algılanıp algılanamadığını görmektir. İkinci yükleme kiriş göçene kadar yapılmıştır. Bu yüklemede çatlaklar ve TDR sinyalleri beraber izlenmiştir.



Şekil 2.18. Kiriş kalıp planı ve deney düzeneği (Lin ve diğ., 2003)

Şekil 2.19'da her iki yükleme ile oluşan yansıma katsayısı grafikleri görülmektedir. Elastik sınırın %60'ına kadar yapılan birinci yüklemede 0,63 kN yük seviyesinde TDR kaydında referans ölçümüne göre değişim başlamıştır. Artan yükle beraber yansıma katsayısı değerleri artmıştır. Oluşan dalga formları incelendiğinde kirişin deformasyon profiline yakın olmakla birlikte birebir örtüşmediği anlaşılmıştır. Bu durum sensörün etrafını saran betonun homojen olmayan yapısı nedeniyle bölgesel malzemeler arası etkileşimler ile izah edilmiştir. Birinci yükleme kaldırıldığında sensörden alınan TDR ölçümü ile referans ölçümü arasında çok az bir fark olduğu görülmüştür.

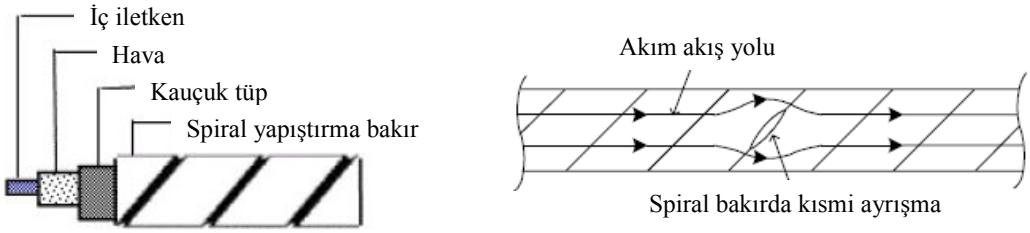
Göçme yüküne kadar yapılan ikinci yüklemede kirişin akma yüküne kadar artan yükle birlikte yansıma katsayıları da artmıştır. 5,98 kN yük seviyesinde kirişte akma meydana gelmiş ve bu seviyede orta noktada bir eğilme çatlağı oluşmuştur. Artan yükle birlikte çatlak genişliği ile boyu artmış ve çatlak yerinde kablo sensörün yansıma katsayısı hızlı bir yükseliş göstermiştir. Bir diğer önemli nokta ise sensörle betonun aderansının sağlanabilmesidir. Farklı yapıştırıcılar ile yapılan denemelerde en iyi sonucu kablo sensörün beton dökümünden önce ankraj çimento harcı ile kaplamanın verdiği görülmüştür.



Şekil 2.19. Farklı yük seviyelerinde yansıma katsayıları, solda 1. yükleme, sağda 2. yükleme (Lin ve diğ., 2003)

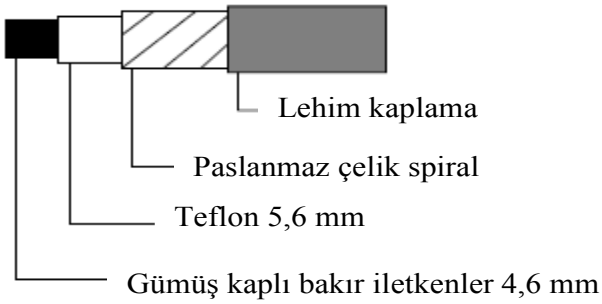
Kablo sensörlerin betonarme elemanlarda hasar tespiti için kullanıldığı bir diğer çalışmada 15 metre uzunluğunda bir kiriş burulma yüküyle test edilmiştir. Kullanılacak kablo sensör, hassasiyetin arttırılması amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Bu özel tasarım kablo sensörde dış iletken olarak spiral biçiminde iç

yalıtkana sarılan bakır kullanılmıştır. Sensörün yapısı ve iki spiralin ayrılması durumunda akım akış yolu değişimi Şekil 2.20'de görülmektedir.



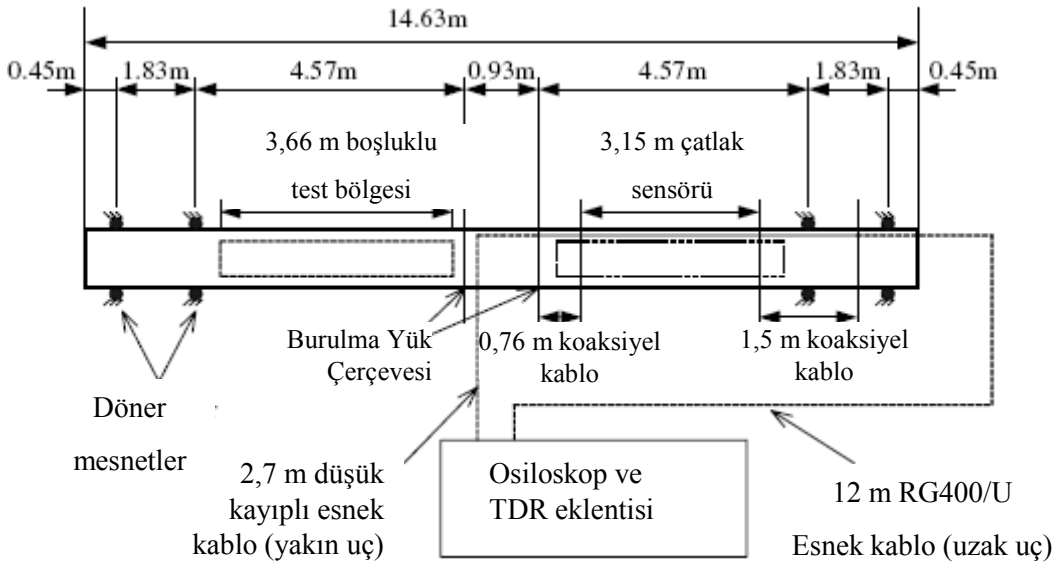
Şekil 2.20. Özel tasarım kablo sensör ve hasar oluşumu (Chen ve diğ., 2005)

Farklı iç ve dış iletken çapları ile farklı bakır spiral genişlikleri ile yapılan nümerik analizlerde, spiral yoğunluğunun artmasıyla (birim boyda dönme sayısı) hasara karşı hassasiyetin arttığı görülmüştür. Bu tür bir kablo sensör, el yapımı olması sebebiyle düzensiz bir yapıya sahiptir. Düzensiz yapısı dolayısıyla sağlıksız ölçümlere yol açacağı yorumlanmış ve bu yüzden daha kolay üretilebilen Şekil 2.21'de görülen kablo sensör geliştirilmiştir. Kablo sensör dört bileşenden oluşmaktadır. İç iletken olarak gümüş kaplı bakır sargı, iç yalıtkan olarak teflon, dış iletken olarak paslanmaz çelik spiral ve korucuyu ceket olarak ince bir lehim kaplama kullanılmıştır. Oluşturulan sensörün nominal empedansı 19 ohm ve spiral genişliği 4,3 mm'dir. Empedans düzenliliği ∓ %7 olarak kaydedilmiştir.



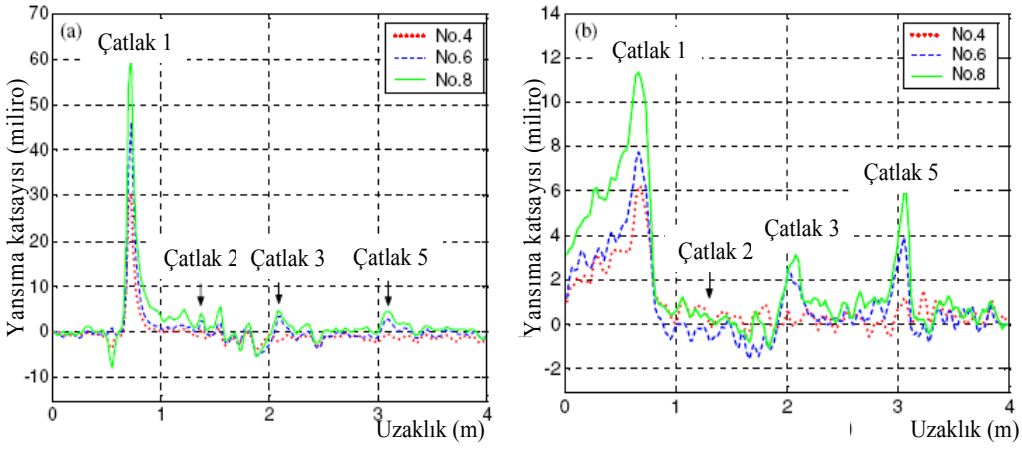
Şekil 2.21. Kablo sensör (Chen ve diğ., 2005)

Şekil 2.22'de burulma test düzeneği ve kablo sensörün yerleşimi görülmektedir. Yakın ve uzak uçlardan çıkan kablo sensörden iki farklı ölçüm alınabilmiştir. Test edilen boşluklu kiriş, burulma çerçevesine yerleştirilmiş ve döner mesnetler ile sabitlenmiştir. Tersinir tekrarlı olarak uygulanan burulma yükü ile kirişte oluşan çatlaklar TDR ile belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 2.22. Burulma test düzeneği (Chen ve diğ., 2005)

Şekil 2.23'de 4,6 ve 8 numaralı burulma döngülerinde yakın ve uzak uçlardan alınan TDR ölçümleri görülmektedir. Solda yer alan yakın uç ölçümünde 1 numaralı çatlakta 0,002 rad/m dönmede yansıma katsayısı 62 miliro olarak okunmuştur. Aynı çatlakta uzak uç ölçümünde yansıma katsayısı 12 miliro olmuştur. Bu durum sinyal kayıplarıyla açıklanmıştır. Sinyal kaybı daha önce de belirtildiği üzere kablo boyunun bir fonksiyonudur. Yakın uç ölçümünde sensör uzunluğu uzak uç ölçümüne göre daha azdır.

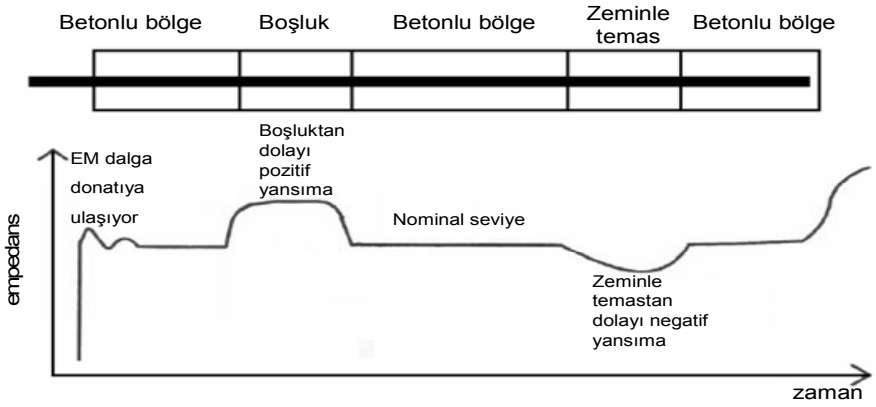


Şekil 2.23. Yakın uç (solda) ve uzak uç (sağda) ölçümleri (Chen ve diğ., 2005)

Tang ve Yeung (2006), TDR yönteminin betonarme kazıkların bütünlük testi (pile integrity test-pit) ve kazık uzunluğu tespiti için kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır.

Fakat farklılık olarak, sensör vazifesi gören koaksiyel kablo yerine, boyu önceden hassas bir şekilde ölçülmüş olan kazık donatısı iletken olarak kullanılmıştır. Böylelikle TDR cihazından, kazık donatısına aktarılan elektromanyetik dalga (voltaj adımı), zemin üzerinden dönerek, paralel iki iletkenli iletim hattı oluşturulmuş olur.

Bu uygulamadaki temel amaç, iki iletkenin (donatı ve zemin) eksenleri arasında kalan beton içinde herhangi bir süreksizlik olup olmadığını kontrol etmektir. Çalışmada, kazıkların imalatı sırasında, bilinçli olarak kesit daralmaları yaratılmıştır (Şekil 2.24). Daha sonra yapılan TDR ölçümleriyle kesit daralmalarının yeri ve uzunluğu 2 cm hassasiyetle görüntülenmiştir. Bu tür bir uygulamanın en kritik noktasının, zamanla donatılarda oluşan korozyon etkisinin, geri yansıyan dalganın karakteristiklerinde oluşturacağı değişimler olduğunu düşünmek mümkündür (Tang ve Yeung, 2006). Unutulmaması gereken bir diğer nokta ise TDR yönteminin bu şekilde kullanılması hasar tespitinden ziyade kazık profilinde bütünlük kontrolü için uygun olmasıdır.



Şekil 2.24. Kazık profili ile empedans değişimi (Tang ve Yeung, 2006)

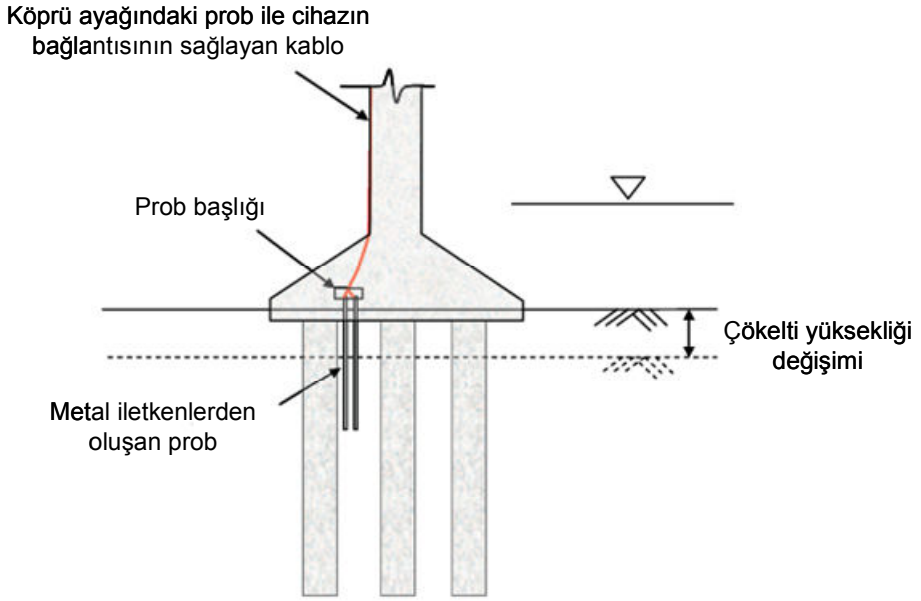
Kablo sensör eksenel yük altında kesit değişimine uğrar. İletim hattı teorisi hatırlanacak olursa bir kablo sensörün geometrik yapısının bozulması sonucu empedans değeri değişmekteydi. Empedans değişimi ile eksenel birim deformasyon arasında Denklem (2.12) elde edilmiştir (Tang ve diğ., 2001).

$$\frac{\Delta Z}{Z_0} = -\frac{\upsilon(b^2 - a^2)}{((1-2\upsilon)a^2 + b^2)\ln(b/a)}\, e_0 \tag{2.12}$$

Denklem (2.12)'de e_0 kablo sensörün birim deformasyonu, υ ise poisson oranıdır.

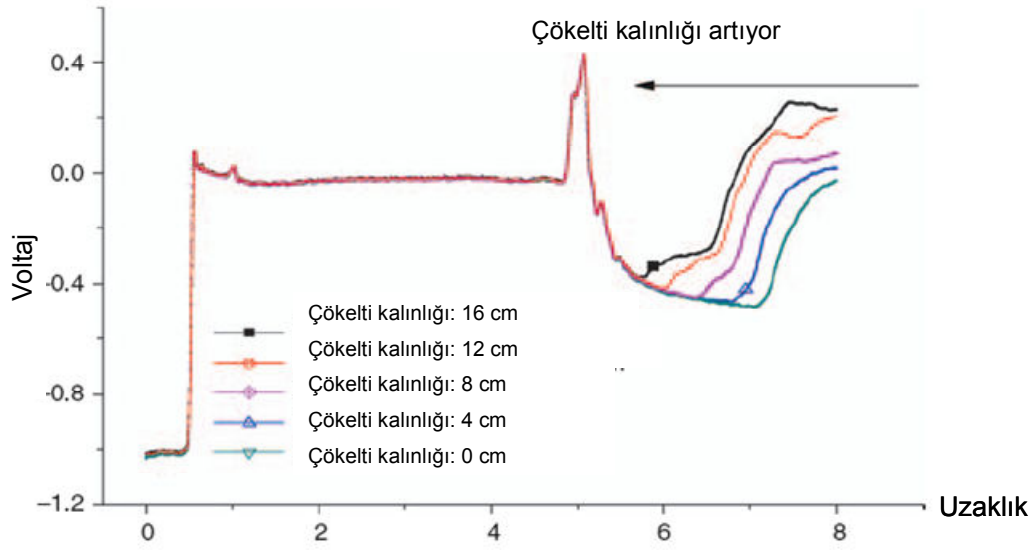
2.4. İnşaat Mühendisliğinde Diğer TDR Uygulamaları

Su içinde kalan köprü ayaklarında yüksek debili akıntı sonucunda oluşan zemin kaybı (scour), köprülerin ayakta kalmasının önünde ciddi bir tehlikedir. Zemin kaybının derecesinin belirlenmesi için TDR yönteminin kullanımı oldukça güncel sayılabilir. Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde yöntemin temel prensibinin köprü ayaklarına yerleştirilen ve suyu geçerek zemine gömülen iki metal iletkenin arasındaki malzeme değişiminin elektriksel olarak izlenmesi olduğu görülmektedir. Şekil 2.25'te örnek bir uygulama görülmektedir.



Şekil 2.25. Köprü ayağında çökelti yüksekliğinin izlenmesi (Yu ve Yu, 2009)

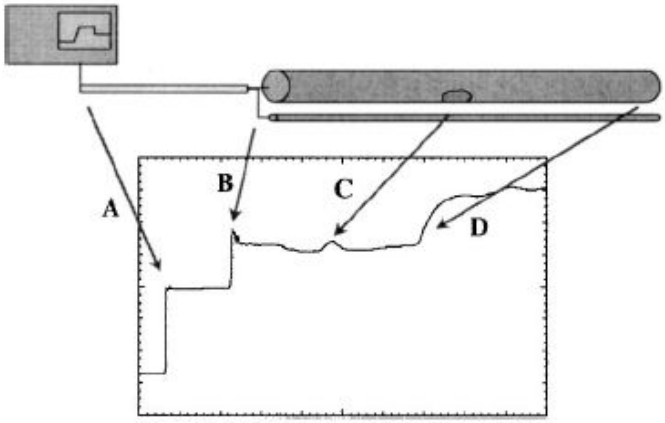
TDR sinyallerinden elde edilen voltaj değişimi, çökelti yüksekliğindeki değişimi işaret etmektedir. Şekil 2.26'dan görüldüğü üzere, çökelti kalınlığının artmasıyla TDR sinyalinin yansıma süresi ve genliği azalmaktadır. Bu değişimi boyutlandırmak için iletim hattı teorisini kullanmak yeterli olmaktadır. Fakat sudaki tuz oranının ölçüm doğruluğunda oluşturacağı etki göz önüne alınmalıdır.



Şekil 2.26. Çökelti kalınlığı ile voltaj değişimi (Yu ve Yu, 2009)

İnşaat yapılarında çelik kabloların veya donatıların paslanması (korozyon) yapı durabilitesi açısından önde gelen sorunlardan biridir. Özellikle köprülerde çelik askı halatları taşıdıkları yük ve görevleri düşünüldüğünde paslanmanın en son isteneceği elemanlar içinde öne çıkar. Çelik halatlarda paslanmanın belirlenmesi amacıyla geliştirilen birçok yöntemin (direnç ölçümü ve manyetik indüktans ölçümü gibi) en önemli problemi, halat üzerinde paslanmanın yerinin konumlandırılmasında yaşanan güçlüklerdir (Liu ve diğ., 2002).

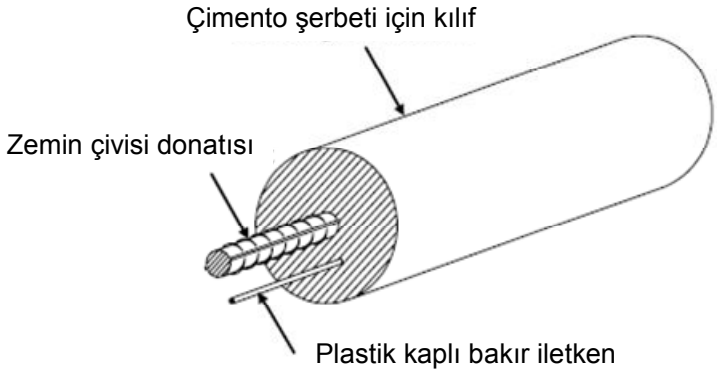
TDR yöntemi ile paslanmanın yerinin ve boyutunun belirlenmesi, tarama yapılmak istenen yapı çeliğine paralel olarak yerleştirilen ikinci bir iletken ile bir iletim hattı oluşturup, hatta gönderilen EM sinyalin geri yansımalarının kaydedilmesi ile mümkün olur. Eğer yapı çeliğinde bir hasar mevcutsa gönderilen sinyalin bir kısmı hasarlı noktadan geri yansır. Yansıyan sinyalin gidiş-dönüş süresi ile paslanmanın yeri, genliği ile paslanma aşınmasının boyutu ilişkilendirilebilir. Şekil 2.27'de örnek bir uygulama görülmektedir.



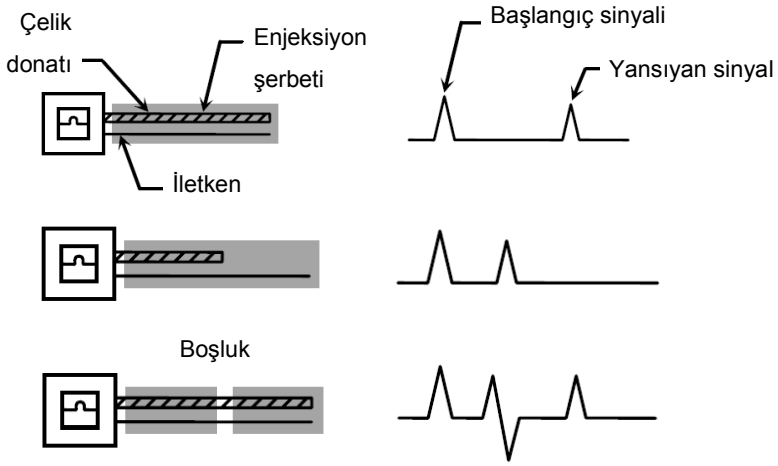
Şekil 2.27. Paslanmanın TDR sinyaline etkisi (Liu ve diğ., 2002)

Yöntemin eski yapılara uygulanması için pas payı denilen beton kabuğun dışına yerleştirilecek bir iletken de kullanılabilir. Fakat bu durumda ölçüm hassasiyetin azalacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin beton içine gömülü ikinci iletken kullanıldığında %22,5'lik bir paslanma aşınması, empedans değerini %30 değiştirirken ikinci iletkenin dışarıdan uygulanması halinde bu değişim %4,5 ile sınırlı kalmaktadır.

Derin kazı yapımında özellikle kendini tutabilir bir zemin bulunmadığında destekli kazıya ihtiyaç duyulur. Kazı alanının güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan iksa sistemlerini güçlendirmek için zemin çivilerine başvurulabilir. Zemin çivisinin uzunluğunun yeterli olması ve donatısının etrafının enjeksiyon şerbeti ile bütünüyle kaplanmış olması, zemin çivili iksa sistemlerinin kalite kontrolünde en önemli iki ayrıntıdır. Bu kontrollerin TDR yöntemi ile gerçekleştirilmesi mümkündür. Bu amaçla zemin çivisi için zemine açılan deliğe, donatıyla paralel olacak şekilde plastik kaplı bir iletken de yerleştirilir (Şekil 2.28). Böylelikle oluşturulan iletim hattı boyunca TDR ile gerekli ölçümler yapılabilir. Zemin çivisi uzunluğu boyunca hava boşlukları meydana gelmişse, bu durum cihaza yansıyan sinyallerde yansıma oluşturur (Şekil 2.29).



Şekil 2.28. Zemin çivisi içinde iletim hattı (Cheung ve Lo, 2011)

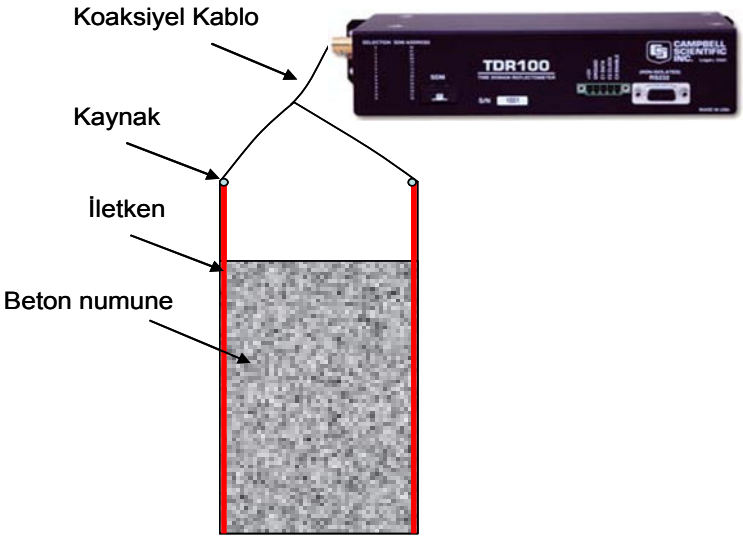


Şekil 2.29. Farklı kusurlarda TDR sinyalleri (Cheung ve Lo, 2011)

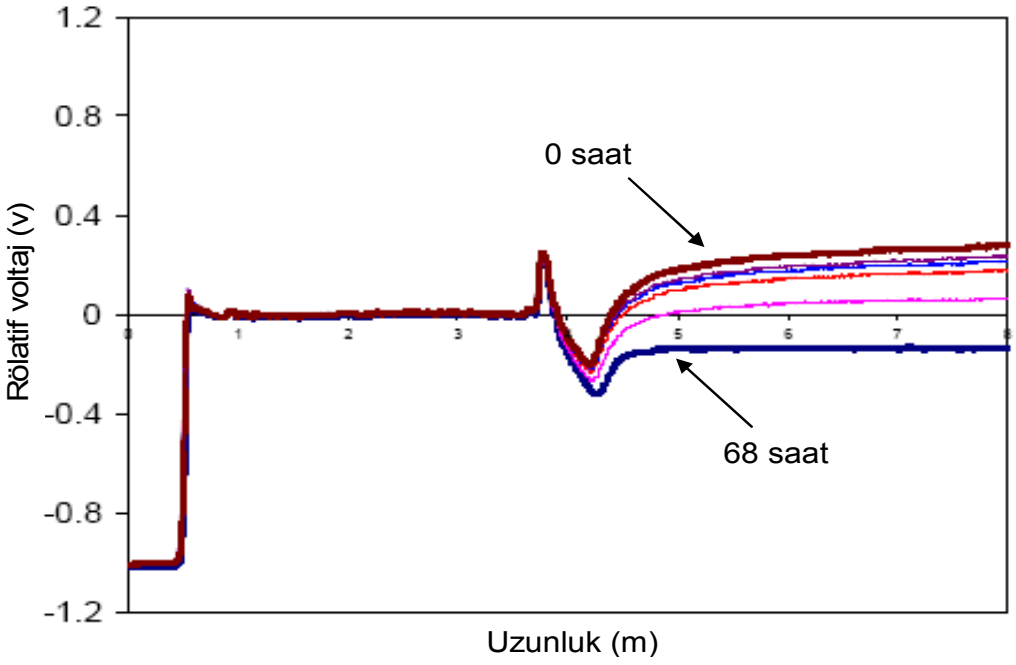
TDR, taze beton kalitesinin belirlenmesi için slump ve beton basınç dayanımına dayanan geleneksel kalite kontrol yöntemlerine alternatif olmasa bile ilave bir kontrol aracı olarak bir süredir kullanılmaktadır. Beton karışım oranının kontrol edilmesi, hava içeriği, gerekli kür süresi ve segregasyonun varlığının belirlenmesi gibi amaçlara uygun olduğu düşünülen TDR yöntemi, Şekil 2.30'da görüldüğü gibi kurulan bir düzenekle kullanılmaktadır. Taze betonun içine dökülecek bir tüpün iki kenarına yerleştirilen iki iletkenle oluşturulan iletim hattı üzerinde yapılan TDR ölçümü ile betonun su içeriği gerekli kalibrasyonun yapılması ile belirlenmektedir.

Şantiye yönetimi açısından beton kalıplarının zamanında sökülebilmesi hem güvenlik hem de imalat hızının düşmemesi için önemlidir. Bunun sağlanabilmesi betonda çimento hidratasyonunun ne ölçüde tamamlandığı bilmekle mümkün olur. Eğer hidratasyonun belirli bir oranının daha önceden bilinen bir su içeriği seviyesine erişildiğinde gerçekleştiği kabulü yapılabilirse, betonda söz konusu su içeriği TDR

yöntemiyle belirlenip kalıbı sökmek için fikir sahibi olunabilir. Şekil 2.31'de TDR sinyallerinin kür süresi ile nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.30. Silindir numuneler için geliştirilen tüp sensör (Yu ve Liu, 2010)



Şekil 2.31. Kür süresine bağlı olarak TDR sinyalleri (Yu ve Liu, 2010)

3. KAZIKLAR VE HASARLARININ BELİRLENMESİ

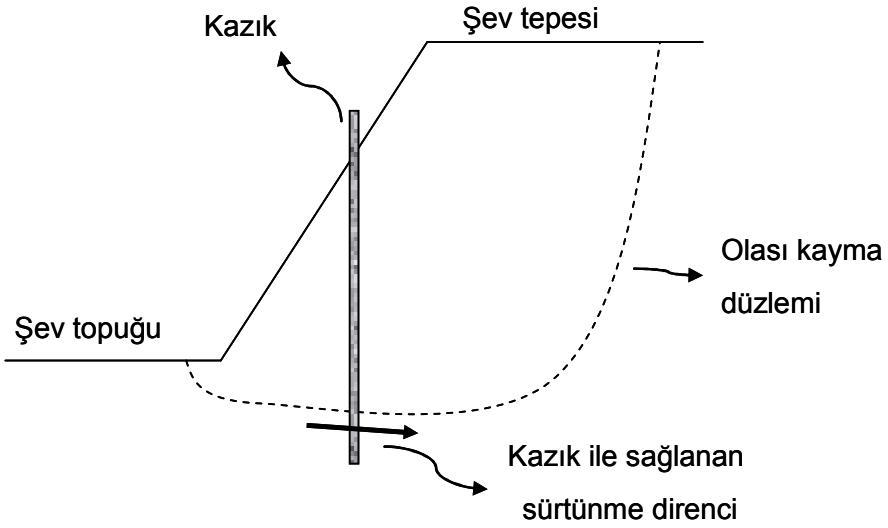
Bu bölümde bir derin temel uygulaması olarak kazıklı temellerin yapım yöntemleri ve yük taşıma mekanizmaları hakkında genel bilgiler verilecektir. Ayrıca farklı sebeplerden kaynaklanan kazık hasarlarına örnekler verilip, bu hasarların belirlenmesinde kullanılan yöntemler tanıtılacaktır.

3.1. Kazıklı Temeller

Derin temeller, yapımı daha basit ve ucuz olan yüzeysel temellerin uygun olmadığı durumlarda tercih edilen ve temel derinliği ile genişliği arasındaki oran 5'ten büyük olan temel sistemleridir. Derin temel sistemlerinden kazıklı temeller, binlerce yıllık bir tarihe sahiptirler. Kazıklı temellerin tercih edildiği durumlar için aşağıdaki örnekler sıralanabilir (Yıldırım, 2004):

- Üst zemin tabakalarının yapıdan gelen servis yükleri için gerekli taşıma gücüne sahip olmadığı durumlarda, yükleri daha sağlam olan alt zemin tabakalarına aktarmak için kullanılabilirler.
- Yüksek yapı temellerinde, yatay yük kapasitesini arttırmak için kullanılabilirler.
- Özellikle köprü ayaklarında farklı sebeplerde meydana gelebilecek temel kenarı ve altı oyulmalarına karşı kazıklı temeller tercih edilebilir.
- Bitişik parselde inşa edilecek bir yapı için gerçekleştirilecek derin kazı ile yüzeysel temelin zayıflayacağı düşüncesi sonucunda tedbir olarak kullanılabilirler.
- Su altında kalan temel sistemlerinin maruz kaldığı kaldırma kuvvetinin karşılanması için kazıklı temel düzenlenebilir.
- Kazıklar zemin hareketini sınırlandırmak için kullanılabilirler.

Kazıkların zemin hareketi sınırlandırmak için kullanıldığı yerlerden birisi heyelan tehlikesi bulunan şevlerdir. Şev stabilitesinin sağlanması için şev boyunca şevin olası kayma düzlemini kesecek şekilde belirli aralıklarla kazıklar yerleştirilir. Bu yöntemle kazığın olası kayma düzlemine sağladığı ilave sürtünme direnci sayesinde zemin hareketi sınırlandırılmış olur. Şekil 3.1'de yönteme örnek bir uygulama görülmektedir.



Şekil 3.1. Kazıklarla zemin hareketinin sınırlandırılması (Ang, 2005)

Kazıkların sınıflandırılması farklı değerlendirmeler ile yapılabilse de en yaygın sınıflandırmanın, kazık malzemesine göre yapıldığı söylenebilir. Günümüzde en yaygın kullanılan kazık malzemeleri ahşap, beton ve çelik olarak sıralanabilir. Kazık malzemesinin seçimi aşağıdaki etmenler dahilinde gerçekleştirilir (Coduto, 2001):

- Uygulanan yükler: Kazık malzemesinin dayanımı, kazığın taşıması beklenen yüke uygun olmalıdır.
- Gerekli çap: Çoğu kazık tipleri yalnızca belirli çaplarda bulunabilir.
- Gerekli uzunluk: Sağlam zemin seviyesinin derinliğine bağlı olarak, kazıkların ekli yapılması mecburiyeti doğabilir. Fakat her kazık tipi ekleme için uygun değildir.

- Malzemenin erişilebilirliği: Maliyet analizi yapıldığında uygulama sahasının coğrafi konumu göz önünde bulundurulmalıdır.

- Malzemenin ortam şartları karşısında durabilitesi: Kazık malzemesinin, kazığın yerleştirileceği ortamda bulunan zeminin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanan etkilere (yüksek su içeriği, yüksek kimyasal içeriği, yüksek asitlik derecesi gibi) dayanıklı olması istenir.

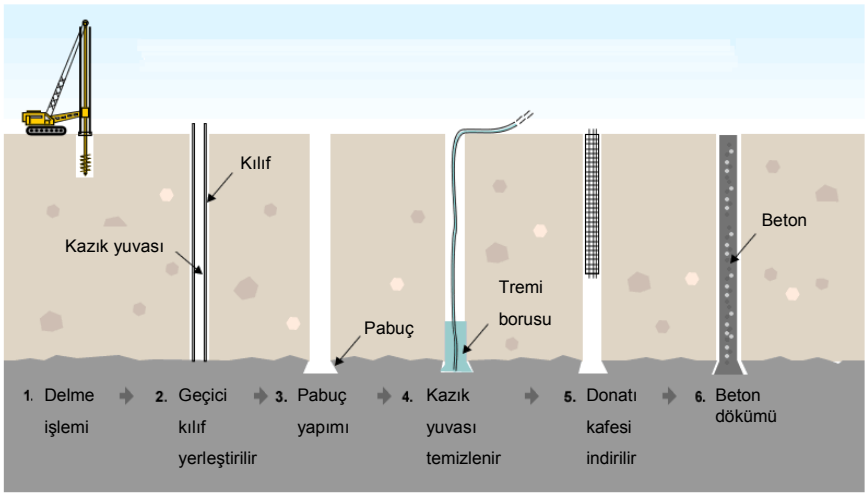
- Çakma koşulları: Bazı kazıklar yüksek enerjili çakmalara izin verirken, diğerleri bu enerji seviyesinde hasara uğrayabilir.

Beton kazıklar imalat yerlerine göre, çakma kazıklar ve yerinde dökme (fore) kazıklar olarak iki grupta incelenebilir. Çakma kazıklar, önceden imal edilen (precast) donatılı beton elemanların zemine çakılmasıyla elde edilir. Bu tür kazıklar genellikle kare ya da sekiz köşeli enine kesitlere sahiptir.

Çakma kazıklar yumuşak kil, silt ve turbalık zeminlerde boğulma tehlikesi olmadan yerleştirilebilirler. Kabarma oluşumu, zeminin çakma işlemine uygun olmaması ve kazıkların nakli gibi konular çakma kazıkların kullanım zorlukları arasında sayılabilir.

Çakma koşullarının uygun olmadığı durumlarda tercih edilen fore kazıklar, zeminde kabarma oluşturmaması, kazık boyunun istenildiği gibi ayarlanabilmesi, delgi makinelerinin kazık çakma makinelerine oranla daha ekonomik olması, yapım işlerinin daha az gürültülü ve titreşimli olması, delgi sırasında zemin koşullarının gözlemlenebilmesi ve kayaç zeminleri delip geçebilme şansı oluşturması gibi avantajlarıyla yaygın bir kazık uygulaması haline gelmiştir.

Fore kazıklar, zeminde kazı ya da sondaj ile açılan kazık yuvasının donatılı veya donatısız betonla doldurulması ile koruma borulu (kılıflı) veya koruma borusuz yapılan kazıklardır (TS 3168 EN 1536, 2001). Şekil 3.2'de bir fore kazığın yapım aşamaları görülmektedir.



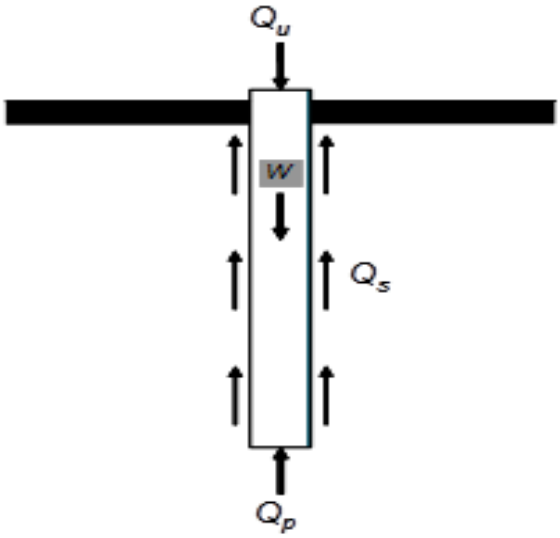
Şekil 3.2. Fore kazığın yapım aşamaları

Kazıklar sağlam zemine soketlenmeleri durumunda, yapı servis yüklerini daha derinlerde yer alan sağlam zemine aktarma görevini iki yük taşıma bileşeni ile yaparlar (Şekil 3.3). Bunlardan birincisi kazığın düşey yük etkisi ile aşağıya doğru hareketinden kaynaklanan çeper sürtünmesidir (Q_s). Çeper sürtünmesi, zemin kayma mukavemetine yani zemin kohezyonuna ve kazık yüzeyine etkiyen normal gerilme değerine bağlıdır (Celep, 2007). Kazık ile onu çevreleyen zeminin rölatif hareketinin yön değiştirmesi, negatif kazık sürtünmesi olarak adlandırılan bir çeper sürtünmesi oluşturur.

Kazık taşıma kapasitesini oluşturan diğer bileşen ise uç direncidir (Q_p). Uç direnci, kazık tabanı ile zemin arasındaki basınç yüklemesinin sonucudur. Kazık geometrisinden (pabucun varlığı) ve zemin mukavemet parametrelerinden doğrudan etkilenen uç direncinin, derinlikle birlikte arttığı fakat bu artışın belirli bir noktadan sonra azaldığı ve belirli bir limit değere ulaşabileceği kabul edilir (Kulhawy ve Carter, 1988).

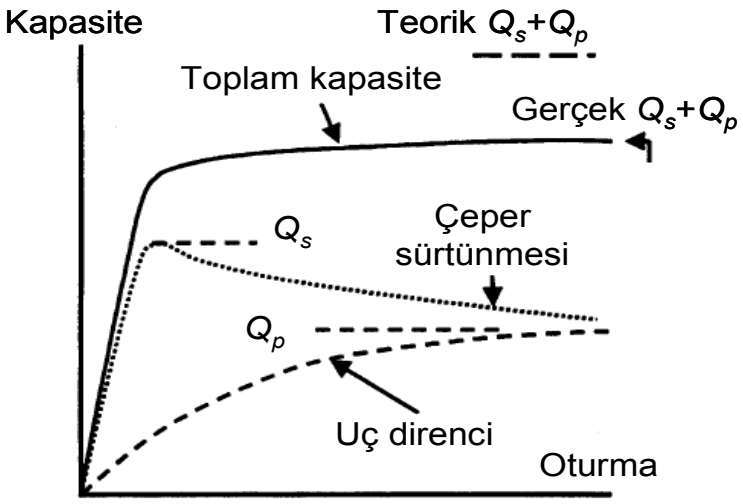
Şekil 3.3'te gösterilen tekil kazığın serbest cisim diyagramından anlaşılabileceği üzere kazığın toplam düşey yük taşıma kapasitesi (Q_u), çeper sürtünmesi ve uç direnci değerlerinin toplamından, kazığın zati yükünün (M_p) çıkartılmasıyla elde edilir.

$$Q_u = Q_s + Q_p - M_p \tag{3.1}$$



Şekil 3.3. Tekil kazığın serbest cisim diyagramı

Sahada gerçekleştirilen birçok düşey yükleme testlerinden edinilen izlenime göre, fore kazıklarda yükün büyük kısmını çeper sürtünmesi karşılamaktadır. Fakat 12 mm oturmadan sonra kazığı çevreleyen zeminde oluşan kayma göçmeleriyle çeper sürtünmesinin mobilize olduğu ve bu aşamadan sonra gelen yükleme artışlarını uç direnci tarafından karşılandığı kabul edilir. Bu bakış açısıyla bakıldığında Denklem (3.1)'in toplam taşıma gücünü tam doğru olarak yansıtmadığı düşünülebilir. Söz konusu durum Şekil 3.4'te açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.4. Düşey yük altında kazık kapasitesinin bileşenleri (Neil ve Reese, 1999)

Kazık uç direnci, kazığın uç kısmının üst bölümlerde yer alan zeminlere oranla taşıma gücü daha yüksek olan bir zemin tabakasına girmesi ile oluşur. Kazık ucunun bu tabakada kritik bir değerde düşey deplasman yapması durumunda etkin hale gelebilen kazık uç direnci, Denklem (3.2) ile hesaplanabilir.

$$Q_p = A_p \left(c_z \, N_c + \sigma_{vp} \, N_q + 0{,}5 \gamma_s \, D \, N_\gamma \right) \tag{3.2}$$

(3.2) bağıntısında; A_p kazık kesit alanı, c_z zemin kohezyon katsayısı, σ_{vp} kazık uç seviyesindeki zemin gerilmesi, D kazık çapı, γ_s zemin birim hacim ağırlığı ve N_c, N_q, N_γ ilgili kapasite katsayıları olup, esas olarak zeminin kayma direnci açısına φ, zeminin sıkışabilirliğine ve kazığın geometrisine bağlıdır.

Çeper sürtünmesinin oluşması için kazık ve çevresini sargılayan zemin arasında rölatif bir hareketin gerçekleşmesi gerekir. Çeper sürtünmesi kazık yanal alanına ve birim sürtünme direncine (f) bağlıdır ve Denklem (3.3) ile hesaplanabilir. Birim sürtünme direnci granüler zeminlerde ve kohezyonlu zeminlerde farklı yöntemlerle hesaplanır.

$$Q_s = \sum p \times \Delta L \times f \tag{3.3}$$

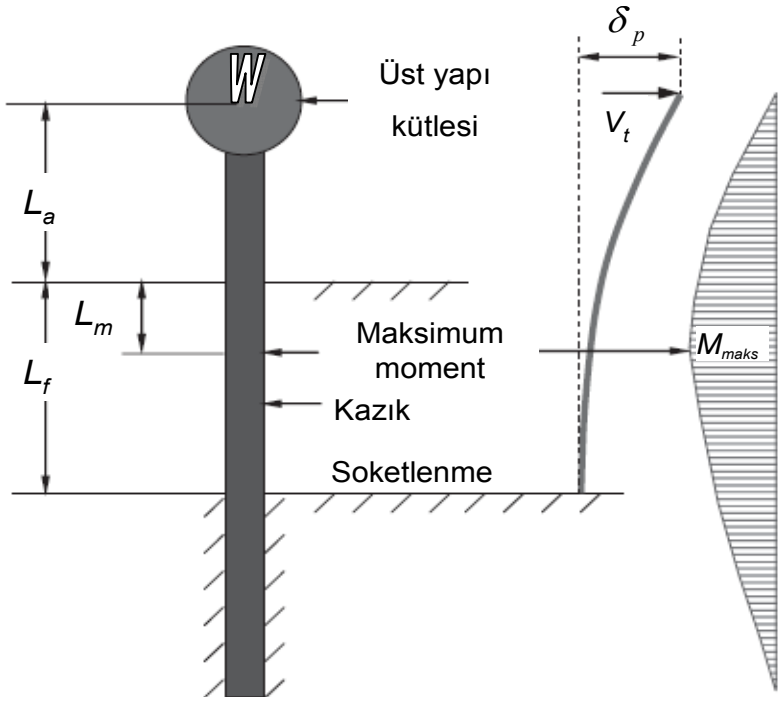
Kazıklı temellerin deprem etkisinde modellenmesi, zemin ve kazık arasındaki kinematik etkileri de içeren karmaşık bir süreçtir. Geçmiş depremlerden elde edilen gözlemler sonucunda, yatay deprem kuvvetlerinin kazıklarda ciddi hasarlara yol açtığı söylenebilir. Örneğin, bağıl sıkılığı %40'ın altında olan gevşek zeminlerin drenajsız dinamik yük koşullarında sıvılaşma potansiyelinin gerçeğe dönüşmesi durumunda ortaya çıkan kazık hasarları göçme boyutuna varmaktadır.

Bir kazığa etkiyen yatay kuvvet (V_t), kazığın taşıdığı üst yapıdan aktarılan taban kesme kuvvetidir ve Denklem (3.4) ile hesaplanabilir (TDY, 2007).

$$V_t = \frac{W \times A(T_1)}{R(T_1)} \tag{3.4}$$

$A(T)$ spektral ivme katsayısı, T_1 binanın birinci doğal titreşim periyodu ve $R(T)$ taşıyıcı sistem davranış katsayısıdır. Tekil bir kazığın taban kesme kuvveti ile

davranışı eşdeğer konsol yaklaşımı ile modellenebilir. Söz konusu yaklaşım Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Zemin-kazık sistemi için eşdeğer konsol yaklaşımı (Haldar ve Babu, 2009)

Kazık başındaki yatay ötelenme (δ_p), Denklem (3.5)'te görülebileceği üzere kazığın zemin kotunun üstündeki uzunluğuna (L_a), soketlenme derinliğine (L_f), kazığın eğilme rijitliğine (E_pI_p) ve yatay kuvvet değerine (V_t) bağlı olarak hesaplanabilir (Poulos ve Davis, 1980).

$$\delta = V_t \frac{(L_a + L_f)^3}{3 E_p I_p} \tag{3.5}$$

Yine Şekil 4.4 yardımıyla kazık kesitinin taşıyabileceği maksimum moment Denklem (3.6) ile elde edilir.

$$M_{maks} = V_t \times (L_a + L_m) \tag{3.6}$$

3.2. Kazıklarda Muhtemel Göçme Mekanizmaları

Bir kazığın kendisini zorlayan bir zemin kütlesine ne ölçüde dayanabileceği, kazığın çapı, uzunluğu, eğilme rijitliği, soketlenme derinliği gibi parametrelerin dışında kayan zemin kütlesinin boyutlarına, ağırlığına ve mukavemetine bağlı olarak değişir. Tüm bu değişkenlerin bir araya gelmesiyle, kazıklarda göçme mekanizması oldukça karmaşık bir hal alır.

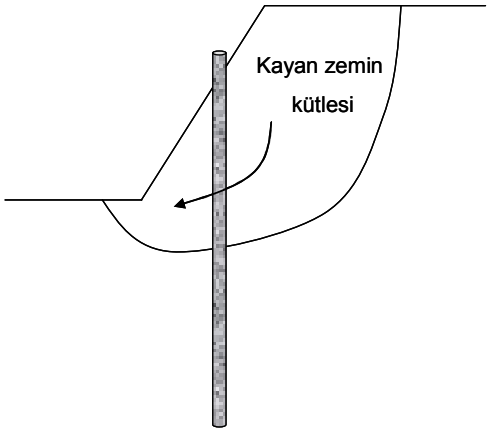
Kazıklar düşey yükler dışında pasif ve aktif yatay yükler alır. Pasif yatay yükler, kazığın etrafını sargılayan zemin hareketinden kaynaklanan yüklerdir. Aktif yatay kuvvetler ise dışarıdan kazığa etkiyen yatay yüklerdir.

Pasif yatay yükler altında kazıklarda temel olarak iki göçme mekanizmasından bahsedilebilir. Bu göçme mekanizmaları arasındaki fark kazığın eğilme momenti kapasitesi ve soketlenme derinliği ile ilgilidir.

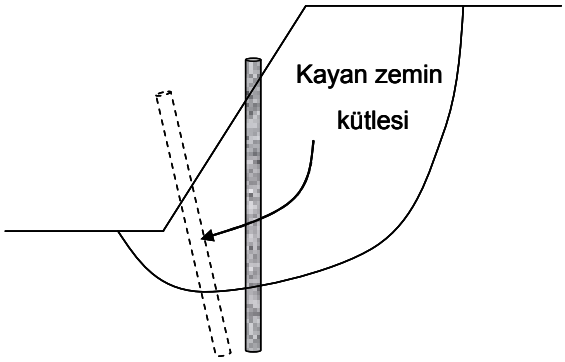
Eğer bir kazık yeterli eğilme moment kapasitesine sahipse ve soketlenme derinliği yeterli ise kayan zemin kütlesinden etkilenmeyecek ve hasar görmeyecektir (Şekil 3.6.a). Bu durumda kayan zemin kütlesi kazığın etrafından dolaşarak geçip gidecektir.

Soketlenme derinliğinin yetersiz olması durumda kazık kayan zemin kütlesiyle birlikte hareket ederek önemli ölçüde bir ötelenme gösterecektir (Şekil 3.6.b).

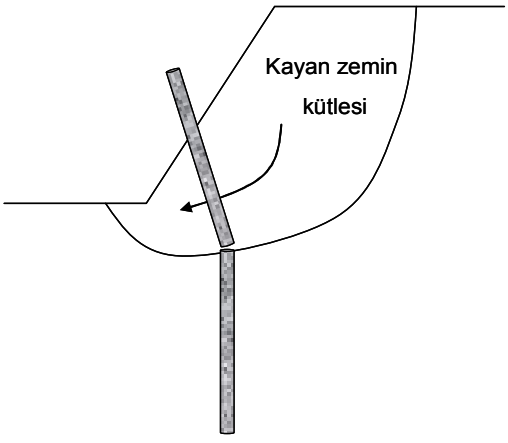
Kazığın soketlenme derinliğini yeterli olmasına rağmen eğer eğilme momenti kapasitesi olması gerekenden düşükse, kazığın düşey ekseniyle kayma düzleminin kesiştiği noktada bir plastik mafsal oluşarak kazık bu noktadan göçebilir (Şekil 3.6.c).



(a)



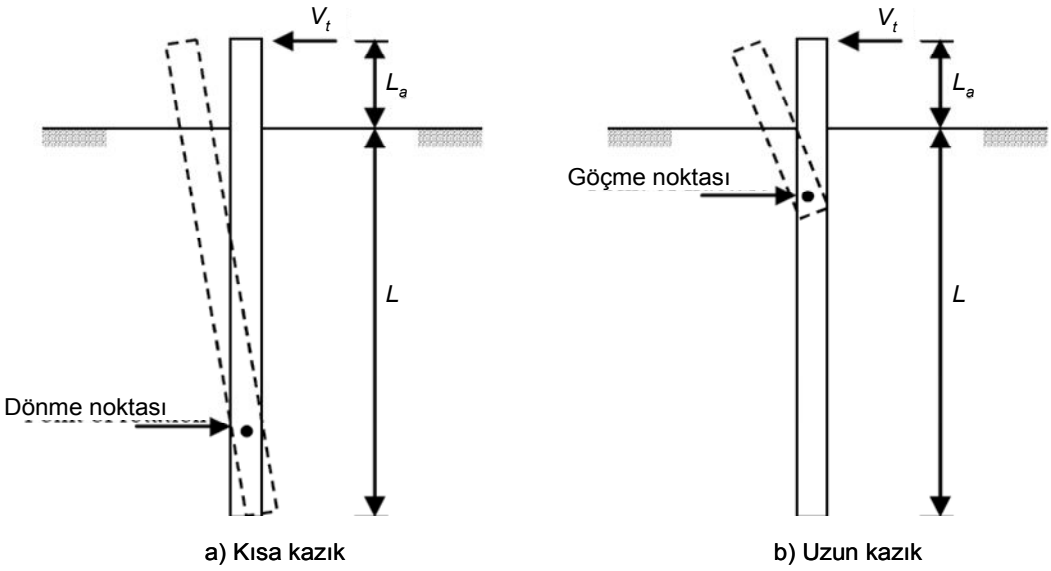
(b)



(c)

Şekil 3.6. Kazıklarda pasif yatay yüklerle hasar oluşum mekanizmaları (Kanagasabai, 2010)

Aktif yükler altında kazığın davranışını en temel olarak kazığın boyu belirler. Orta uzunluktaki kazıklarda göçme, yatay yük ile kazığın kendi üzerinde oluşan dönme noktası etrafında dönmesi ile meydana gelir. Uzun kazıklarda ise göçme süreci, zemin yüzeyinden belirli bir uzaklıkta (maksimum momentin oluştuğu nokta) ortaya çıkan plastik mafsal ile başlar. Şekil 3.7'de orta ve uzun boylu kazıkların serbest uçlu (free head) durum için göçme mekanizmaları görülmektedir. Kazık üst noktasının tutulu olduğu hallerde (fixed head), kazık başlığının hemen altında ikinci bir plastik mafsal daha oluşacaktır.

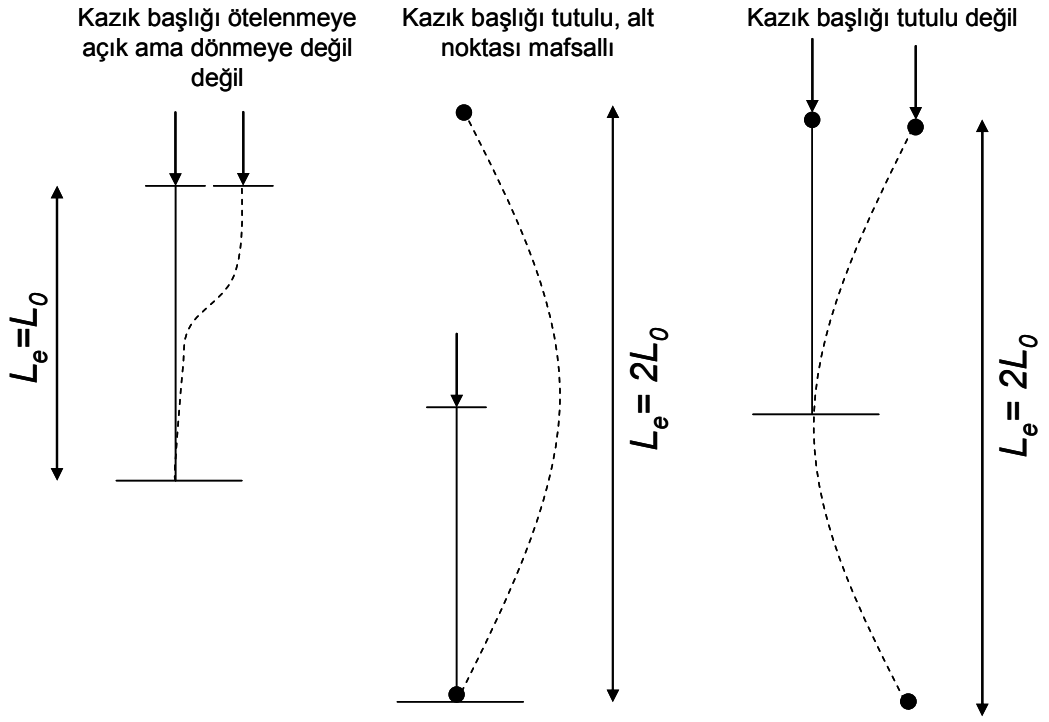


Şekil 3.7. Tekil kazıkların yatay yük altında göçme modları (Poulos ve Davis, 1980; Phanikanth ve diğ., 2010)

Kazık davranışının önemli bir parçası olan zemin şartları, deprem sırasında değişime uğrayabilir. Suya doygun granüler zeminlerde, depremin çevrimsel hareketine bağlı olarak boşluk suyu basıncı artarak efektif gerilmenin düşmesine sebep olur (sıvılaşma). Bu durumda kazığın etrafını çevreleyen zeminden kazığa sağlanan yanal destek ortadan kalkarak, kazık burkulmaya açık hale gelir. Burkulmaya karşı ortaya çıkan bu narinlik, sıvılaşan zeminlerde çoğu zaman gerçekleşen zeminin yatay ötelenmesi sebebiyle daha tehlikeli bir hal alır. Bunun sebebi ise yatay ötelenmeden dolayı kazık üzerinde oluşan plastik mafsalların, kazığın eğilme rijitliğini azaltarak kritik burkulma yükünü düşürmesidir (Shanker ve diğ., 2007). Kazıklar için kritik burkulma yükü Denklem (3.7) ile verilmiştir (Bhattacharya ve diğ., 2005).

$$P_E = \pi^2 \, EI \big/ L_e^{\,2} \tag{3.7}$$

L_e, efektif burkulma uzunluğu olmakla birlikte kazık başlığının mesnetlenme şartlarına ve kazığın soketlenme durumuna bağlı olarak değişir. Şekil 3.8'de bazı haller için efektif burkulma uzunlukları görülmektedir.



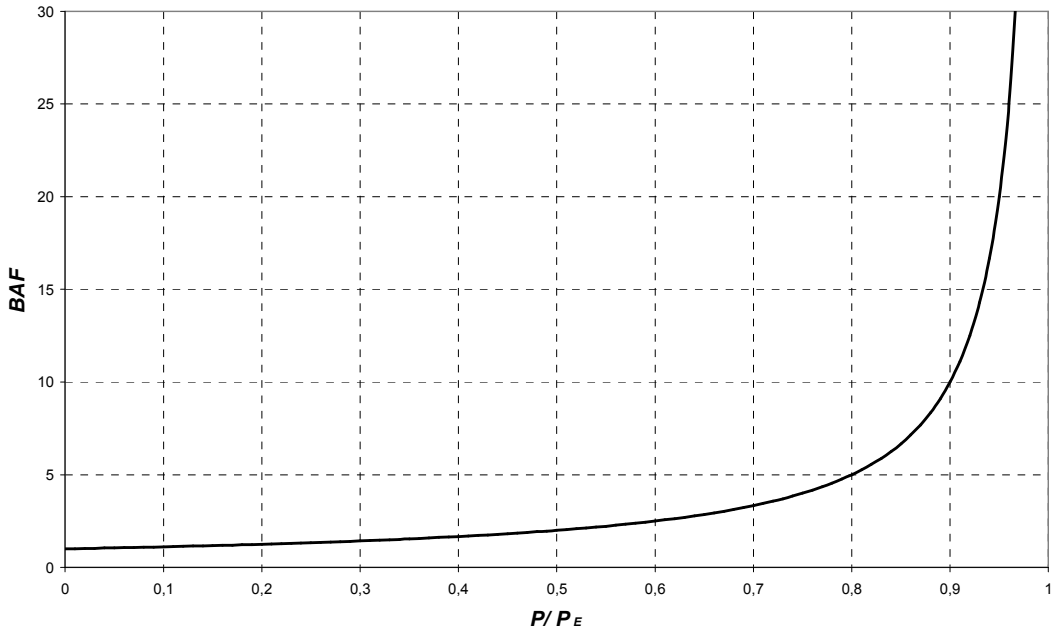
Şekil 3.8. Mesnetlenme şartlarına göre efektif burkulma uzunlukları

Elastik kolonların stabilite analizi (Timoshenko ve Gere, 1961), sadece yatay yükle oluşan ötelenmenin (y_0) eksenel yükün (P) varlığından etkilendiğini göstermiştir. Kazığın herhangi bir yük seviyesindeki nihai deplasmanının (y), y_0'a oranı olarak bilinen ve "burkulma büyütme katsayısı (buckling amplification factor, *BAF*)" olarak adlandırılan katsayı Denklem (3.8) ile hesaplanır (Dash ve diğ., 2008).

$$\frac{y}{y_0} = BAF = \frac{1}{\left(1 - \dfrac{P}{P_E}\right)} \tag{3.8}$$

Şekil 3.9'a bir grafik olarak yansıtılan Denklem (3.8), P/P_E oranının 0,6'yı geçmemesi durumunda %2 hata payıyla güvenlikle kullanılabilir. Bu sınırdan sonra plastik birim deformasyonlar sebebiyle oluşan eğilme rijitliğindeki hızlı düşüş ani bir

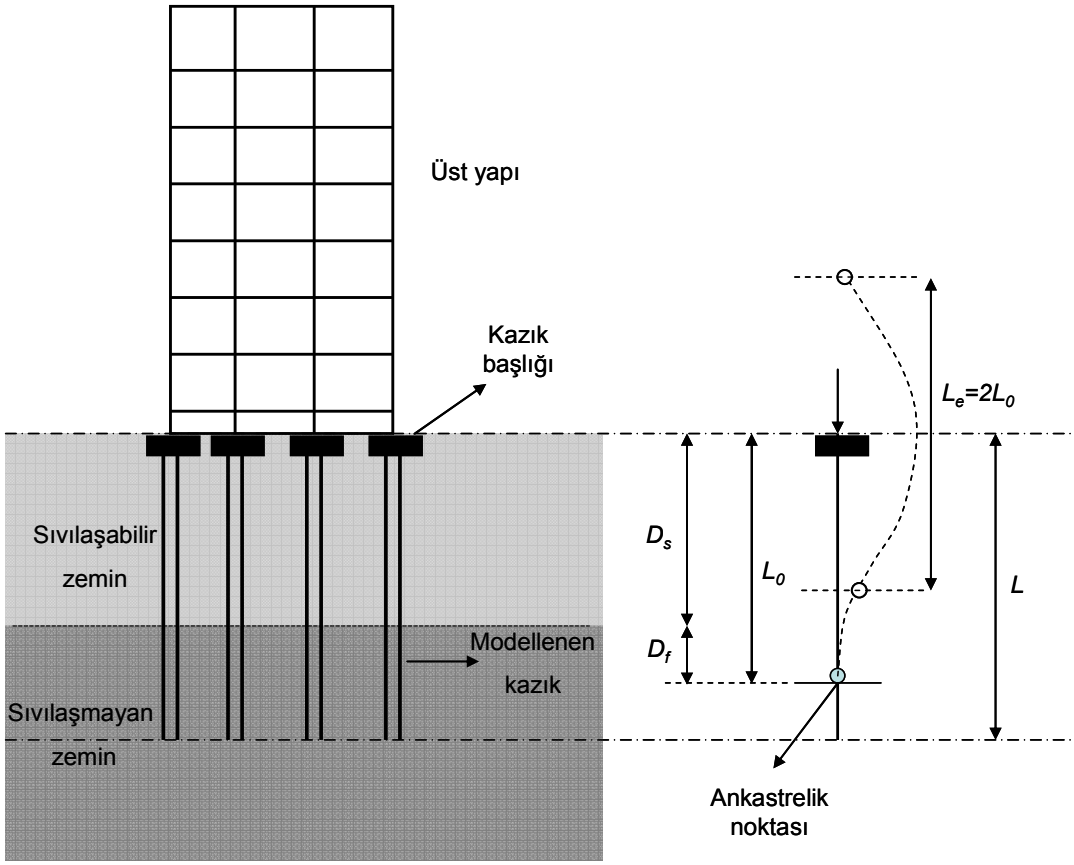
göçmeye sebep olabilir. Şekil 3.9 incelendiğinde P/P_E oranının 0,8 olması durumunda yatay ötelenmenin 5 katına çıktığı kolaylıkla görülebilir. Bu artış aynı zamanda $P\text{-}\delta$ momentinin de artması anlamına gelir ve bu durum kazık kesitinin öngörülenden daha fazla zorlanacağını işaret eder.



Şekil 3.9. Burkulma büyütme katsayısının eksenel yük oranıyla değişimi

Burkulma analizi sırasında kazığın ankastrelik noktası soketlenme derinliğinin belirli bir noktasında kabul edilir. Dolayısıyla efektif burkulma uzunluğu hesaplanırken bu nokta esas alınır. Kohezyonsuz ve normal konsolide kil zeminlerde, ankastrelik noktasının sıvılaşabilir zemin tabakasına uzaklığı olan D_f'nin belirlenmesi için önce kazığın eğilme rijitliğine ve zeminin yanal yatak katsayısı değişim çarpanına (η) bağlı olan rijitlik faktörü (T), Denklem (3.9) ile hesaplanır.

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{\eta}} \tag{3.9}$$



Şekil 3.10. Burkulmanın modellenmesi ve ankastrelik noktası

Davisson ve Robinson (1965), D_f'nin $1{,}8 \times T$ alınabileceğini belirtmişlerdir. Bu önerinin geçerli olabilmesi için kazığın zemin yüzeyinin üzerinde kalan uzunluğunun rijitlik faktöründen büyük olması gerekir. Yatak katsayısının (k_h), derinlikle değişmediği varsayılan zeminlerde ise rijitlik faktörü (R_f), Denklem (3.10) ile hesaplanır. Eğer kazığın zemin yüzeyinin üzerinde kalan uzunluğunun rijitlik faktörüne oranı 2'den büyükse $D_f = 1{,}4 \times R_f$ alınabilir.

$$R_f = \sqrt[4]{\frac{E_p I_p}{k_h}} \tag{3.10}$$

Bu uygulama adımlarıyla belirlenen eşdeğer kiriş modeli, geleneksel çerçeve analizi için burkulma yükünün ve kazık başlığındaki momentin hesaplanmasında kullanılabilir. Bununla beraber hesaplanan momentin kazıktaki gerçek momentten yüksek olması muhtemeldir ve bu yüzden model için gerekli zemin ve kazık parametrelerinin seçiminin dikkatli yapılması tavsiye edilir (Wilson ve Hilts, 1967).

3.3. Gözlemlenmiş Kazık Hasarları

Kazık davranışının karmaşık yapısına ve hasar mekanizmasına ışık tutması açısından geçmiş depremlerde kazıkların performansını gözden geçirmek faydalı bir araçtır. Bu bölümde geçmiş dönemde gözlemlenen kazık hasarları hakkında bilgiler sunulacaktır.

3.3.1. Showa Köprüsü (Niigata Depremi, 1964)

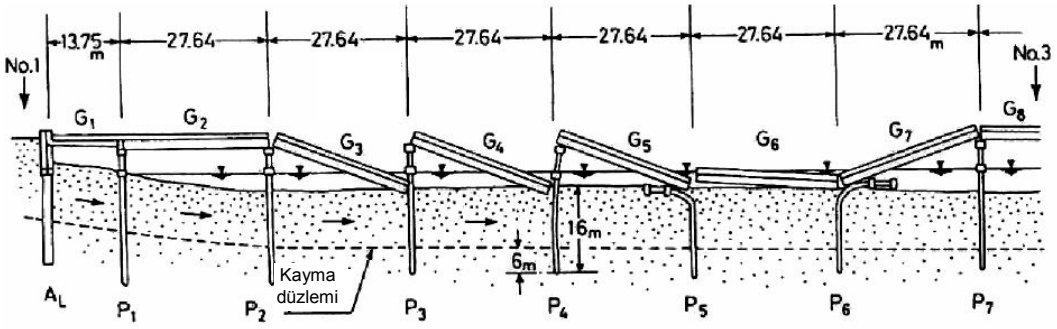
1964 yılında Japon Denizi'nde kıyıdan 22 km uzaklıkta yer alan Awa-shima adası merkezli ve Richter büyüklük ölçeğine göre 7,5 büyüklüğündeki Niigata depreminin odak derinliği 40 km olarak tespit edilmiştir. Deprem bölgesinde tahmin edilen en büyük yer ivmesi 0,25 g olmuştur.

Niigata depreminden yalnızca beş ay önce tamamlanmış olan Showa köprüsü, Shinano nehri üzerinde, her biri 28 m olan on açıklığa sahipti. Deprem odağına olan uzaklığı 55 km olan Showa köprüsünün tabliyeleri, bir ucu tutulu diğer ucu hareketli olarak mesnetlenmişti. Köprü ayakları alışık olunmadığı şekilde, zemin içinde yer alan çelik kazıkların köprü kirişlerine kadar uzatılması ile oluşturulmuştu. Bu durum köprünün uzun doğrultu boyunca oldukça esnek bir yapı kazanmasına sebep oldu. 609 mm çaplı ve et kalınlığı 9 ile 16 mm arasında değişen 25 m uzunluğundaki çelik boru kazıkların alt kısımları sıkı kum tabakasına (N_{SPT}>30) gömülmüştü. Kazıkların geri kalan kısımları orta sıkılıktaki kum tabakasında (N_{SPT}, 10 civarında) yer alıyordu.

Orta sıkılıktaki kum tabakasının sıvılaşmasıyla birlikte nehir tabanında yaklaşık 5 m'lik bir ötelenme meydana geldi. Bu ötelenmenin kazıklarda oluşturduğu yatay yükle birlikte yerel burkulmadan kaynaklanan kalıcı eğilme kazık alt noktasından 6 m yukarıda, sıkı ve orta sıkı zeminlerin ara yüzeyinde oluştu. Kazık başındaki nihai deplasman 2 m olarak ölçüldü. Bu deplasmanlar, köprü ayakları ve tabliyelerin rölatif hareketini doğurarak bazı tabliyelerin suya düşmesine sebep oldu. Şekil 3.11'de depremden sonraki ilk 1 dakika içinde suya düşen tabliyeler görülmektedir. Depremden hemen sonra servis dışı kalan Showa köprüsündeki göçmenin şematik gösterimi Şekil 3.12'de yer almaktadır.

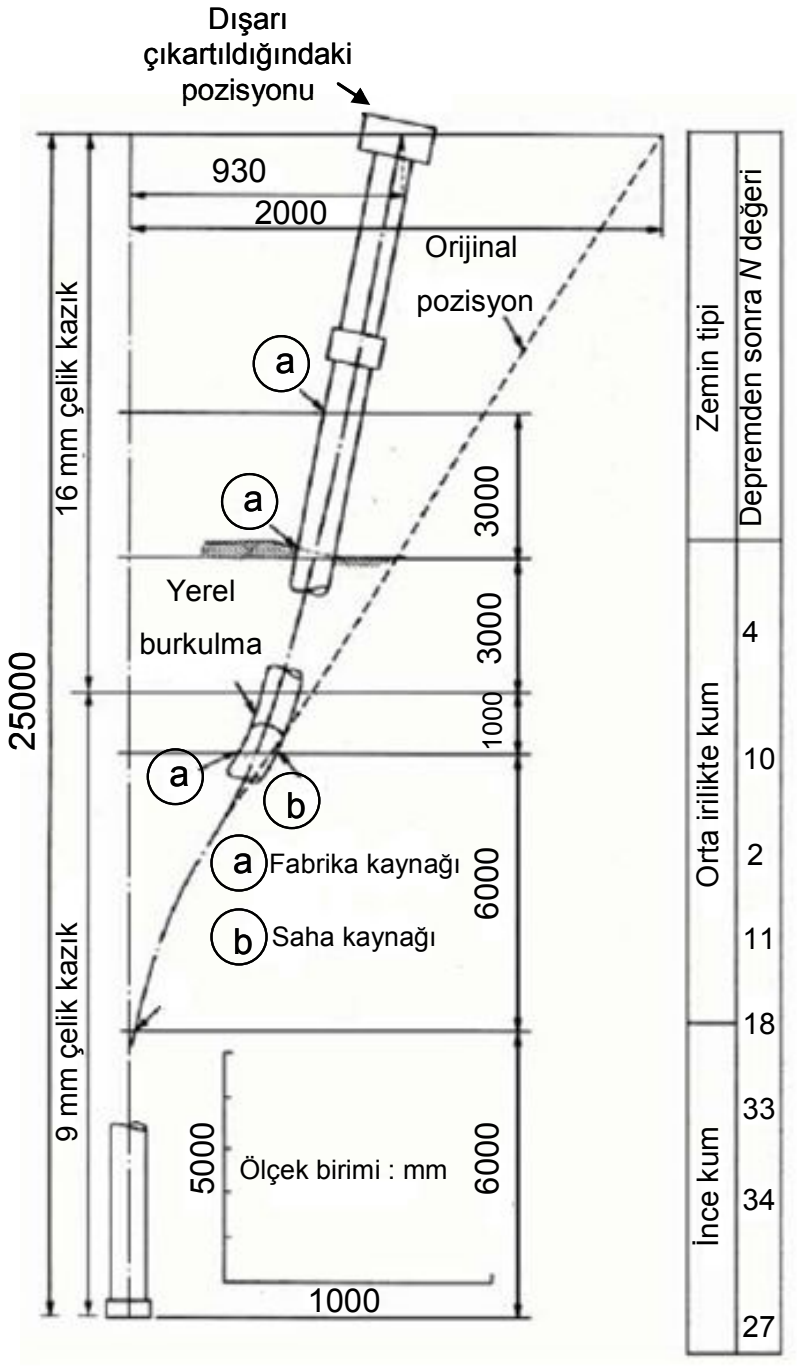


Şekil 3.11. Showa köprüsünün çöken tabliyeleri (Nisee e-kütüphanesi)



Şekil 3.12. Deprem sonrası Showa köprüsünün şematik gösterimi (Takata ve diğ., 1965)

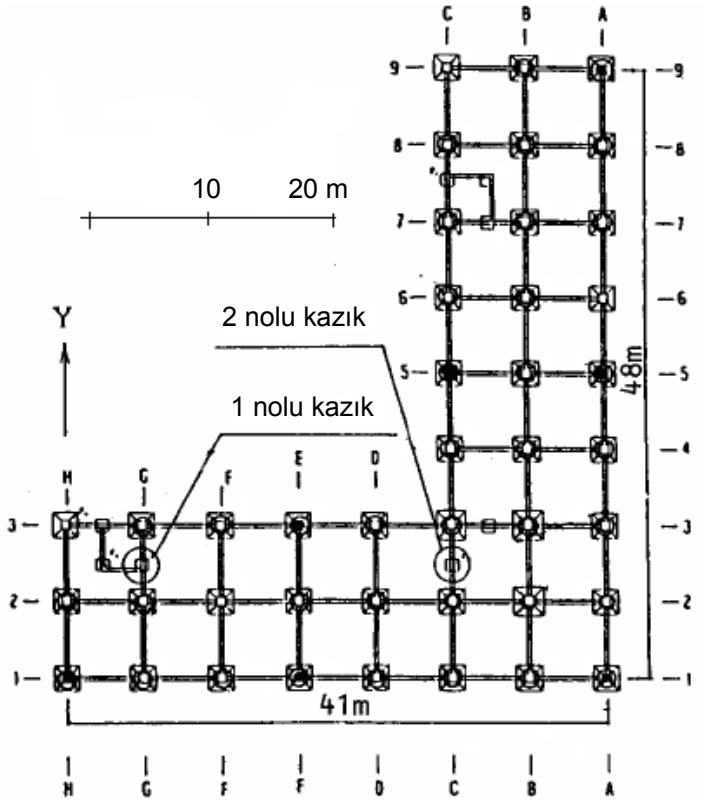
Şekil 3.12'de görülen P4 aksından çıkartılan kazığın deprem sonrasında şekil değiştirmiş hali kazığın dışarıya çıkartılmasıyla gün yüzüne çıkmıştır. Dışarı çıkartılma esnasında kazık başlığı orijinal eksenine yaklaşmış olsa da gerçek kazık başlığı ötelenmesi 2 m olmuştur (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. P4 aksından çıkartılan kazığın deformasyon geometrisi (Fukuoka, 1966)

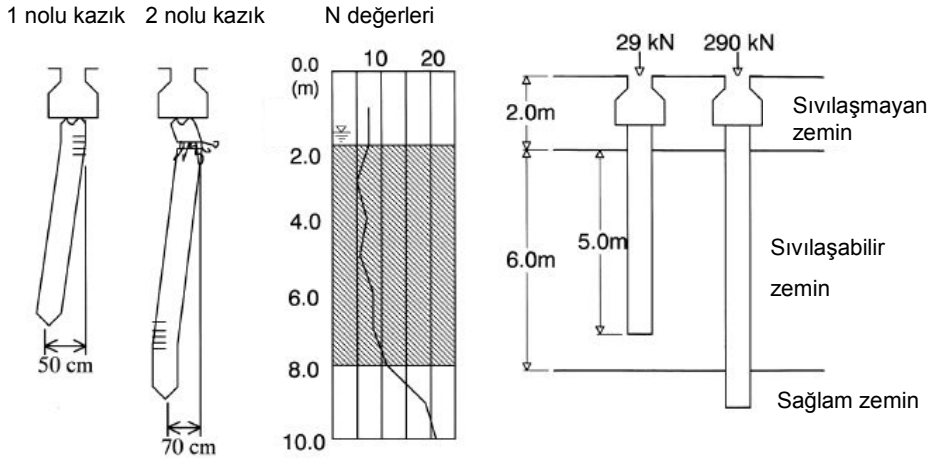
3.3.2. Niigata Family Court House Binası (Niigata Depremi, 1964)

Niigata Family Court House (NFCH) binası beton kazıklar üzerine L biçiminde oturan 4 katlı bir binaydı. Binanın bulunduğu bölgede sıvılaşmaya bağlı olarak yaklaşık 6 m kalınlığında bir zemin tabakası yaklaşık 1,5 m ötelendi. 35 cm çaplı 6 m ve 9 m uzunluğundaki kazıklardan oluşan temel sistemiyle NFCH binasında, kazıkların önemli ölçüde hasar görmesiyle farklı oturmalar başladı ve bunun neticesinde binada 1 derecelik yana yatma oluştu. Fakat bina katlarında yapılan tadilatlarla bina 25 yıl süreyle serviste kaldı. Daha sonrasında binanın yeniden inşası sırasında temel sisteminden 6 m uzunluğunda (1 nolu) ve 9 m uzunluğunda (2 nolu) 2 kazık dışarı çıkartıldı (Şekil 3.14).



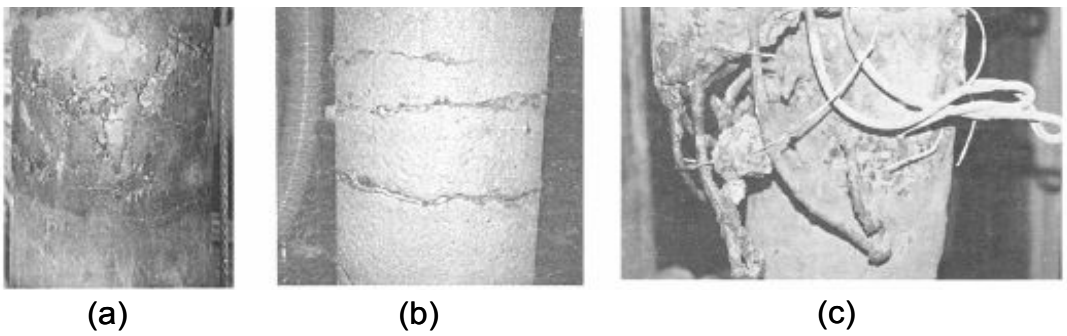
Şekil 3.14. NFCH binasından çıkartılan 2 kazığın yerleşimi (Madabhushi ve diğ., 2009)

2 nolu kazık sağlam zemine 1 m kadar gömülüyken 1 nolu kazığın alt ucu sıvılaşabilir zemin içinde kalıyordu. Her iki kazık da yüzeyin 2 m altında ağır hasar aldı. 2 nolu kazık ayrıca sağlam zemine girdiği noktada da hasar aldı ve 70 cm uç deplasmanı oluştu. Aynı değer 1 nolu kazıkta 50 cm oldu.



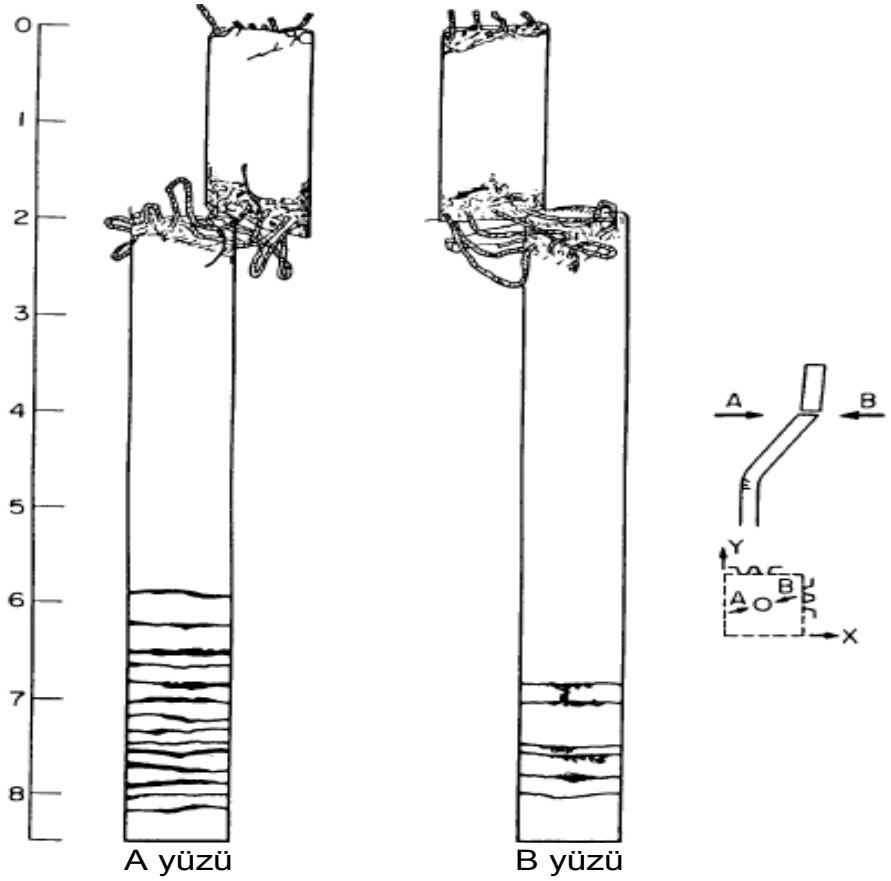
Şekil 3.15. NFCH binası kazıklarında hasar paterni (Bobet ve diğ., 2001)

1 nolu kazıkta oluşan hasar paterni incelendiğinde, yer altı su seviyesinde kazıkta en büyük eğilme momenti değerine ulaşıldığı ve bu noktada kazığın bir yüzünde çekme çatlakları oluşurken diğer yüzünde basınç ezilmeleri olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum kazığın üzerindeki dominant yükün, çevrimsel deprem yükü yerine sıvılaşan zeminin yatay ötelenmesinin sebep olduğu monotonik yük olduğunu ortaya çıkartmaktadır. Benzer şekilde, 2 nolu kazıktaki çift eğrilik eğrili (double curvature) deformasyon, yatay ötelenmenin kazığın alt ve üst kısımlarında yer alan sıvılaşmayan zemin tabakaları tarafından tutulmaya çalışıldığını göstermektedir (Bowen, 2007). Şekil 3.16'da söz konusu hasarların fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 3.16. NFCH binası kazıklarında hasarlar; a) 1 nolu kazığın üst kısmı b) 2 nolu kazığın alt kısmı c) 2 nolu kazığın üst kısmı (Madabhushi ve diğ., 2009)

Şekil 3.17'de 2 nolu kazıkta oluşan hasarın şematik gösterimi yer almaktadır. Kazık başlığının altına yakın noktada gelişen göçme açıkça görülmektedir.



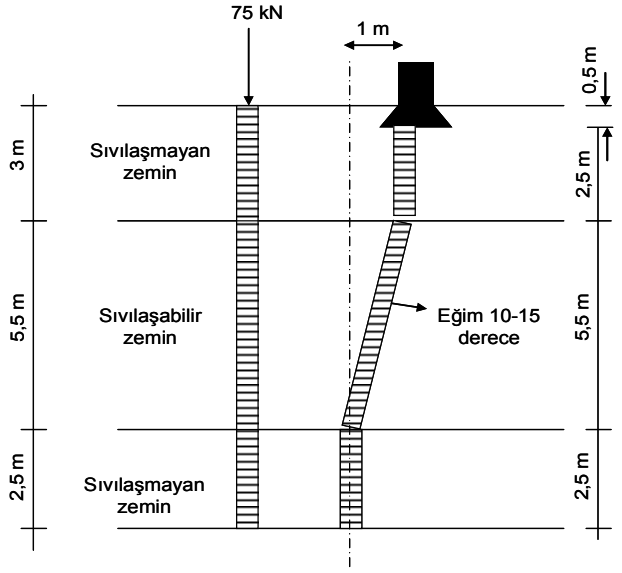
Şekil 3.17. NFCH binasında 2 nolu kazık hasarının şematik gösterimi (Hamada, 1991)

3.3.3. NHK Binası (Niigata Depremi, 1964)

Sıvılaşma nedeniyle kazıkların hasar gördüğü bir başka yapı NHK binası olmuştur. 12 m uzunluğunda ve 35 mm çaplı betonarme kazıklardan oluşan temel sistemine sahip bina, Shinano nehrine yakın bir konuma sahipti. Depremden sonra askıya alınarak H kesitli çelik kazıklarla desteklenen yapı 1984 yılına kadar kullanımda kaldı. Depremden 20 yıl sonra yıkım kararı alınan binanın altında yapılan kazı çalışmalarıyla 74 kazık açığa çıkarılarak, kazık hasarlarını gözlemleme şansı elde edildi (Meymand, 1998; Horne ve Kramer, 1998). Kazık başlıklarının 1 m ötelendiği binada, kazıkların genellikle kazık başlığına yakın ve alt uca yakın iki noktada göçüp kırıldığı görüldü. Ayrıca kazıkların zemin yanal ötelenmesine sebebiyle eğimlendiği tespit edildi. Şekil 3.18'de kazı sonrasında ortaya çıkarılan kazıkların genel görünümü ve hasar durumları yer almaktadır. Şekil 3.19'da ise açığa çıkartılan bir kazıkta oluşan hasarlar ve ötelenme görülmektedir.



Şekil 3.18. NHK binasının altında hasarlı betonarme kazıklar (Hamada, 1991)



Şekil 3.19. NHK binası kazıklarından birinde oluşan kırılmalar ve ötelenme (Hamada, 1992)

NFCH ve NHK binalarının her ikisinin de depremden sonra yıllarca serviste kalmalarının sebebi temel sisteminde gelişen bu ciddi hasarların belirlenememiş olmasıdır. Bu durum her iki binayı da riskli kılmakla birlikte kazık hasarlarının depremin hemen ardından belirlenebilmesinin önemini ortaya çıkarmaktadır.

3.3.4. Landing Köprüsü (Edgecumbe Depremi, 1987)

Edgecumbe depremi, 1987 yılında Pasifik ve Avustralya plakaları arasındaki fayın kırılması ile oluştu. Richter büyüklüğü 6,3 olan depremin oluşturduğu yüzey kırılması, Yeni Zelanda'da bulunan Landing Köprüsü'ne 8 km uzaklıktan geçti. Yüzey kırılmasına aynı uzaklıkta bulunan Matahina barajının bulunduğu bölgede kaydedilen en büyük yer ivmesi 0,33 g oldu.

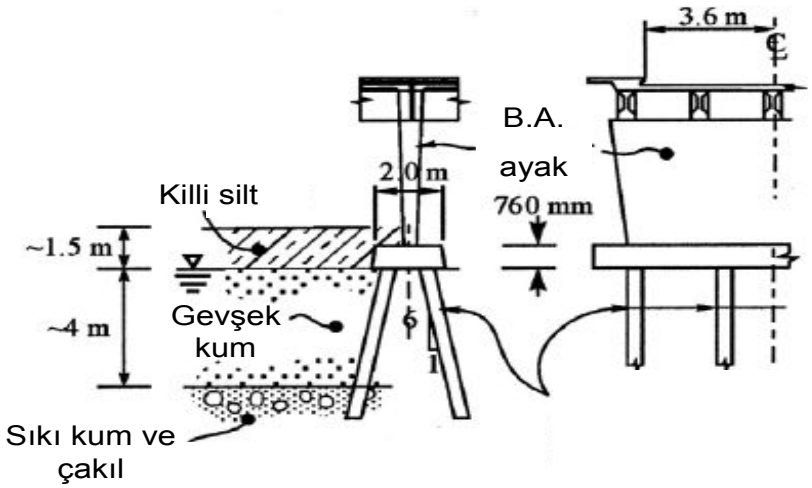
Edgecumbe ve Whakatane bölgelerini bağlayan ve Whakatane nehri üzerinde yer alan Landing Köprüsü, 1962 yılında 18,3 m uzunluğunda 13 açıklıklı olarak inşa edildi. Her açıklık 5 adet önceden döküm I kirişten oluşuyordu ve kirişler köprü ayağının üstünde 16 mm kalınlığındaki kauçuk yastığın üzerine oturuyordu. Köprü ayaklarının altında 8 adet öngerilmeli, 40,6 cm kenarlı kare kesitli kazık bulunuyordu ve kazıklar 1/6 eğimli (1 yatay-6 düşey) yerleştirilmişti. 1984 yılında, nehir içinde kalan köprü ayaklarını, etraflarındaki zemin kaybından (çökelti yüksekliği değişimi) koruyabilmek için kazık başlıklarına, başlığı genişletecek şekilde 2'şer adet düşey ve 1,1 m çaplı kazık eklendi. Şekil 3.20'de köprünün havadan çekilmiş bir fotoğrafı, Şekil 3.21'de ise köprü taşıyıcı sisteminin şematik gösterimi yer almaktadır.



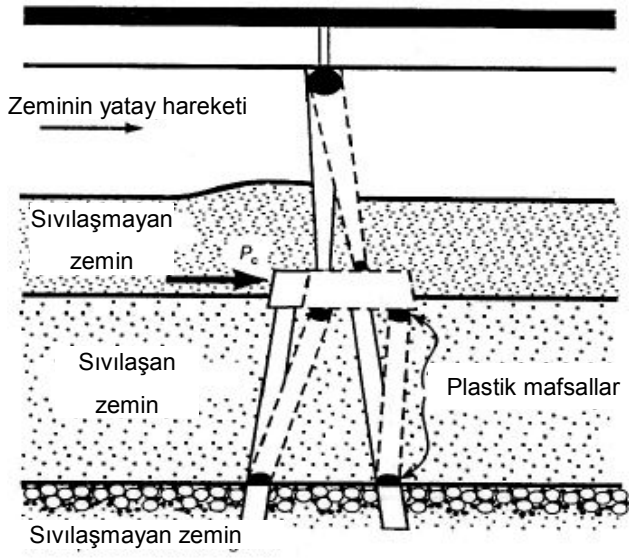
Şekil 3.20. Landing Köprüsü'nün havadan görünümü (Madabhushi ve diğ., 2009)

Şekil 3.22'de görüldüğü üzere sıvılaşan zeminle birlikte ötelenen kazık başlığının hemen altında ve kazığın sıvılaşmayan tabakaya girdiği noktada, kazık üzerinde plastik mafsallar oluşmuştur. Berrill ve diğerleri (2001), kesit özelliklerini kullanarak yaptıkları analizlerde, köprü ayağı alt ve üst plastik mafsal bölgeleri ile kazık alt ve üst plastik mafsal bölgelerindeki moment kapasitelerini sırasıyla 757 kN, 608 kN,

233 kN ve 206 kN olarak hesaplamışlardır. Bu hesaba göre P_c yükü (kazık başlığındaki göçme yükü) 1207 kN olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.21. Landing Köprüsü'nün taşıyıcı sistemi (Yasuda ve Berrill, 2000)

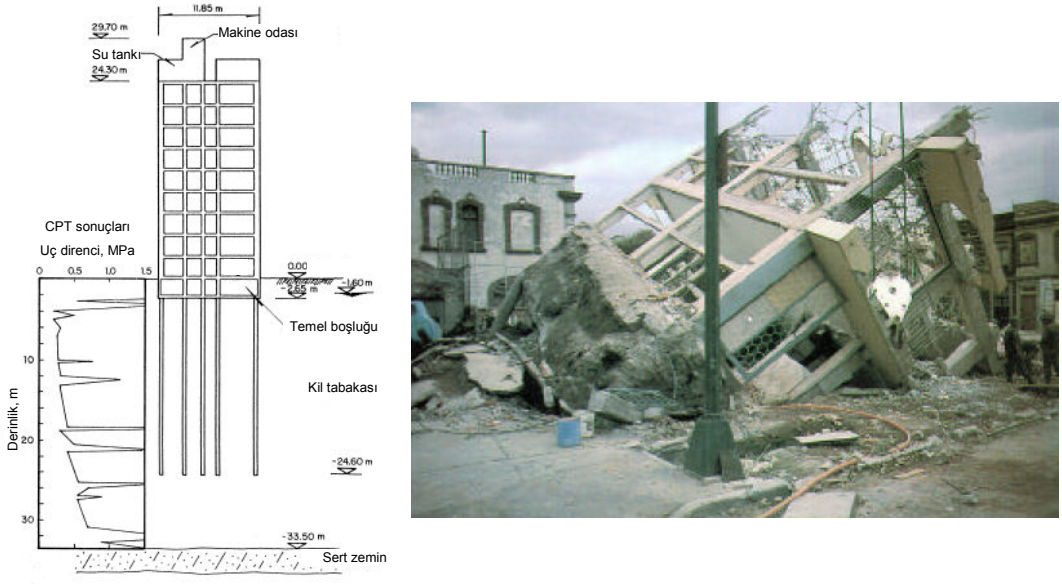


Şekil 3.22. Landing Köprüsü kazıklarında oluşan plastik mafsallar (Berrill ve diğ., 2001)

Kazık başlığına, sıvılaşmayan zeminden gelen pasif kuvvetin 850 ile 1000 kN arasında ve sıvılaşan zeminden gelen sürükleme yükünün 50 kN olduğu tahmin edilirken, kazık başlığının göçmemiş olması bu hesaplamalarla açıklanmıştır.

3.3.5. On katlı betonarme bina (Mexico City Depremi, 1985)

Richter büyüklük ölçeğine göre 8,3 büyüklüğündeki deprem Mexico City'e 400 km uzaklıkta gerçekleşmiştir. Şehrin Lake Zone bölgesinde bulunan derin yumuşak kil (su muhtevası bazı bölgelerde %400) tabakası sebebiyle sarsıntının bu bölgedeki şiddeti arttı ve deprem dalgalarının periyodu 2 sn değerine ulaşmıştır. Bu periyotlu yer hareketi, bekleneceği üzere orta yükseklikteki binalarda rezonansa sebep olarak büyük hasarlara yol açtı. Özellikle ucu sağlam zemine soketlenmemiş sürtünme kazıklarının taşıdığı temellerin üstündeki yapılarda büyük oturmalar ve devrilmeler gözlemlendi. Depremin çevrimsel hareketi nedeniyle killerde kayma mukavemetinin ve dolayısıyla çevre sürtünmesinin büyük ölçüde düşmesi, bu tür hasarların oluşmasında etkili olmuştur. Ayrıca bölgedeki yapıların önceden var olan oturmalar sebebiyle çeküllerinin bozulmuş olması, deprem yüklerine ilaveten P-δ momentinin eklenmesine ve böylelikle oluşan hasarın boyutunun artması neden oldu. Şekil 3.23'te Mexico City depreminde yana yatan 10 katlı bir bina görülmektedir.



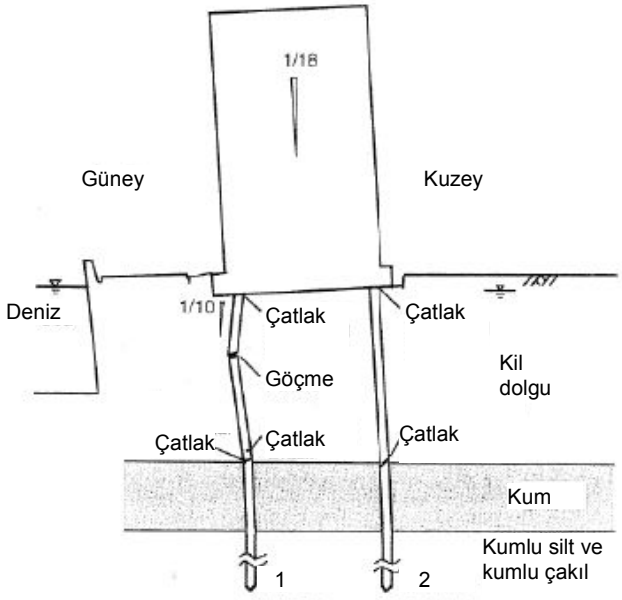
Şekil 3.23. Mexico City depreminde devrilen bina (Mendoza ve Auvinet, 1988)

Sağlam zemin binanın 33,5 m altındadır. Kazık uzunluğu 21,95 m olup, kazık uçları zayıf zemin tabakasındadır. Eldeki CPT (cone penetration test) verilerine göre temelin altındaki ve 33,5 m derinlikteki uç direnci değerleri sırasıyla 0,2 MPa ve 1 MPa'dır. Depremle birlikte binanın bir köşesi 6 m zemine gömülürken diğer köşesi zeminden 3 m çıkarak kazıkları da sıyrılmasına sebep olmuştur. Bu durum kazıkla

zemin arasındaki sürtünmenin çok büyük ölçüde ortadan kalktığının işaretidir. Uç kazıkları, sürtünme kazıklarına göre Mexico City depreminde çok daha iyi performans sergilemişlerdir.

3.3.6. Higashi-Nada Binası (Kobe Depremi, 1995)

Richter büyüklüğü 7,2 olan Kobe depremi 1995 yılında Japonya'da yaşandı ve 5500 kişinin ölümüne sebep oldu. Deprem Japonya'nın özellikle altyapısına büyük zarar vererek 200 milyar dolarlık bir kayıp yarattı. Kazık hasarlarının, zemin şartları kadar yer hareketinin özelliklerinden de ne büyük ölçüde etkilendiğinin ortaya konulabilmesi için Kobe depreminden sonra 5 derece eğimle ayakta kalabilen Higashi-Nada binasını (3 katlı, betonarme) incelemek yeterli olabilir. Şekil 3.24'te bina altındaki kazıkların göçme şekli görülmektedir.



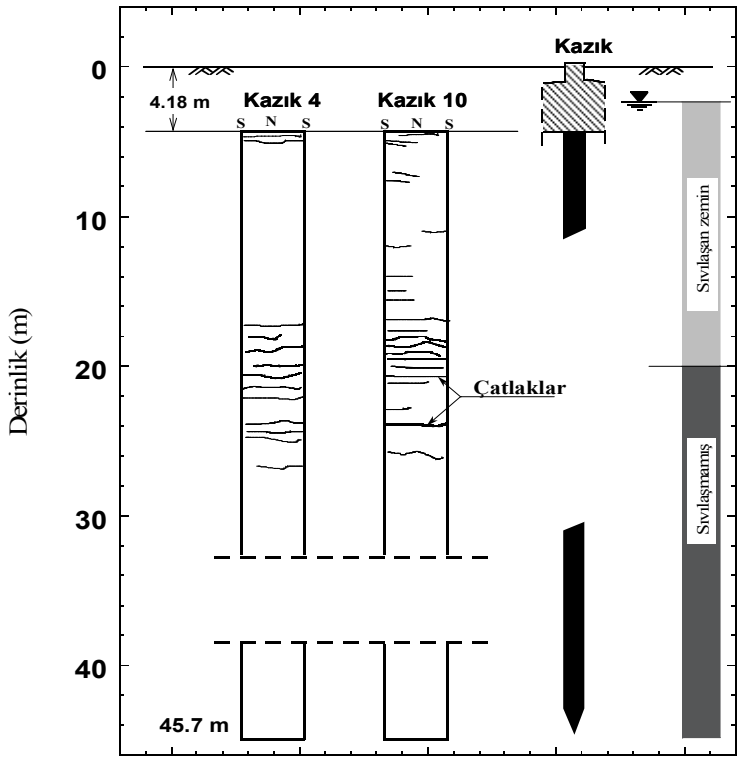
Şekil 3.24. Aynı bina altında kazıklarda iki farklı göçme paterni (Tokimatsu ve diğ., 1998)

Denize uzaklığı 6 m olan binanın rıhtım duvarı tarafında 2 m'lik kalıcı zemin deformasyonu gerçekleşti ve bu değer içlere gidildikçe hızla azaldı. Binanın temelinde 38 adet, 40 cm çaplı ve 20 m uzunluğunda öngerilmeli kazık bulunuyordu. Binanın iki farklı kazığı incelendiğinde her ikisinin de kazık başlığındaki ötelenme 0,8 m olduğu halde farklı deformasyonlar gösterdiği ortaya çıkmıştır. Deniz tarafındaki kazıkta (1 nolu kazık) 5 m derinlikte eğim yön değiştirmiş ve kazığın 3

farklı noktasında büyük çatlaklar oluşmuştur. Kara tarafındaki kazıkta da (2 nolu kazık) benzer çatlaklar oluşmuş olsa da kazık boyunca eğim yönü değişmemiştir. Bu durum, binanın deniz ve kara taraflarındaki yer hareketinin farklılaşmasından meydan gelmiştir. Deniz tarafında zemin kazığı iterken, kara tarafında kazık zemini itmiştir.

3.3.7. Hanshin Otoyolu (Kobe Depremi, 1995)

Hanshin otoyolu üzerinde bulunan Uozakihama köprüsünün 211 nolu ayağının altında 22 adet betonarme kazık bulunuyordu. 4,18 m uzunluğundaki kısmı zemine gömülü olan köprü ayağı 22,5 m× 14,5 m boyutlarında olup, kıyı koruma duvarına 30 m uzaklıktaydı. Kazıklar 1,5 m çapında ve yerinde dökümdüler. 41,5 m uzunluğundaki kazıkların yaklaşık 16 m'lik kısmı sıvılaşabilir zemindeydi. 211 nolu köprü ayağının etrafında oluşan zemin ötelenmesi 1 m kadardı. 7 cm çapında açılan iki sondaj deliğinden 4 nolu ve 10 nolu kazıklardaki hasar paternini incelemek için indirilen kameralardan elde edilen sonuçlar Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.25. Hanshin otoyolunun 211 nolu köprü ayağı altındaki kazıklardan ikisinde gözlemlenen hasar paterni (Ishihara ve Cubrinovski, 1998)

Kazık üzerindeki çatlakların, kazık başlığında ve zemin profilinin değişim gösterdiği arakesitte yoğunlaştığı görülmüştür. Bu kazık hasarlarına rağmen kazığın yatay yük taşıma kapasitesinde çok büyük bir azalım olmamış ve 211 nolu köprü ayağı yapısal bütünlüğünü korumuştur.

3.4. Gözlemlenmiş Kazık Performanslarının ve Göçme Mekanizmalarının Özeti

Bugüne kadar yaşanan depremlerden sonra kazıklarda oluşan göçme mekanizmaları aşağıdaki gibi sıralanabilir. Burada göçme ifadesi, kazığın yapısal yük taşıma kapasitesini kaybetmesi anlamında kullanılmıştır.

Kohezyonsuz zeminlerde depremle birlikte oluşan sıvılaşma nedeniyle çeper sürtünmesi kısmen veya tamamen ortadan kalkabilir. Bu durumun yapısal yüklerle birleşmesiyle kazık başlığı civarında, çoğu kez kazık başlığı ile kazığın birleşim noktasında, göçmeye yol açabilen büyük deplasmanlar ve eğilme momentleri oluşur. Kobe ve Niigata depremlerinde bu tür hasarların örnekleri mevcuttur.

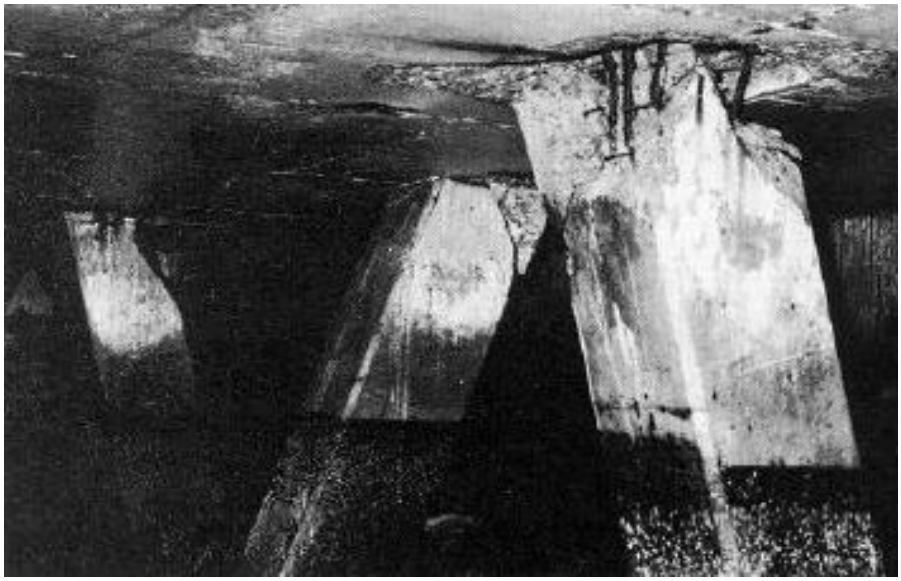
Sıvılaşma nedeniyle kazığı çevreleyen zeminin yumuşaması ile kazığın yük taşıma kapasitesi azalır. Bu durum depremin çevrimsel hareket ile birleştiğinde kazıklar çoğunlukla büyük oturmalar yapar, zımbalama davranışı oluşur veya zeminden sıyrılarak dışarı çıkar. Mexico City depreminde benzer hasarlar sıkça görülmüştür. Depremle birlikte sıvılaşan zemin tabakası ve komşusu sıvılaşmayan zemin tabakasından kazığa yüksek mertebede yükler aktarılır ve deplasmanlar aktarılır. Bu durum kazıklarda önemli hasarlara yol açmaktadır. Niigata depreminde Showa Köprüsü'nün yıkılmasına bu tür bir göçme mekanizması sebep olmuştur.

Kazıklar, zemin profilinde ardışık konumlu ve taşıma gücü veya sıvılaşma potansiyeli açısından çok farklı zemin tabakalarının bulunduğu durumlarda, tabakalanma seviyesinde hasarlara yol açan eğilme momentleri alırlar. Landing Köprüsü'nün yıkılması bu hasar mekanizması ile açıklanabilir. Kazık başlığı ile kazık bağlantısının yeterli detaylandırılamaması sebebiyle kazıklarda kesme göçmesi meydana gelmesi çok muhtemeldir. Örnek olarak, Şekil 3.26'da kazık başlığından tamamen kopan boşluklu kesitli betonarme bir kazık görülmektedir.



Şekil 3.26. Kobe (1995) depreminde Port Island adasında kazıkta kesme göçmesi (Sitar, 1995)

Eğimli kazıklar büyük yükleri taşımaları için tasarlandıkları halde genellikle kazık başlığı ve başlığın kazıkla bağlantısının zayıf olması sebebiyle hasarlar alabilirler. Loma Prieta (1989) depreminde Oakland Limanı'nda bu türden hasar görülmüştür. Şekil 3.27'de eğimli betonarme bir kazığın göçmesi görülmektedir.



Şekil 3.27. Loma Prieta (1989) depreminde Oakland Liman'ında bir eğimli kazık göçmesi (Eugene ve Meehan, 1991)

3.5. Kazık Hasarlarının Belirlenmesi için Kullanılan Mevcut Yöntemler

Depremlerden sonra kazıkların üzerinde oluşan hasarlar, üst yapının göçmemiş olması durumunda yapının gelecekte göstereceği performansı doğrudan ve büyük ölçüde etkileyecektir. Bu sebeple kazık hasarlarının belirlenebilmesi için çalışmalar yapılmış ve farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin tamamı kazık betonuna hasar vermeden sonuca ulaşılabilen tahribatsız hasar belirlenmesi (non-destructive testing, NDT) stratejine dayanmaktadır. Tahribatsız hasar testleri yapı elemanlarında;

- Boyutların belirlenmesi
- Çatlağın varlığının ve yerinin belirlenmesi
- Betonda bir boşluğun (honeycomb) oluşup oluşmadığının kontrolü
- Donatı yeri ve boyutunun belirlenmesi
- Donatı korozyonunun kontrolü
- Donma-çözünme, yangın ve kimyasal etkilerden oluşan hasarların boyutunun belirlenmesi

gibi konularda kullanılmaktadır. Bilinen en eski NDT aracı çıplak gözle yapılan gözlemdir. Özellikle yapı elemanındaki çatlak paternini elde etmek bu yöntemle oldukça basittir (Ellsworth ve Ginnado, 1991). Fakat bu tür bir yöntemin verimli olabilmesi, gözlemi yapan kişinin bilgi birikimine ve tecrübesine bağlı olduğu için güvenilirliği oldukça tartışmalıdır. Bunun ötesinde kazık hasarların bu yöntemle belirlenebilmesi fiziksel olarak da mümkün değildir.

Günümüzde kazık hasarlarının belirlenmesi için kullanılan yöntemler başlıca üç grupta toplanabilir. Bunlar gerilme dalgası yöntemleri (stress-wave methods), nükleer yöntem ve radar yöntemi olarak sıralanabilir.

3.5.1. Gerilme Dalgasına Dayalı Yöntemler

Betonarme yapı elemanlarının hasarlarını tahribatsız şekilde belirleyebilmek için gerilme dalgası yayılımı üzerine kurulu farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bir yapı

elemanının boyunca kesit bozulmaları ultrasonik geçirim yöntemleriyle, kalınlık ölçümleri yansıma yöntemleri ile belirlenebilir.

Gerilme dalgaları beton üzerine ani uygulanan ani basınç deformasyonu ile oluşur. Bu dalgaların beton boyunca ilerlemesi, sesin havada ilerlemesine benzerdir. Elastik ortamda dalga ilerleme hızı, elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluk ve geometriye bağlıdır. Test edilen yapı elemanı boyunca dalga yayılım hızının izlenmesiyle kesit bozulmaları hakkında bilgi edinilebilir.

Basınç deformasyonu betona uygulandığında, deformasyon yönüne paralel P dalgaları normal gerilme iletimi ile ilişkili olarak, deformasyon yönüne dik S dalgaları kayma gerilmesi iletimi ile ilişkili olarak yayılırlar. Bunlara ek olarak R dalgaları da yüzey boyunca ilerler. P dalgasının hızı (C_p) betonun elastisite modülü (E_c), poisson oranı (υ) ve yoğunluğa (γ) bağlı olarak Denklem (3.11) ile hesaplanır.

$$C_p = \sqrt{\frac{E_c\,(1-\upsilon)}{\gamma\,(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}} \tag{3.11}$$

S dalgasının hızı (C_s) ise betonun kayma modülü (G) ve yoğunluğuna bağlı olarak Denklem (3.12) ile hesaplanır ve bu değer C_p'den düşük olur.

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \tag{3.12}$$

C_s ve C_p değerleri arasında Denklem (3.13) ile tanımlanan oran, Poisson oranı 0,2 olan bir beton için 0,61 olmalıdır.

$$\frac{C_s}{C_p} = \sqrt{\frac{1-2\upsilon}{2\,(1-\upsilon)}} \tag{3.13}$$

R dalgasının hızı (C_r) ile C_s arasında Denklem (3.14) tanımlanan oran, Poisson oranı 0,15-0,25 arasında olan bir beton için 0,90 ile 0,92 arasında olmalıdır.

$$\frac{C_r}{C_s} = \frac{0{,}87 + 1{,}12\upsilon}{1+\upsilon} \tag{3.14}$$

Denklem (3.11) ile verilen C_p hızı, sonsuz ortamlarda geçerlidir. Kazıklar gibi

sınırlandırılmış (bounded) ortamlarda P dalgasının hızı (C_b), Poisson oranından bağımsız olarak Denklem (3.15) ile hesaplanır (Chakraborty ve Brown, 1997).

$$C_b = \sqrt{\frac{E_c}{\gamma}} \tag{3.15}$$

Bir malzeme boyunca ilerleyen gerilme dalgası, benzer özellikler taşımayan bir diğer malzeme ortamına geçerken bir miktar kayba uğrar. Bu kaybın oranı (R_a), malzeme değişiminin oluştuğu ara kesitin, dalga ilerleme doğrultusu ile yaptığı açıya bağlıdır. Bu açının 90 derecece olması durumunda kayıp oranı azalıma uğramamış kabul edilir ve alabileceği en büyük değerde olur. Kayıp oranı, malzemelerin akustik empedansları (A_Z) arasında kurulan Denklem (3.16) ile hesaplanır.

$$R = \frac{A_{Z2} - A_{Z1}}{A_{Z2} + A_{Z1}} \tag{3.16}$$

Malzemelerin akustik empedansları, dalga yayılım hızı ile yoğunluğun çarpımına eşittir. Tablo 3.1'de bazı malzemelerin A_Z değerleri görülmektedir.

Tablo 3.1. Farklı malzemelerin akustik empedans değerleri (Sansalone ve Carino, 1991)

Malzeme	Akustik empedans, kg/(m^{2}s)
Hava	0,4
Su	$1{,}5.10^6$
Zemin	$0{,}3.10^6$- $1{,}5.10^6$
Beton	7.10^6-10.10^6
Kireçtaşı	7.10^6- 19.10^6
Granit	15.10^6- 17.10^6
Çelik	47.10^6

Kazıkların gerilme dalgası yayılımının esas alındığı yöntemlerle test edilmesi, 1960'lı yıllarda Fransa ve Hollanda'da ticari olarak başlamıştır ve sonraki yıllarda tüm dünyada kullanılır hale gelmiştir. Gerilme dalgası yayılımını kullanan yöntemler sonik yansıma, impuls yanıtı, empedans kaydı, çift delikli sonik kayıt ve paralel sismik yöntemleridir.

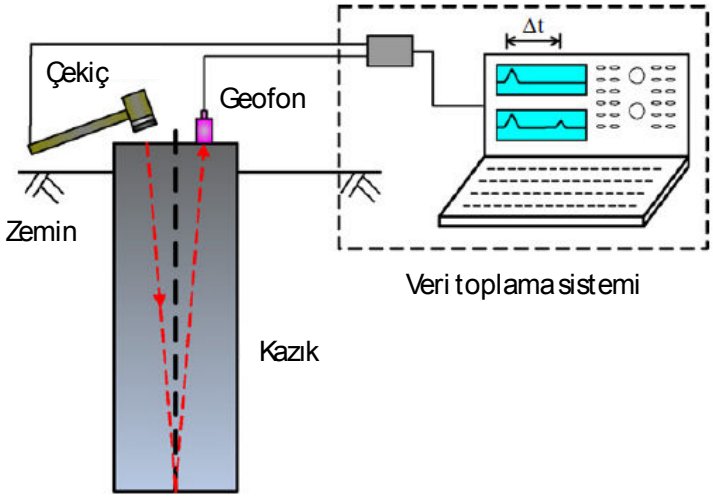
3.5.1.1. Sonik yansıma (Sonic echo) yöntemi

Bu yöntem kazıkların boy ve bütünlük testi için ticari olarak kullanılan en eski NDT yöntemidir (Paquet, 1968). Yöntem sismik yansıma (seismic echo) ve PIT (Pile Integrity Testing, kazık bütünlük testi) isimleriyle de anılmaktadır.

Sonik yansıma yöntemi, kazık üst noktasına küçük bir çekiç ile vurularak elde edilen gerilme dalgasının, kazık alt ucuna kadar gidip-dönme süresinin ölçüldüğü bir yöntemdir. Söz konusu süre, dönen sinyalin çoğu zaman bir ivme ölçer olan alıcı tarafından algılanması ile veri toplama cihazı (data-logger) tarafından kaydedilen darbenin kazıkta oluşturduğu düşey hareketin başlangıcı arasında geçen süredir.

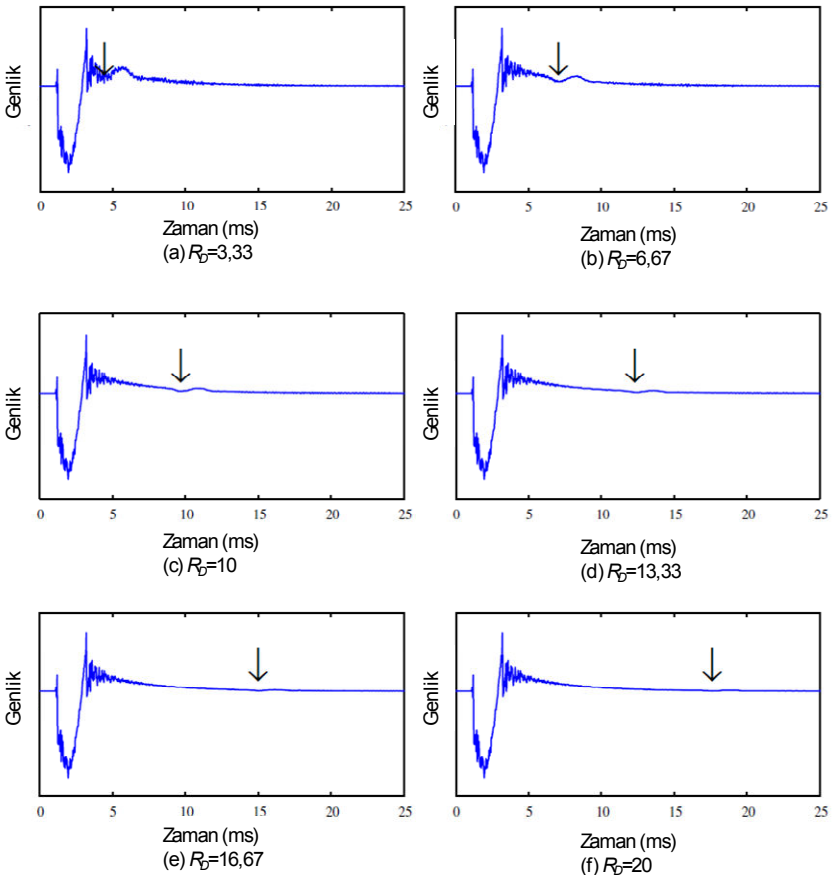
Eğer kazık uzunluğu ve gerilme dalgasının gidip-dönme süresi bilinirse, dalga hızı hesaplanabilir. Tersine eğer dalga hızı biliniyorsa kazığın uzunluğu belirlenebilir. Dalga hızının betonun elastisite modülüne ve yoğunluğuna bağlı olduğu hatırlanacak olursa, eldeki verilerle beton kalitesi hakkında bilgi sahibi olunabilir. C_b hızının, 3800 ile 4000 m/s olması durumunda C30-C35 sınıf aralığında olan bir betonun kalitesi doğrulanmış kabul edilir (Stain, 1982). Fakat bu bilginin kesin bir yargı olmaması da tavsiye edilir (ACI 228.2R, 2004).

Şekil 3.28'de bir sonik yansıma testinin bileşenleri görülmektedir. Kazığa verilen küçük darbe enerjisi, beton boyunca ilerlerken kayıplara uğrar ve zayıflamış olur. Bu yüzden kazık boyunca bir büyütme katsayısı uygulanır. Söz konusu zayıflama bazı hallerde gerilme dalgasının kazığın sonuna ulaşabilmesini engelleyebilir. Böyle bir durumun oluşmaması ve yöntemin kullanılabilirliği için farklı zemin türlerine göre limit bir boy/çap oranı öngörülmektedir. Örneğin bu oran yumuşak zeminlerde 50/1, sıkı kil zeminlerde 30/1 olarak belirlenmiştir. Bu oranların üstündeki değerlerde, yöntem kazığın sadece üst kısımlarını taramak için kullanılabilir (USF, 2005).



Şekil 3.28. Sonik yansıma yöntemi (Huang ve diğ., 2010)

Huang ve diğerleri (2010), hasarın derinliğinin kazık çapına oranı olarak tanımlanan R_D değerinin sonik yansıma testi sonucunu nasıl etkilediğini irdelemiştir (Şekil 3.29).

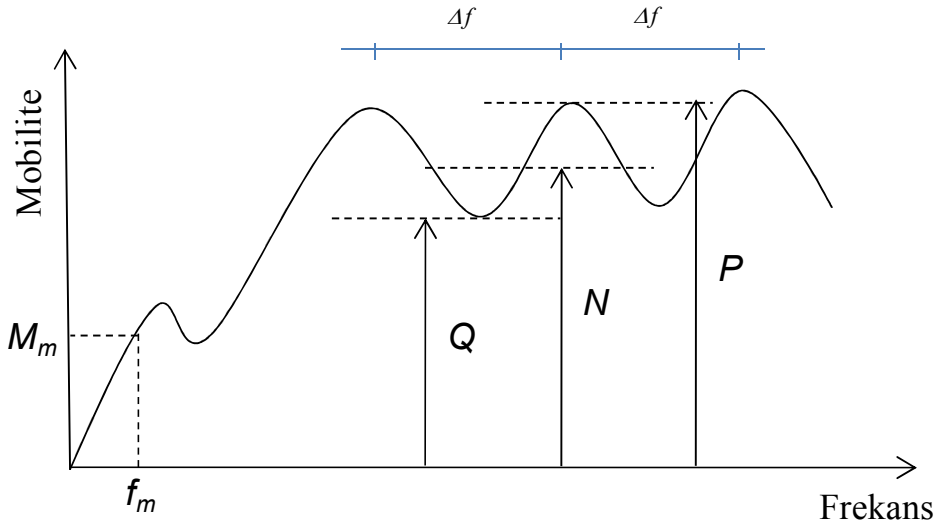


Şekil 3.29. Hasar derinliğinin sonik yansıma genliğine etkisi (Huang ve diğ., 2010)

Şekil 3.29'da aynı kazık üzerinde aynı kesit daralması (%15) durumunda, hasarın derinliği ile sonik yansıma genliğini nasıl değiştiği görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, R_D değerinin artmasıyla yansıma genliğini önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

3.5.1.2. İmpuls yanıtı (impulse response) yöntemi

İmpuls yanıtı yöntemi 1970'li yılların ortalarında ilk olarak Fransa'da geliştirilmiştir. Yöntemde, kazığa belirli bir frekansta titreşim uygulanarak kazığın bu titreşime yanıtı zaman boyutunda kaydedilir. Titreşim kazığın üst noktasına yük hücresi barındıran bir çekiç ile vurulmasıyla elde edilir. Yaklaşık 1 kg ağırlığındaki çekicin darbesiyle temas yüzeyinde oluşan maksimum gerilme sert plastik uçlu çekiçlerde 5 MPa, alüminyum uçlu çekiçlerde 50 MPa civarında olur. Titreşim frekansının en fazla 2000 Hz olması uygun görülmüştür. Kaydedilen büyüklük kazığın mobilitesidir. Mobilite, geofon (hız ölçer) parçacık hızının uygulanan kuvvete oranı olarak tanımlanmıştır. Zaman boyutunda elde edilen kayıt daha sonra hızlı Fourier dönüşümüyle (Fast Fourier Transform, FFT) frekans boyutuna çevrilir. 0-800 Hz aralığında elde edilen mobilite-frekans grafiği kazığın kalitesi hakkında bilgi verir. Şekil 3.30'da tipik bir impuls yanıtı test sonucu görülmektedir. İmpuls yanıtı yöntemi ile edinilebilen ve kazığın kalitesini işaret eden bilgiler kazık dinamik rijitliği (k_d) ve mobilite (N_p) değerleridir.



Şekil 3.30. İmpuls yanıtı test sonucu (ACI 228.2R, 2004)

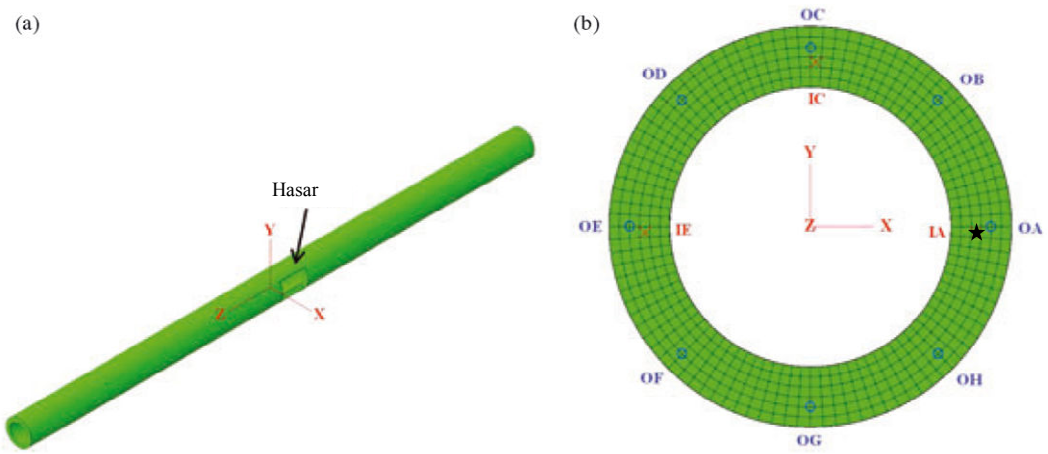
Mobilite-frekans grafiğinin başlangıç kısmında doğrusallığını kaybettiği frekans değer olarak tanımlanan f_m ve bu frekans değerine karşılık gelen mobilite değeri N_{pm} kullanılarak kazığın dinamik rijitliği (k_d), Denklem (3.17) ile hesaplanır.

$$k_d = \frac{2\pi f_m}{N_{pm}} \tag{3.17}$$

Dinamik rijitlik değeri, kazık betonunun kalitesine, kesit boyutlarına ve mesnetlenme şartlarına göre değişir (Davis ve diğ., 2005). İmpuls yanıtı test sonucundan kazığın kütlesini de (M_p), Denklem (3.18) ile hesaplamak mümkündür.

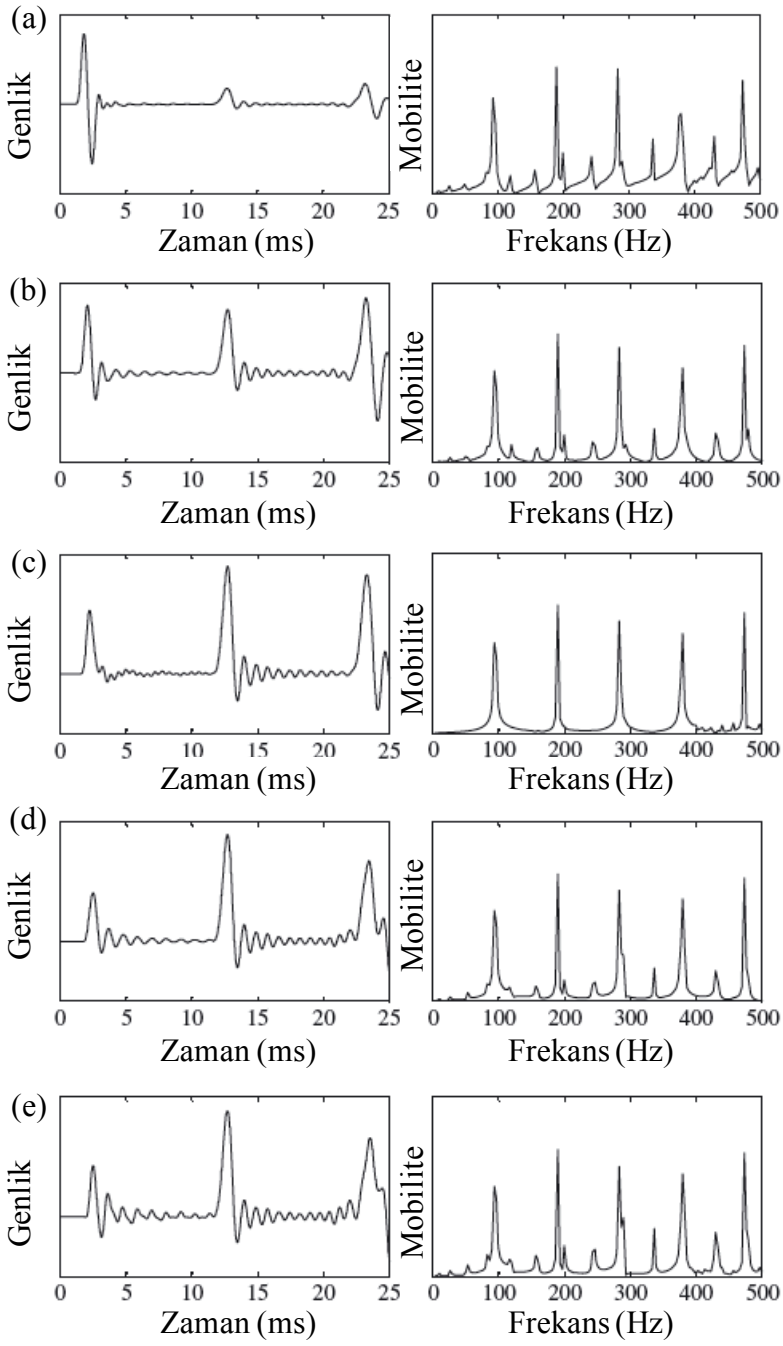
$$M_p = \frac{1}{2\Delta f\, N_p} \tag{3.18}$$

100-800 MHz aralığında ölçülen ortalama mobilite değeri, bir levha eleman için doğrudan kalınlık ve yoğunluğa bağlıdır. Kazığın herhangi bir derinliğinde beton içinde boşluk oluşması durumunda sönümleme oranı azalacağından, ortalama mobilite değeri artacaktır. Ni ve Huang (2012), boşluklu beton bir kazıkta sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaptıkları sonik yansıma ve impuls kaydı simulasyonlarıyla, darbe noktası ile alıcı konumlarının ölçümlere etkisini araştırmışlardır. Şekil 3.31'de görülebileceği üzere darbe IA noktasına uygulanmış ve sonrasında alıcı farklı noktalara yerleştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır.



Şekil 3.31. Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarlanan kazığın (a) hasar noktası (b) kesiti ve üzerindeki alıcı konumları (Ni ve Huang, 2012)

Uzunluğu 20 m olan kazığın orta noktasında %25 kesit daralması şeklinde tasarlanan hasarın, sonik yansıma genliği ve mobilite değerleri alıcının konumunu değiştirilmesiyle hasar aynı olduğu halde farklılık göstermişlerdir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Sonik yansıma ve impuls yanıtı yöntemi ile kazık bütünlüğü test sonuçlarının alıcı konumu ile değişimi (a) OA (b) OB (c) OC (d) OD (e) OE (Ni ve Huang, 2012)

Sonik yansıma ile kazık uzunluğu ölçüm sonuçlarına göre darbenin IA noktasına uygulandığı durumda, en doğru sonuçlar alıcı konumunun OB ve OC noktaları olması durumlarında sağlanmıştır. Alıcının OA noktasında olması durumunda %+2,9 ve OE noktasında olması durumunda %-3,3 hata oluşmuştur.

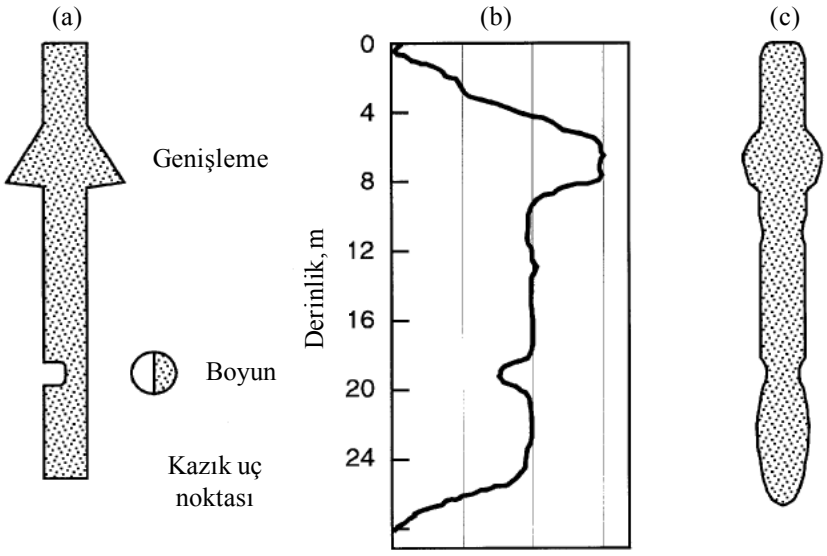
İmpuls kaydı, sonik yansımaya oranla kazık boyunun tahmininde çok daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca alıcı noktasının değişmesi, kazık uzunluğu ölçümü açısından impuls kaydı sonuçlarını etkilememiştir. Fakat kazık bütünlüğünü için en iyi sonuçlar, darbe ve alıcı noktaları arasındaki açının 90 dereceyi geçmediği hallerde sağlanmıştır.

3.5.1.3. Empedans kaydı (impedance logging) yöntemi

Empedans kaydı yöntemi, sonik yansıma ve impuls yanıtı yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Bu yöntemde sonik yansımadan elde edilen zamana bağlı yansıma genlik değeriyle, impuls yanıtından elde edilen mobilite değeri birlikte kullanılarak kazık boyunca bir kesit profili elde edilir.

Kazık üst noktasına uygulanan darbe kalıcı olmasa da yarattığı gerilme dalgaları kazık boyunca ilerler. Bu ilerleme sırasında kazığın akustik empedansı hakkında bilgi toplayan gerilme dalgası daha sonra yine kazık üst noktasındaki alıcıya ulaşır. Sonik yansıma yöntemi ile sayısallaştırılamayan bu bilgi, modern kayıt cihazlarıyla elde edilen kuvvet-zaman ve hız-zaman verileriyle birleştirilerek önce sayısal bir empedans profili elde edilir. Daha sonra bu empedans profili kazık boyunca kesit profilini ortaya çıkartan görsel bir veriye dönüştürülür. Şekil 3.33'te bilinçli olarak hasarlı üretilmiş bir kazığın empedans kaydı yöntemiyle derinlik boyunca elde edilen kesit profili görülmektedir.

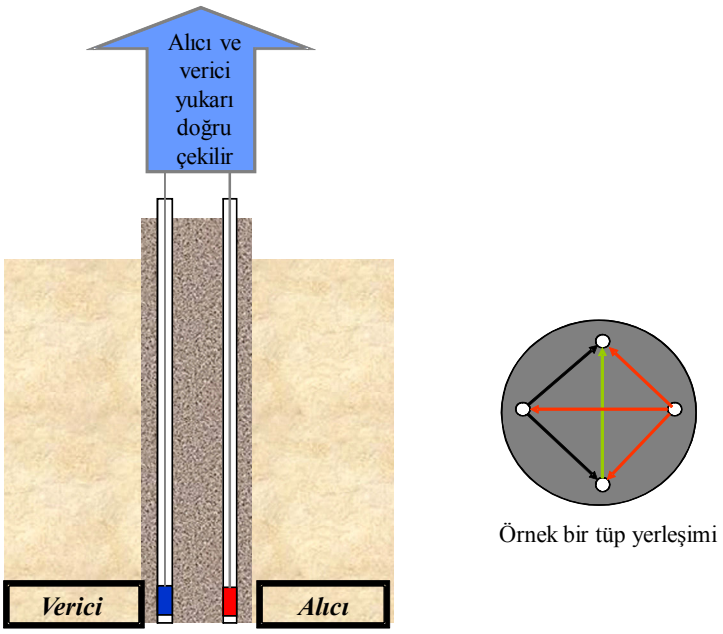
Kazığın tamamen kopmuş olması durumunda yansıma büyüklüğü %100 olarak gerçekleşirken, hasarsız bir kazıkta herhangi bir yansıma gözlemlenmeyecektir. Empedans kaydı yöntemi için zaman ve frekans boyutunda yapılan ölçümlerin daha sonra analiz edilmek üzere dijital olarak kaydedilmesi gerekir. Ayrıca çekiçte kullanılan yük ölçer ve alıcı olan ivme ölçerin veya geofonun son 6 ay içinde kalibre edilmiş olması gerekir.



Şekil 3.33. Empedans kaydı ölçümü ile kazık kesit profilinin elde edilişi (a) hasarlı üretilmiş kazık (b) Yansıma grafiği (c) impuls kaydı ile birleştirilen sonik yansımadan sağlanan görsel kazık profili (ACI 228.2R, 2004)

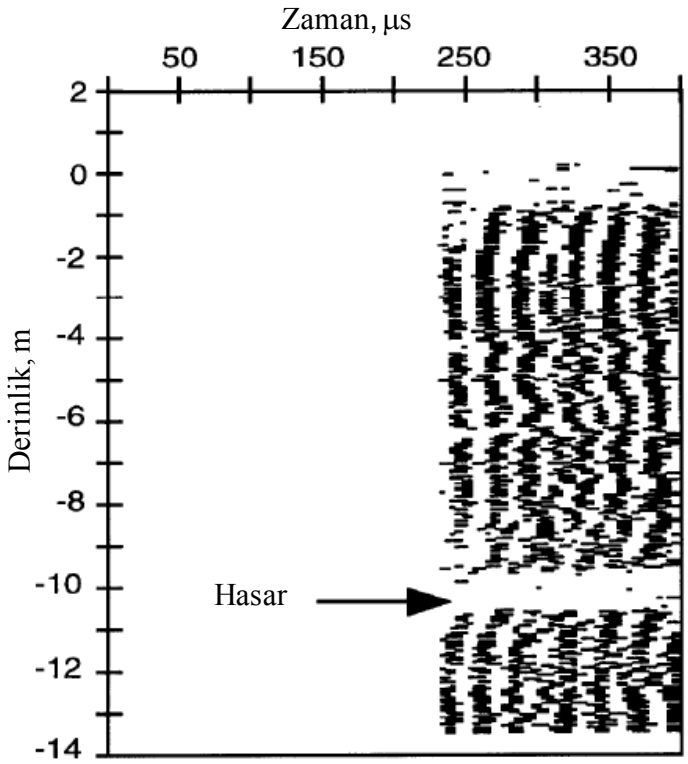
3.5.1.4. Çok kanallı sonik kayıt (cross-hole sonic logging, CSL) yöntemi

CSL yöntemi, sonik yansıma ve impuls kaydı gibi uzun kazıklarda başarı sağlaması mümkün olmayan yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiştir. Yöntemde, kazığa beton dökümünden önce plastik ya da metal tüpler yerleştirilir (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. CSL yöntemi çalışma prensibi ve örnek bir tüp yerleşimi

Eğer beton dökülmüş bir kazık test edilecekse kazık boyunca silindirik delikler açılır. Tüplerden birinin altına bir verici, diğerinin altına ise bir alıcı yerleştirilir. Bir kayıt cihazıyla vericiden gönderilen ultrasonik bir impulsun bir tüpten diğerine betonu geçerek ulaşma süresi kaydedilir. Alıcı ve verici kabloları, bir makara yardımıyla 10 veya 50 mm aralıklarla aşağıya doğru indirilerek ölçümler yapılır. İmpuls iletiminin kaybolduğu bölümler hasarlı olarak değerlendirilir. Şekil 3.35'te hasarlı bir kazıkta yapılmış CSL testinin sonucu görülmektedir.

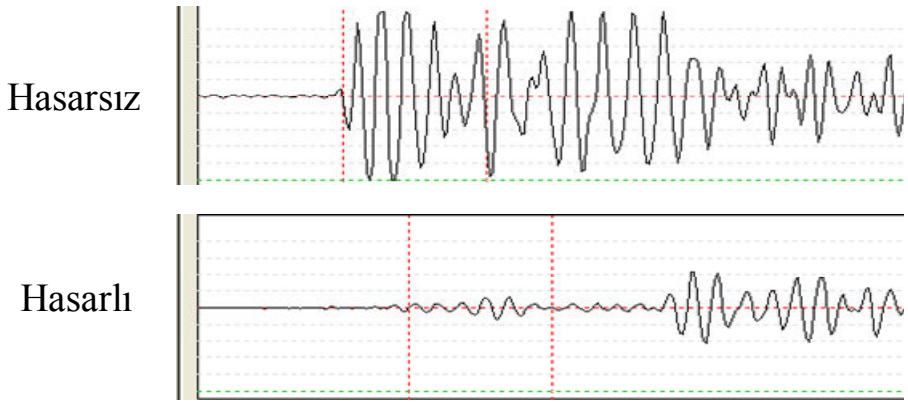


Şekil 3.35. Hasarlı bir kazıktan alınan CSL testi sonucu (ACI 228.2R, 2004)

Betonun ultrasonik impuls hızı, yoğunluğuna ve dinamik elastisite modülüne bağlıdır. Bu bilgi ışığında ölçümle saptanan impuls hızından faydalanılarak betonun kalitesi hakkında fikir sahibi olunabilir. Yine beton içinde bulunan boşluklar, impulsun diğer tüpe ulaşması süresini uzatacağından bu yöntemle tespit edilebilirler. Yöntemle taranan kazık kesiti alanının kazık kesitine oranı, tüp sayısına bağlı bir değişkendir. Çapı 60-100 cm arasında bulunan kazıklarda 2-4 arasında tüp kullanılması uygun kabul edilir. Ayrıca tüpler dışında kalan kısımlar hakkında bu yöntemle bir bilgi sağlanamaz. Yöntemin başarısı, kullanılan tüp sayısı, tüplerini

kazık çeperine olan uzaklıkları, tüple beton arasındaki tutunma, testi yapan ve sonuçları analiz eden uygulayıcının tecrübesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Yöntemle belirlenebilen hasar oranı, %5-%10,7 kesit daralması değerleri arasındadır. Yöntemle kesin olarak belirlenebilen hasar oranı ise yine kesit daralması olarak %9-%20 aralığındadır (Li ve diğ., 2005).

CSL testini sonuçlarını yorumlamanın en özetle iki önemli noktası vardır. Eğer kazıkta bir hasar mevcutsa, ilk sinyalin gelişi gecikir. Diğer önemli işaret ise sinyal zayıflamasıdır. Şekil 3.36'da CSL testi sonucuna göre hasarsız ve hasarlı iki kazık örneği görülmektedir.

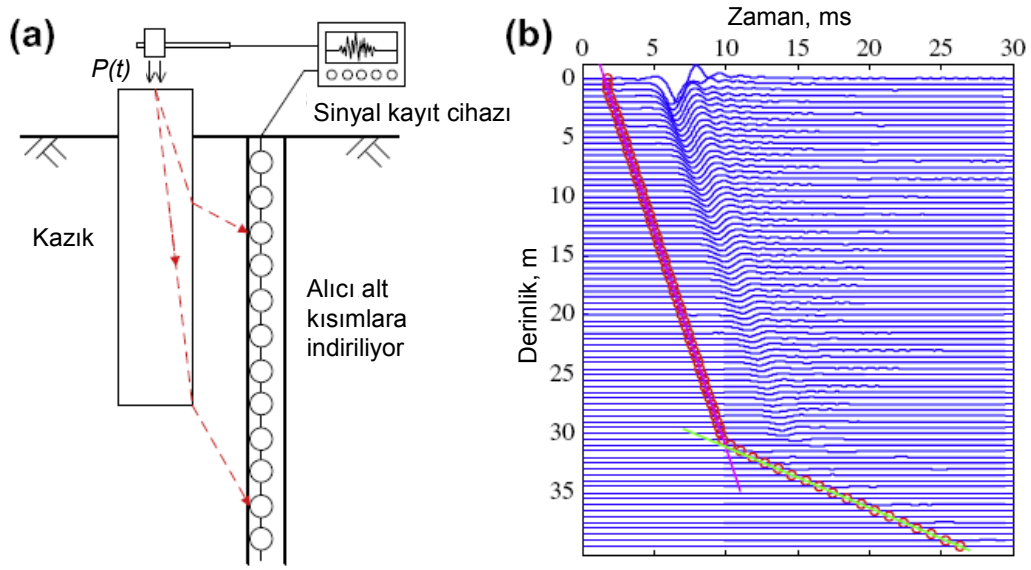


Şekil 3.36. CSL testi ile hasarlı ve hasarsız kazık örnekleri

3.5.1.5. Paralel sismik yöntemi

Paralel sismik yöntemi buraya kadar anlatılan yöntemlerden farklı olarak kazık başlığının açıkta olmadığı zamanlarda kullanılabilir olmasıyla önemli bir avantaja sahiptir. Bu sayede üzerinde kazık başlığı oluşturulmuş olsa da kazık bütünlüğü test edilebilir. Yöntemde, kazık yakınında olmak kaydıyla kazığa paralel küçük bir kanal açılır. Kanalın akustik bir geçirgen olan su ile dolu kalmasını sağlayabilmek için genellikle sızdırmaz plastik bir boru kullanılır. Kanalın üst iç kısmına bir akustik alıcı yerleştirilir ve kazığa en yakın noktadan bir çekiç darbesi yardımıyla kazıkta titreşim oluşturulur. Çekiç ve alıcıdan elde edilen zaman boyutlu veriler, dijital bir kayıt sistemine depolanır. Daha sonra alıcı belirli aralıklarla alt kısımlara doğru indirilir ve çekiç darbesinin yeri değiştirilmeden aynı süreç tekrarlanır. Her bir noktada sinyalin çekiç noktasından alıcıya ulaşması için geçen süre elde edilir.

Sinyalin zemin içindeki ilerleme hızı betonda olduğundan düşüktür ve eğer kanal kazığa paralel açılmışsa ölçülen süreye zeminin etkisi aynı kalacaktır. Alıcının kazık alt ucu seviyesine ulaşması halinde, sinyal alt kısımlarda kalan zemin tabakasına dağılacağı için sinyal iletim süresi ölçümünde bir süreksizlik oluşacaktır. Aynı şekilde kazık boyunca bir hasar varsa, sinyalin bu hasarın etrafında dolaşacak olması da iletim süresini arttıracağından hasar noktası belirlenebilir. Şekil 3.37(a)'da sismik paralel testin yapılışı, Şekil 3.37(b)'de ise alıcının kazık alt ucuna ulaşmasıyla iletim süresinde oluşan değişim görülmektedir. İletim süreleri birleştirildiğinde oluşan iki doğrunun kesişim noktası, kazığın alt ucu olarak belirlenmiş olur.



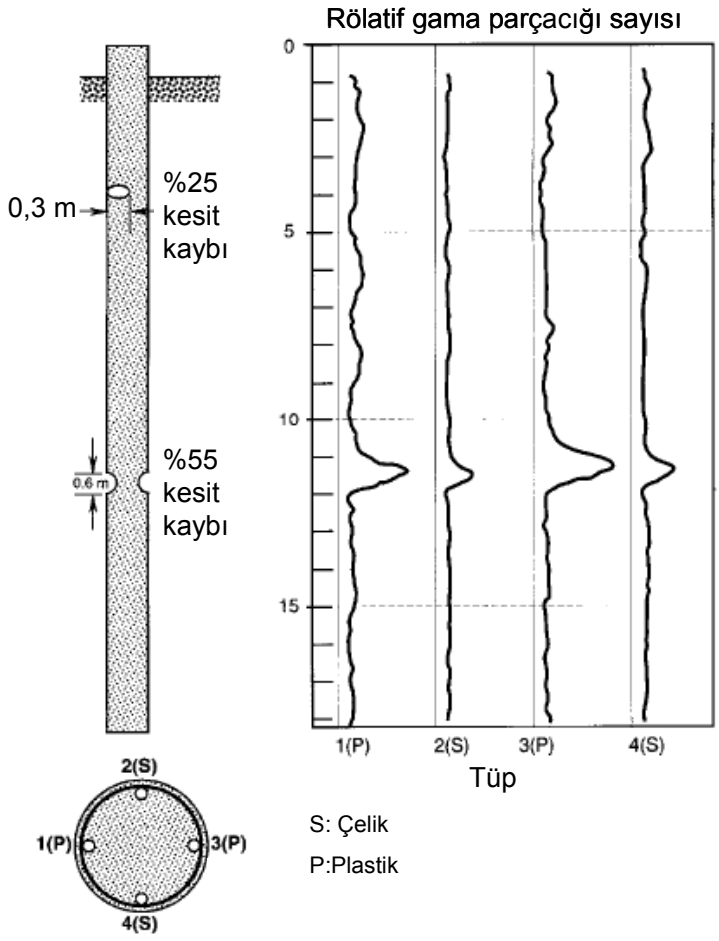
Şekil 3.37. Paralel sismik yöntemi (a) Ölçüm bileşenleri (b) Tipik bir sinyal iletim süresi-derinlik ilişkisi (Ni ve diğ., 2011)

3.5.2. Nükleer yöntem (Gamma-gamma logging, GGL)

GGL yöntemi ile test edilen kazığın bütünlüğü, vericiden yayılan gama parçacıklarının ne kadarının alıcı tarafından algılandığı ile ilişkilendirilir (Liebich, 2004). Çünkü vericiye ulaşan gama parçacıklarının miktarı doğrudan, iki ayrı tüpte yer alan verici ve alıcı arasında kalan betonun ortalama yoğunluğu ile ilgilidir (doğrudan iletim, direct transmission). Yöntemin ana amacı malzeme yoğunluğunu bulmak yerine, tahmin edilen bu yoğunluğun kazık boyunca değişimini elde etmektir. GGL yönteminin standart sapma değeri 8 kg/m^3 olarak verilmiştir (ASTM C1040, 2000).

GGL yönteminin nükleer bir yöntem olması, yöntemin başarısının kullanılan radyoaktif malzemenin (kobalt 60 veya sezyum 137) yayılım özelliklerine bağlı olması, ölçüm sonuçlarının tüp malzemesinden ve kalınlığından etkilenmesi, donatıların ölçüm kalitesini etkilemesi ve yöntemi ancak eğitimli personelin kullanabilir olması önemli zorluklardır (IAEA, 2002).

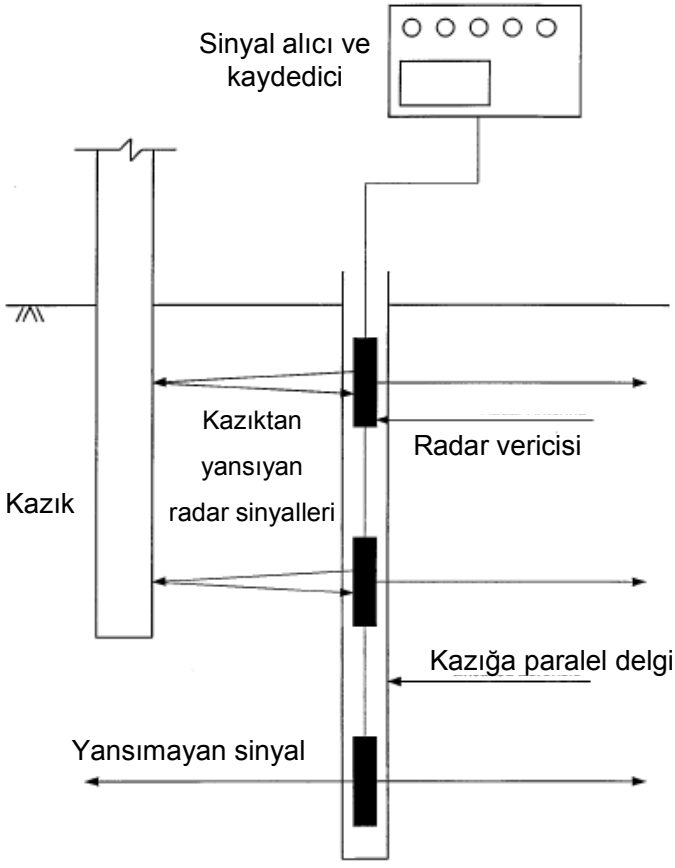
Baker ve diğerleri (1993), GGL yönteminde kesit kaybının ve kullanılan tüp malzemesinin gama parçacığı rölatif sayısına etkisini incelemek için planlı olarak hasar verilmiş kazıklarla testler yapmışlardır. Şekil 3.38'de görülen test sonuçlarına göre, 12 m derinlikte bulunan %55 kesit kaybı, plastik tüplerle daha rahat algılanmıştır. Ayrıca 4 m derinlikte bulunan %25 kesit kaybı algılanamamıştır. Bu bilgiler ışığında GGL yönteminin başarılı olabilmesi için kesit kaybı oranının oldukça yüksek olması gerektiği söylenebilir.



Şekil 3.38. Çelik ve plastik tüplerle gerçekleştirilen GGL testinin sonuçları (Baker ve diğ., 1993)

3.5.3. Radar yöntemi (Ground penetrating radar, GPR)

Gerek kullanım kolaylığı gerekse sonuçların yorumlanabilmesi açısından GPR diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha pratik olarak değerlendirilebilir. GPR cihazı 1-2000 MHz aralığında radyo dalgaları yayabilen ve aynı zamanda bu dalgaları algılayıp, kaydedebilen bir cihazdır. Söz konusu radyo dalgası farklı özelliklere sahip iki malzemenin arayüzüne ulaştığında, enerjisinin bir kısmı geri yansır. Enerjinin bir kısmı ise sonraki ortamda ilerlemeye devam eder. Bu enerji dağılımı iki ortamın elektriksel empedans değerlerine bağlıdır. Şekil 3.39'da GPR yönteminin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 3.39. GPR yöntemi ile kazık bütünlüğünün irdelenmesi (Chakraborty ve Brown, 1997)

Kazıktan geri yansıyan sinyalin en az kayıpla geri dönüp, en doğru sonucu vermesi için kazığa paralel açılan delginin, kazığa mümkün olan en yakın konumda olması istenir. Zemin su içeriğinin yüksek olması, sinyal kaybını arttıracağı için sinyalin penetrasyon derinliği de azalmış olur.

3.6. Kazık Hasarlarının Belirlenmesinde Kullanılan Mevcut Yöntemlerin Özeti

Kazık hasarlarının belirlenmesi için en yaygın kullanılan yöntemler ve ölçüm prensipleri önceki bölümlerde sunulmuştur. Bu yöntemler arasında bir seçim yapılabilmesi için hangi kolaylıklara ve zorluklara sahip olduklarına topluca göz atmak faydalı olabilir. Tablo 3.2 bu amaçla hazırlanmıştır.

Tablo 3.2. Kazık hasarları için mevcut yöntemlerin kolaylıkları ve zorlukları

Yöntem	Kolaylıklar	Zorluklar
Sonik yansıma (Sonic echo)	Önceden yerleştirilmiş tüplere ihtiyaç yok, taşınabilir ekipman, çok hızlı ölçüm	Kesit daralması ve genişlemesi ayırt edilemiyor, boy/çap>30 için sonuç vermiyor, çap ölçümü yapılamaz
İmpuls kaydı (Impuls logging)	Önceden yerleştirilmiş tüplere ihtiyaç yok, dinamik rijitlik ölçümü, çok hızlı ölçüm	Sonuçların yorumlanması zor, sonik yansıma da olduğu gibi geometri şartlarına duyarlı
Empedans kaydı (Impedance logging)	Önceden yerleştirilmiş tüplere ihtiyaç yok, kazık profili görsel olarak elde ediliyor	Çok fazla ve kaliteli veri gerektiriyor, tam bir analiz için ciddi bir zamana ihtiyaç var
Çok kanallı sonik kayıt (Cross hole sonic logging)	Yukarıdaki yöntemlere oranla daha hassas, derinlik problemi yok, hızlı	Önceden yerleştirilmiş tüp ya da sonrada delgi lazım, tüpler arasında kalmayan hacimlere kör
Paralel sismik (Parallel seismic)	Mevcut yapıların altındaki kazıklarda kullanılabilir, zemin sönümlemesinden az etkileniyor, hızlı	Kazığın yanında açılacak delgi maliyeti, sinyal ilk ciddi hasarda kayboluyor, yüzeysel hasarları duyarlı değil
Nükleer (Gamma-gamma logging)	Yoğunluk ve uzunluk ölçümü hassas	Önceden yerleştirilmiş tüp gerektiriyor, tüp sayısı yeterli olmazsa tam tarama yapılamıyor, test sonuçlarını etkileyen çok fazla etmen var, nükleer tehlike, özel eğitimli personel gerektiriyor
Radar (Ground Penetrating Radar)	Beton-hava arayüzeyine çok duyarlı, hızlı	Teorisinde eksik alanlar var, 75 mm çap sınırı var, sık donatı penetasyon derinliğini engelliyor

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Genel

Tez çalışması kapsamında TDR yönteminin kazıklarda hasarın algılanması ve konumlandırılması için kullanımı, temsili kazık elemanı olarak düşünülen betonarme kirişler üzerinde araştırılmıştır. Bu amaçla üretilen temsili kazıklar 100 mm$\times$100 mm kesitli olup 1 m uzunluğundadır. Temsili kazıklarda 4 mm çaplı donatı kullanılmıştır. Kalıp, kontrplak üzerine istenilen ölçülere göre yerleştirilen çelik plakalarla oluşturulmuştur. Beton, laboratuvar koşullarında istenilen dayanıma uygun karışım oranı ile üretilmiştir. Test düzeneği 3 noktalı eğilme testi uygulayacak şekilde tasarlanmıştır.

4.2. Malzeme

4.2.1. Beton ve donatı çeliği

Kazıkları temsil eden deney numuneleri olan kirişlerin üretiminde kullanılan beton, Kocaeli Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında hazırlanmıştır. Karışım oranı, hedeflenen 20 MPa basınç dayanımı değerine göre 0,85:1:2,6:4 (su:çimento:kum:çakıl) olarak seçilmiştir. Çimento olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Betonda kullanılan en büyük agrega boyutu 10 mm olup bu değer, benzeşim kuralları gereği kesitin en büyük kenarının %10'u olarak seçilmiştir. Betonun kalıba yerleşimi kolaylaştırmak amacıyla beton karışımına akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Numunelere dökümden sonraki ilk 3 gün, ani su kaybını engellemek amacıyla, ıslatılmış keten bez sararak kür uygulanmıştır. Tablo 4.1'de beton karışım tasarımı görülmektedir.

Numunelerin tamamı bir seferde dökülemediğinden, her döküm günü basınç dayanımını kontrol etmek amacıyla betondan test silindirleri için örnekler alınmıştır. Silindirlerin çapı 150 mm olup yükseklikleri 300 mm'dir. Silindir test betonlarına da numunelerle aynı kür uygulanmıştır. Her testin sonunda ilgili kirişlerin beton

dökümünden alınan silindir basınç numuneleri beton presinde kırılarak dayanım değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.1'de beton presinde test edilen bir silindir beton numunesi görülmektedir. Test edilecek silindirlerin üst yüzeylerine, sürtünmeyi azaltmak amacıyla sülfat-grafit karışımından elde edilen başlık yapılmıştır. Gerçekleştirilen beton testleri sonucunda beton dayanımı ortalama olarak 25 MPa bulunmuştur.

Tablo 4.1. Beton karışım tasarımı

S/Ç (%)	A/Ç (%)	Ağırlıkça oranlar (%)				En büyük agrega boyutu (mm)	Agrega gradasyonu
		Su (S)	Çimento (Ç)	Agrega (A)			
				Kum	Çakıl		
0,85	6,6	10	11,8	30,7	47,5	10	Hazırlanmadı



Şekil 4.1. Beton presi

Temsili kazık numunelerinde donatı olarak benzeşim kuralları gözönüne alınarak 2 adet metrik 4'lük gijon (Grade A2-70) donatı olarak kullanılmıştır. Malzemenin akma ve kopma dayanımları üretici firma tarafından sırasıyla en az 450 MPa ve en az 700 MPa olarak verilmiştir.

4.2.2. Sensör kablo

Bu çalışmada sensör olarak kullanılan koaksiyel kablolar, çok farklı uygulamalarda iletim aracı olarak kullanılabilirler. Televizyon (TV ve Kablo TV) yayını, analog ve sayısal telefon ağları ve yerel alan ağları bu uygulamalardan bazılarıdır. Analog ve sayısal sinyal taşıyabilen bu kabloların en önemli üç değişkeni içyapı geometrisi, malzemesi ve empedansıdır.

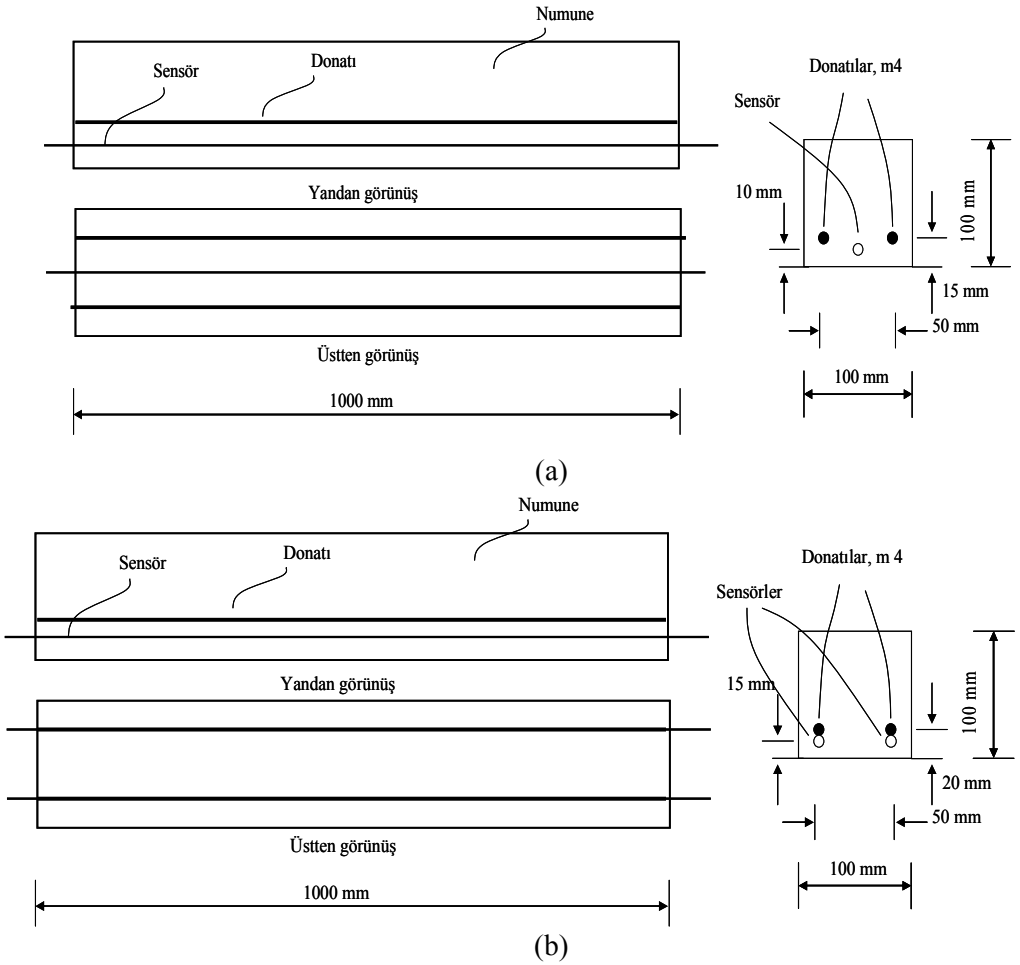
Sensör kabloların seçilen bazı yapısal ve elektriksel özellikleri Tablo 4.2'de yer almaktadır.

Tablo 4.2. Sensör kabloların özellikleri

Sensör Kablo	Yapısal Özellikler	Elektriksel Özellikler
RG 59 / U-6	İç iletken: Bakır	Kapasitans: 57 pF/m
	İç iletken çapı: 0,80 mm	Empedans: 75 ± 3 ohm
	İç yalıtkan: Polietilen	İletim hızı: 0,78
	İç yalıtkan çapı: 3,70 mm	Çalışma gerilimi: 1,1 kV
	Kaplama: Alüminyum folyo	Test gerilimi: 2,1 kV
	Dış iletken: Bakır örgü	Çalışma sıcaklığı:-40 ^{o}C+70^{o}C
	Koruyucu yalıtkan: PVC	Zayıflama: 100 MHz için 9 dB/100 m, 1750 MHz için 40,5 dB/100 m
	Toplam çap: 6,0 mm	
RG 6 / U-4	İç iletken: Bakır	Kapasitans: 57 pF/m
	İç iletken çapı: 1 mm	Empedans: 75 ± 3 ohm
	İç yalıtkan: Köpüklü Polietilen	İletim hızı: 0,78
	İç yalıtkan çapı: 4,7 mm	Çalışma gerilimi: 1,1 kV
	Kaplama: Yapışkanlı alüminyum folyo	Test gerilimi: 2,5 kV
	Dış iletken: Alüminyum örgü	Çalışma sıcaklığı:-40 ^{o}C+70^{o}C
	Koruyucu yalıtkan: PVC	Zayıflama: 100 MHz için 7,5 dB/100 m, 1750 MHz için 30,5 dB/100 m
	Toplam çap: 7,0 mm	

4.3. Numune Geometrisi

Temsili kazık numunelerinin tamamı aynı boyutlarda olup, kazık genişliği ve derinliği 100 mm, uzunluğu 1 m'dir. Numunelerde kullanılan sensör kablolar değişkenlik göstermektedir. Şekil 4.2'de numune geometrisi ile sensör ve donatının kesite yerleşimi görülmektedir. Tablo 4.3'te ise numuneler tanıtılmıştır.



Şekil 4.2. Temsili kazıkların kesit özellikleri ve kalıp planları (a) tek sensörlü kesit (b) çift sensörlü kesit

Temsili kazık numunelerinin üretimi için kontraplak (plywood) üzerinde birleştirilen çelik plakalar kullanıldı. Bir dökümde 3 numune elde etmek için 4 çelik plaka, aralarında numune genişliği kadar mesafeyle birbirlerine paralel olacak şekilde gijonlar yardımıyla sabitlendi.

Tablo 4.3. Numunelerin tanıtımı

Numune adı	Sensör adedi	Sensör
RG59/U-6 S1 M	1	RG 59 / U-6 M
RG6/U-4 S1 M	1	RG 6 / U-4 M
RG59/U-6 S1 N	1	RG 59 / U-6 N
RG6/U-4 S1 N	1	RG 6 / U-4 N
RG59/U-6 S2 N-M	2	RG 59 / U-6 N RG 59 / U-6 M
RG6/U-4 S2 N-M	2	RG 6 / U-4 N RG 6 / U-4 M
RG S2 M-M	2	RG 59 / U-6 M RG 6 / U-4 M

M: Modifiye (Belirli aralıklarla koruyucu ceket üzerinde tam dairesel yarıklar oluşturuldu.)

Daha sonra çelik plakalar arasında kalan numune boşluğunun başına ve sonuna yüksekliği numune derinliği kadar olan ahşap başlıklar yerleştirildi. TDR ölçümü için sensör kabloların numune dışına uzatılması gerektiği için ahşap başlıklara sensörün geçebileceği bir çapta delgi açıldı. Donatıları sabitlemek için yine ahşap başlıklarda oluşturulan fakat bu sefer başlık kalınlığının yarısına kadar açılan delgiler kullanıldı. Her beton dökümünde kalıbın beton temas edecek bölgelerine kalıp sökümünü kolaylaştırmak amacıyla kalıp yağı sürüldü. Şekil 4.3'te sensörü ve donatısı yerleştirilmiş, beton dökümüne hazır bir kalıp görülmektedir.



Şekil 4.3. Numuneler için kullanılan kalıp

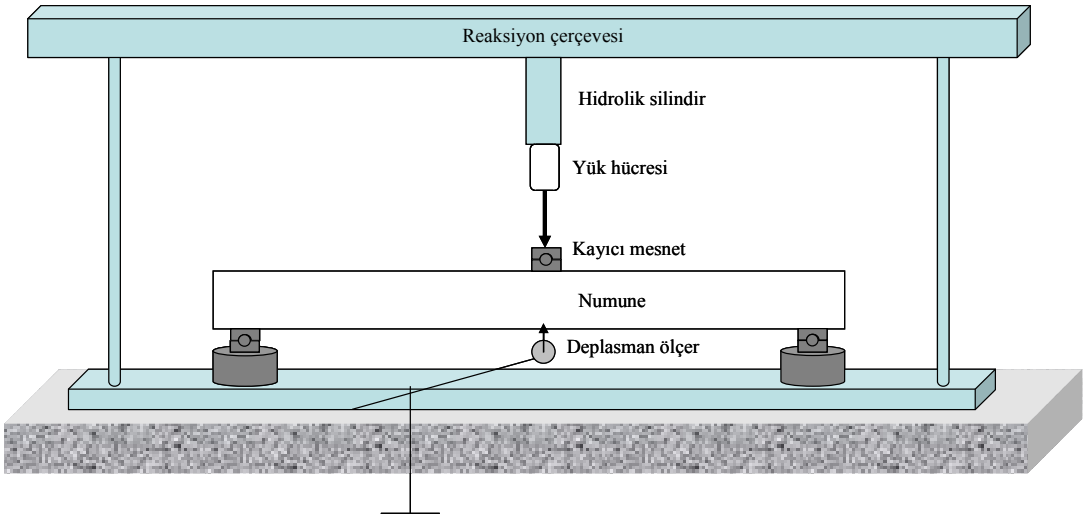
4.4. Üç Noktalı Eğilme Testi

Tez kapsamında, tüm temsili kazık numunelerinin eğilme testleri KOÜ Geoteknik Laboratuvarında gerçekleştirildi. En yaygın eğilme testi olan üç noktalı eğilme testi,

simetrik yükleme durumunda en büyük momentin kiriş uzunluğunun tam ortasında oluşması ve kiriş boyunca kesme kuvvetinin sabit olması sebebiyle önceden kolayca tahmin edilebilir bir hasar paterni oluşturabilmek için seçildi.

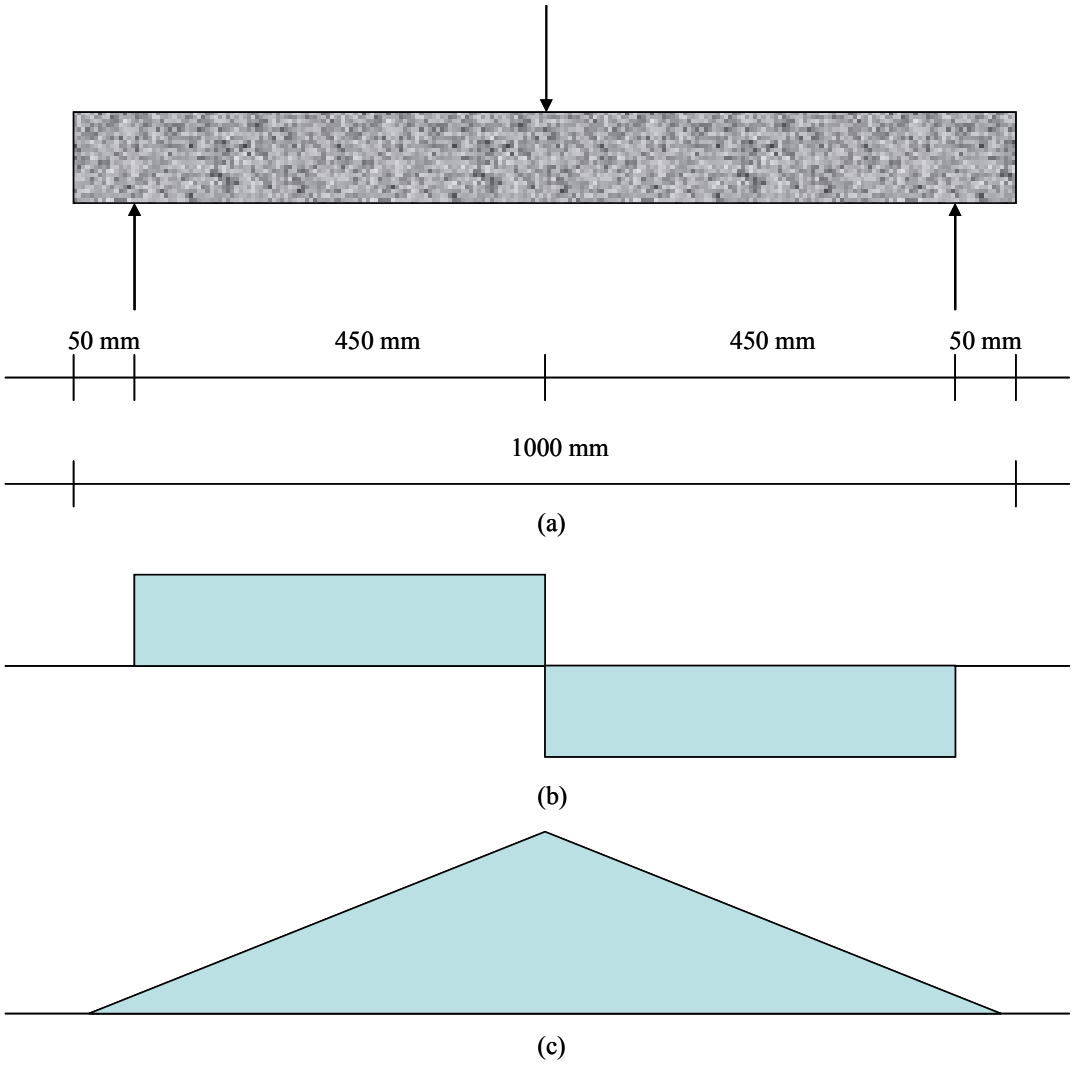
Eğilme testi, Şekil 4.4'te görülen düzenek ile yapıldı. Numuneye yük uygulanan noktaya ve sağ-sol dayanma noktalarına kayıcı mesnetler yerleştirildi. Numune uçlarında mesnetlerden sonra 50 mm net açıklık bırakıldı. Numunenin tam orta noktasına düşey yönde uygulanan yük bir yük hücresiyle okundu. Düşey yükün uygulandığı noktanın tam altına yerleştirilen deplasman ölçer ile düşey deplasman ölçüldü. Şekil 4.5'te yükleme geometrisi ve numunede oluşan kesit tesirleri görülmektedir.

Yük, 50 kN kapasiteli bir çerçeve yardımıyla uygulandı. Kür periyodu tamamlanan numuneler, oluşacak çatlakları daha iyi görebilmek için üstleri temizlenerek çerçeveye yerleştirildi. Kullanılan yük hücresi 50 kN kapasiteli olup Sewha CNM firmasına ait SS300 modelidir.



Şekil 4.4. Yükleme düzeneği

Yük değeri, yük hücresinin bağlı olduğu sayısal indikatörden (Densi FS8000) okunmuştur. Deplasman ölçer ise 0,01 mm hassasiyetli, 2,5 cm ölçüm uzunluğu olan Shan PMI firmasına ait 512-166 modelidir.

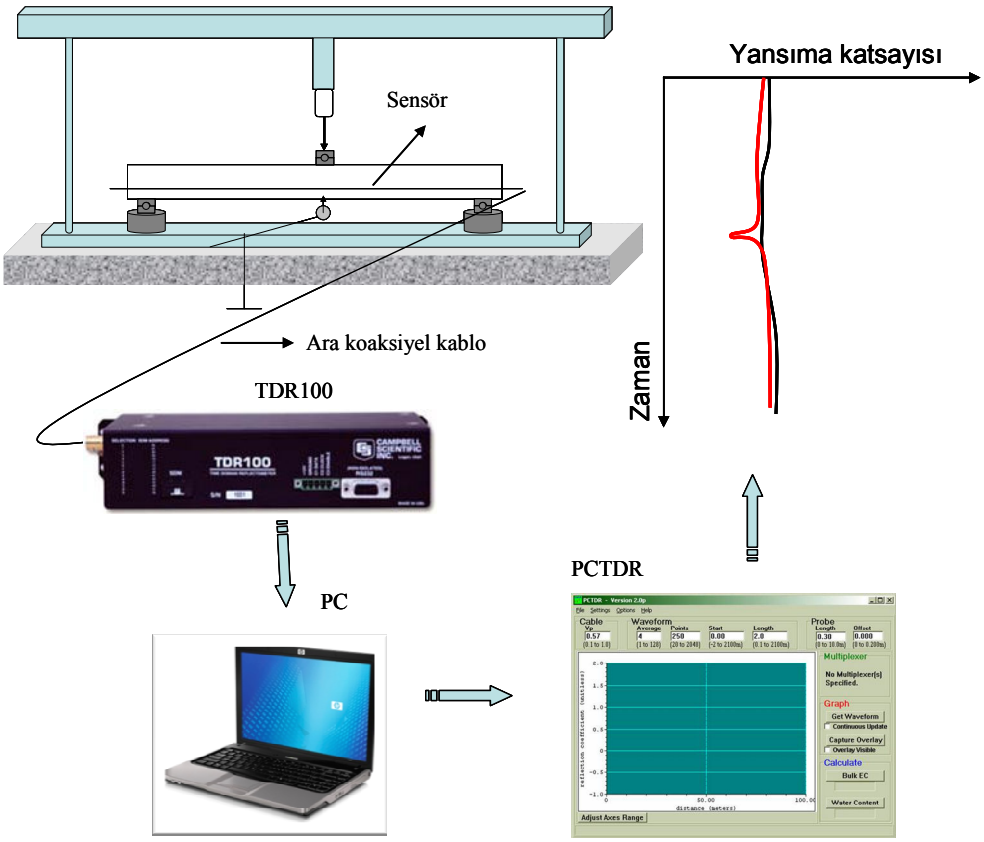


Şekil 4.5. Numune yükleme geometrisi ve kesit tesirleri (a) Yükleme geometrisi (b) Kesme kuvveti diyagramı (c) Moment diyagramı

4.5. Yükleme ve Ölçüm Prosedürü

Her test için yükleme başlatılmadan önce numune ve yükleme çerçevesine yerleşimi geometrik olarak kontrol edildi. Yük hücresi ve deplasman ölçer dikkatlice yerleştirildikten sonra yüklemeye başlandı. Yükleme elle kontrol edilerek yapıldığı için belirli bir standarda uygun hale getirmek gerekti. Bu yüzden ilk 1 mm düşey deplasmana kadar her 0,1 mm'de bir, daha sonrasında her 0,3 mm'de bir yük okuması yapılarak, yükleme monotonik ve deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmeye çalışıldı. Her yük-deplasman okumasında numunenin çekme yüzüne yerleştirilmiş sensör üzerinde TDR ölçümü yapıldı. Bu ölçümün yapılabilmesi için sensör ile TDR cihazı arasına bir koaksiyel ara kablo yerleştirildi.

Böylelikle sensör üzerinde oluşan gerilmelerin cihaz kablo girişine zarar vermesi önlenmiş oldu. Ölçüm eş anlı olarak bilgisayara kaydedildi. Yükün artmasıyla oluşan çatlak genişlikleri okundu ve çatlak paterni oluşturuldu. Ölçüm sistemi Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Ölçüm sistemi

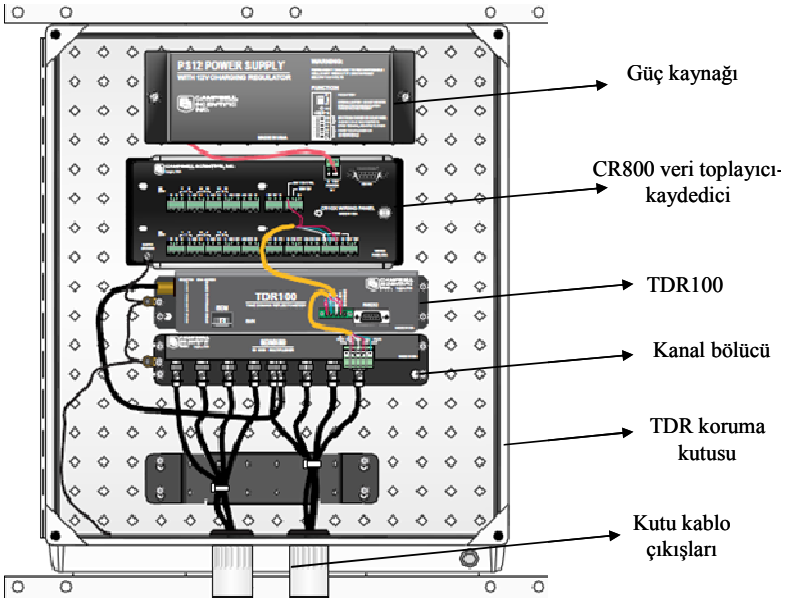
Ölçümlerde TDR cihazı olarak Campbell Scientific firması tarafından üretilen TDR100 kullanılmıştır. Üretici cihazın yükselme süresini 270 pikosaniye, başlangıç voltaj sinyalini 250 miliVolt, zaman çözünürlülüğünü 12,2 pikosaniye ve çıkış empedansı 50 ohm olarak bildirmiştir. Sinyalin cihazı terk etmesinden sonraki ilk 10 nanosaniye aşma %5, daha sonrasında %0,5 olarak verilmiştir. Şekil 4.7'de TDR100 cihazı görülmektedir. Cihazın sol tarafında bulunan koaksiyel kablo girişi BNC (Bayonet Neill–Concelman) tipi bağlantılara uygundur. Cihazın ağırlığı 700 gramdır.



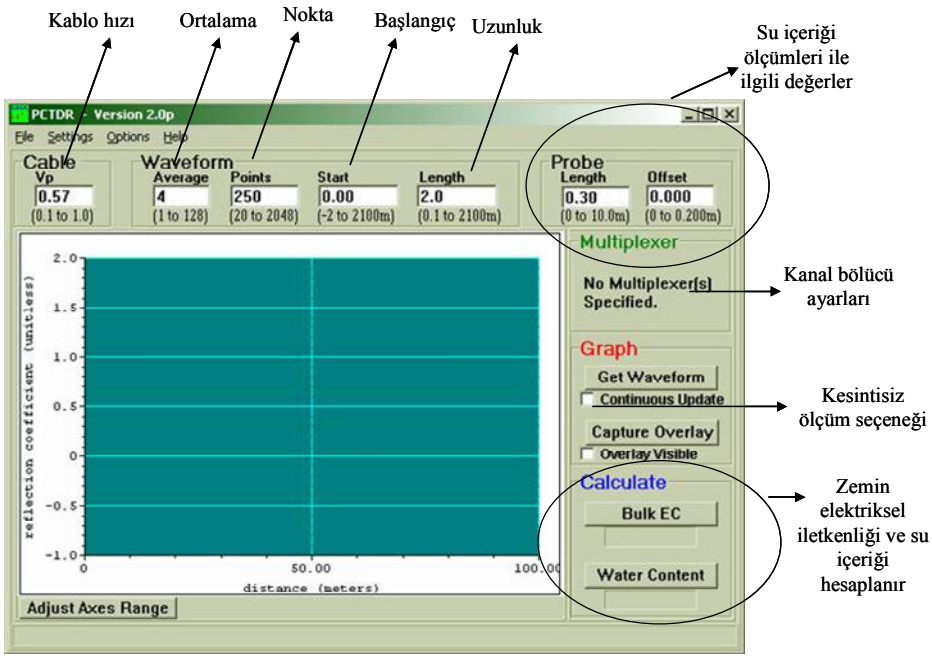
Şekil 4.7. TDR100 cihazı

TDR ile hasar görüntüleme birden fazla bileşenle mümkün olabilmektedir. TDR100 cihazı ile alınan ölçümler CR800 veri toplama sistemi ile kaydedilmektedir. Eğer çok kanallı ölçüm yapılmak isteniyorsa TDR100 cihazına bir kanal bölücü (multiplexer) bağlanır ve istenirse 8 kanal bölücü ile 512 kanaldan birden ölçüm yapılabilir. Çift sensörlü numunelerde kanal bölücüden faydalanılmıştır. Şekil 4.8'de TDR sisteminin bileşenleri görülmektedir.

TDR100 ile elde edilen veriler RS232 kablosu ile bilgisayara aktarılıp, PCTDR yazılımı ile görüntülenmiş ve analiz edilmiştir. PCTDR zeminlerde TDR yardımı ile su muhtevasının belirlenebilmesi için geliştirilmiş olsa da genel anlamda her türlü TDR ölçümünün değerlendirilebileceği bir yazılımdır. Seçilen aralıkta ölçüm yapılmasını sağlayan PCTDR ortalama alma ve ölçüm noktası sayısı seçme imkanları sunmaktadır. Ayrıca çok kanallı ölçüm yapılacağı zaman kanalları seçme işlemi de PCTDR yardımıyla yapılmaktadır. Şekil 4.9'da PCTDR yazılımının arayüzü tanıtılmıştır. Arayüzde görülen kutulardan kablo hızı, sinyal iletim hızını belirtir ve ışık hızının yüzdesi olarak ifade edilir. Ortalama kutusu, sensör üzerinde aynı ölçümün kaç defa tekrarlanıp bunların ortalamasının sonuç olarak görüntüleneceğini gösterir (1-128 aralığında). Nokta kutusu, sensörün ölçüm için kaç dilime ayrılacağını yani kaç noktada ölçüm yapılacağını (20-2048 aralığında), başlangıç ve uzunluk kutuları sırasıyla ölçümün sensör kablonun kaçıncı metresinden başlatılacağını (-2 ile 2100 arasında) ve ne uzunlukta ölçüm yapılacağını (0,1-2100 aralığında) gösterirler.



Şekil 4.8. TDR ölçüm sisteminin bileşenleri



Şekil 4.9. PCTDR yazılımının arayüzü

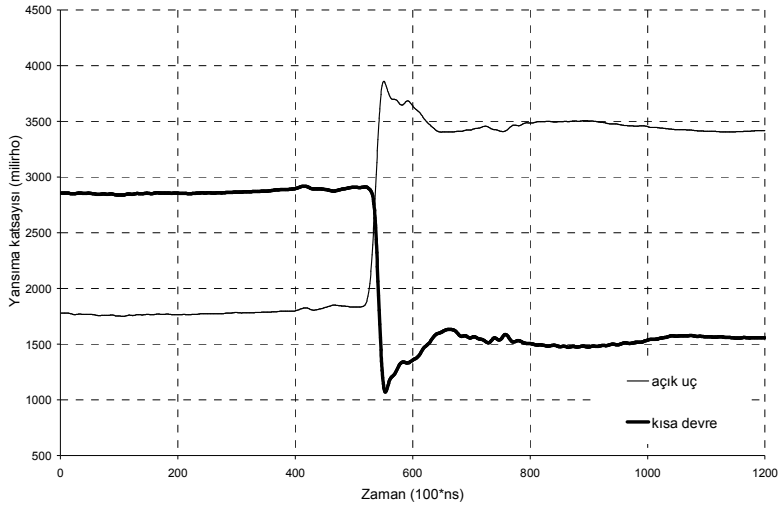
4.6. TDR ile Kazıklarda Yapısal Hasar Görüntüleme Yaklaşımı

Yapısal hasar görüntüleme, süreç olarak değerlendirilmesi gereken bir kavramdır. Bu süreç hasar algılamada kullanılacak sensöre karar verilmesiyle başlar ve sensörün yapı elemanına nasıl yerleştirileceği sorusu ile devam eder. Koaksiyel kablonun sensör olarak kazığın içine yerleştirilmesiyle ve bu sensör üzerinde TDR ölçümleri

yapılmasıyla kazığı baştan sona bir radar gibi tarayabilen ve bunu yaparken çevresel faktörlerden hiç etkilenmeyen bir ölçüm yöntemi elde edilmiş olur. Kazık hasarları için geliştirilen diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, maliyet ve ölçüm hızı gibi kriterler bakımından da kablo sensörler çok daha ekonomiktir.

Bu aşamadan sonra sensörden gelen verilerin toplanması ve kaydedilmesi gerekir. Bunun günümüz teknolojisiyle en kolay çözümü bir veri toplama-kaydetme birimi kullanmaktır. Bu birim basit bir bağlantı ile eldeki verileri hızlı bir şekilde bilgisayar ortamına taşıyabilir. Elde edilen verilerin işlenmesi, istenen amaca uygun olarak yapılırsa verimli olur. Söz konusu ölçüm köprü ayaklarındaki sediment kalınlığı ölçümü ise TDR sinyalinin başlangıç ve yansıma noktalarının bulunması gerekir. Eğer TDR kazık hasarını algılamak için kullanılıyorsa sinyalin başlangıç noktasından yansıma noktasına kadar tamamının incelenmesi gerekir. Çünkü empedans değeri sabit olması gereken bir sensörde yansıma katsayısının sensör boyunca değişmemesi gerekirken, oluşan bir sıçrama kazık üzerinde bir hasarın varlığını işaret edecektir. PCTDR bu açıdan bakıldığında amaca uygun bir yazılımdır.

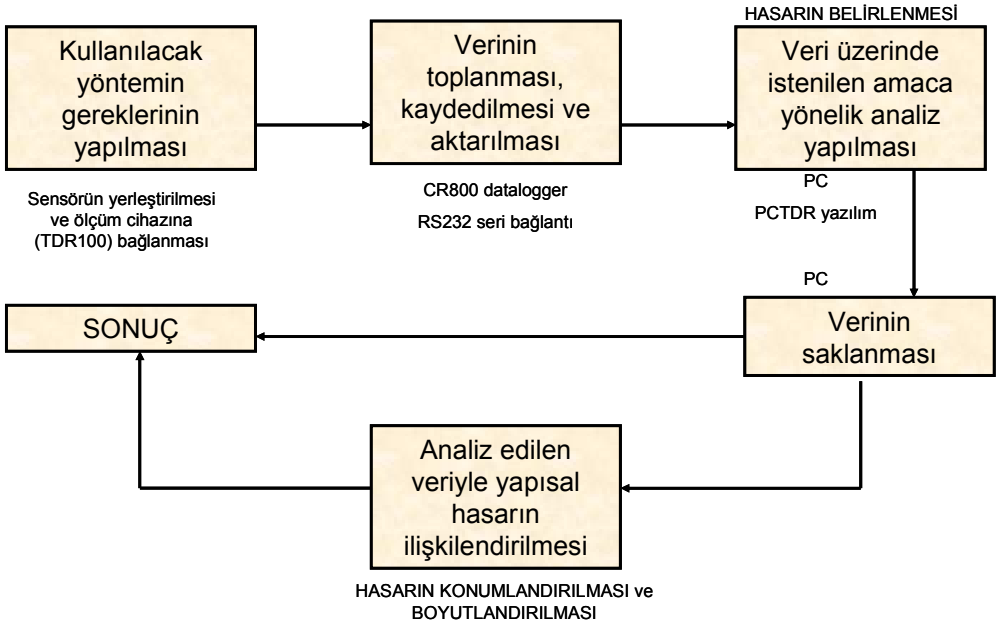
Sinyalin tamamının taranıyor olması, sinyalin sonu ile sensörün fiziksel sonunun aynı olması anlamına gelir. Bunu anlamanın en kolay yolu açık uçla sonlandırılmış bir sensörde TDR ölçümünü yaptıktan sonra aynı uca kısa devre yaptırılıp tekrar aynı ölçümü yapmaktır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Açık uç ve kısa devre sonlandırmaları

Her iki ölçümde de sinyalin aynı noktada yansıması sensörün tamamının tarandığı anlamına gelir. Şekil 4.10'da görülebileceği üzere, sinyal hem açık uç hem kısa devre sonlandırılmalarında yaklaşık 5,3 ns civarından yansımaktadır. Bu durum sensörün tamamının tarandığını işaret eder.

Şekil 4.11'de TDR ile kazıklarda yapısal hasar görüntüleme yaklaşımı özetlenmiştir. Veri toplama-kaydetme biriminden bilgisayara aktarılan veriler üzerinde uygun bir yazılımla analiz yapıldıktan sonra hasarın varlığına karar verilmesi aşamasına geçilir. Bunu yapabilmek için kazık hasarının kullanılan sensörde nasıl bir etki yarattığının bilinmesi gerekir.



Şekil 4.11. Kazıklarda TDR ile yapısal hasar görüntüleme yaklaşımı

İletim hattı teorisi, TDR ölçümleriyle kazık hasarının belirlenmesinde yol göstericidir. Bu teori yardımıyla hasarın varlığına karar verilmesi ve konumlandırılması mümkün olmaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Genel

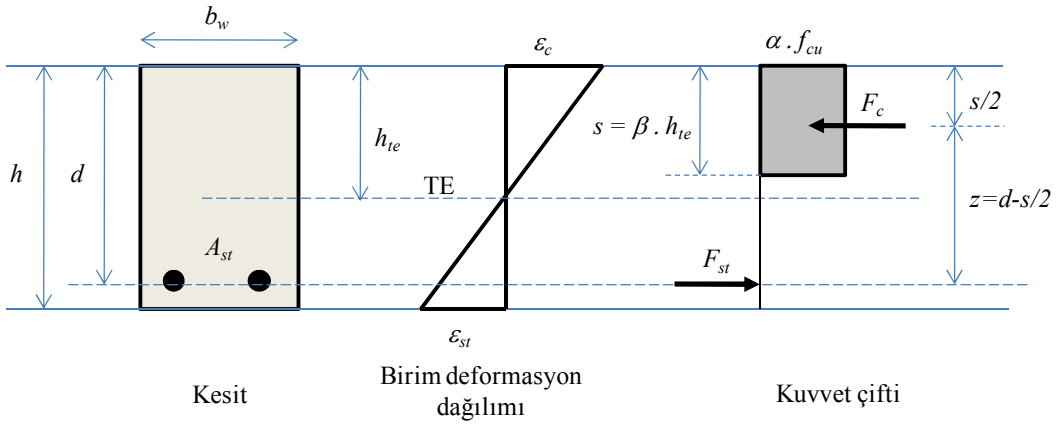
Bu bölümde eğilme testlerinde temsili kazık numunelerinde oluşan çatlakların ve göçmenin, TDR ölçümlerine nasıl yansıdığını irdelenmiştir. Her numune için elde edilen yük-deplasman eğrileri, çatlak paterni ve TDR yansıması beraber değerlendirilmiştir.

Her numune için eğilme testinden önce TDR ölçümü yapılmıştır. Yapılan bu referans ölçümünden elde yansıma katsayısı-uzaklık grafiği üzerinde cihaz içi bağlantı, sensör öncesi bağlantı kablosu, sensör, test ve açık uç yansıması bölgeleri belirlenmiştir. Sensör ve test bölgelerinin farklılığı, sensörün numunenin her iki ucundan bir miktar dışarıya uzatılmış olmasındandır.

Daha sonra çözünürlüğü arttırmak amacıyla, TDR cihazının başlangıç ve uzaklık ayarları değiştirilerek sensör bölgesi üzerine odaklanılmıştır. Yapılan ölçümlerde averaj ve nokta değerleri sırasıyla 16 ve 1024 olarak ayarlanmıştır.

5.2. Eğilme Testi Sonuçları

Monotonik yükleme altında tipik bir betonarme kirişin eğilme testinde yük-deplasman eğrisi üzerinde üç bölge tanımlanabilir. Bu bölgeler çatlama öncesi, çatlama sonrası veya akma öncesi ve akma sonrası bölgeleri olarak sıralanır. Bu üç bölge birbirlerinden çatlama yükü ve akma yükü ile ayrılır. Çatlama yükü, kesitin en altındaki beton yüzeyinde oluşan çekme gerilmesini, betonun çekme dayanımına ulaştıran yüktür. Bu yüke ulaşıldığında kesitte eğilme çatlakları başlar ve kesitin eğilme rijitliği azalır. Akma yükü ise kesitte çekme donatısının akmasına sebep olan yük seviyesidir. Çatlama ve akma yükleri, beton dayanımı ve çekme donatısının miktarına bağlıdır. Şekil 5.1'de sadece çekme donatılı (singly reinforced) bir betonarme kesitin tarafsız ekseni (TE), birim deformasyon dağılımı ve kuvvet çifti görülmektedir.



Şekil 5.1. Çekme donatılı kesitte birim deformasyon dağılımı ve kuvvet çifti

Kesitin eğilmesiyle birlikte donatıda ve beton gerilme bloğunda sırasıyla çekme (F_{st}) ve basınç kuvvetleri (F_c) oluşur. Denge şartları gereği kesit tasarım momenti (M), kesit kuvvetleri tarafından karşılanır.

$$M = F_c \times z = F_{st} \times z \tag{5.1}$$

Denklem (5.1)'deki z uzunluğu, kuvvet çifti arasındaki uzunluk olup Denklem (5.2) ile hesaplanır.

$$z = d - s/2 \tag{5.2}$$

Gerilme bloğunun yüksekliği (s), beton basınç dayanıma (f_{ck}) bağlı bir katsayı (β) ile tarafsız eksen derinliğinin (h_{te}) çarpılmasıyla bulunur:

$$s = \beta \times h_{te} \tag{5.3}$$

$$\beta = 0{,}97 - 0{,}0025 f_{ck} \tag{5.4}$$

Eşdeğer dikdörtgen beton gerilme bloğunun oluşturduğu F_c kuvveti, Denklem (5.5) ile hesaplanır.

$$F_c = \alpha f_{ck} \times b_w \times s \tag{5.5}$$

$$\alpha = 0{,}85 - 0{,}0015 f_{ck} \tag{5.6}$$

Donatı seviyesinde oluşan F_{st} kuvveti ise donatı alanı (A_s) ve donatı akma gerilmesi (f_y) yardımıyla Denklem (5.7) ile hesaplanır.

$$F_{st} = f_y \, A_s \tag{5.7}$$

Bu bilgiler ışığında kiriş tasarım momenti için verilen Denklem (5.1) yeniden düzenlenebilir:

$$M = \alpha \, f_{ck} \times b_w \times \beta \, h_{te} \times (d - \frac{\beta \, h_{te}}{2}) \tag{5.8}$$

$$M = f_y \times A_s \times (d - 0{,}45 h_{te}) \tag{5.9}$$

Beton basınç dayanımı 25 MPa olan kiriş numuneleri için α ve β katsayıları Denklem (5.8)'e yerleştirildiğinde tasarım momenti için gerekli bağıntı elde edilmiş olur:

$$M = 0{,}74 f_{ck} \times b_w \times h_{te} \times (d - 0{,}45 h_{te}) \tag{5.10}$$

Tez kapsamında yapılan kesit dayanım hesaplamalarında, üretim şartlarının uygun olması ve üretim kalitesinden emin olunması sebebiyle beton ve donatı için emniyet katsayıları kullanılmamıştır.

Çatlama momenti kesit donatısı göz ardı edilerek hesaplanan atalet momenti (I_g), betonun kopma modülü (modulus of rupture, f_r) ve çekme gerilmesi yüzeyinin tarafsız eksene olan uzaklığı (y) yardımıyla hesaplanır:

$$M_{cr} = \frac{f_r \, I_g}{y} \tag{5.11}$$

$$I_g = \frac{b_w \, h^3}{12} \tag{5.12}$$

Bu moment değerinde donatıda oluşan gerilmeyi hesaplamak için kullanılan Denklem (5.13)'te kesit modülüne ve atalet momentine ihtiyaç duyurulur. Kesit

modülü (η_s), donatı çeliği ve beton elastisite modüllerinin farklı olması sebebiyle oluşturulan dönüştürülmüş kesit geometrisini belirler ve Denklem (5.14) ile hesaplanır.

$$f_{st,cr} = \frac{M_{cr}}{I_g} y \eta_s \tag{5.13}$$

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_c} \tag{5.14}$$

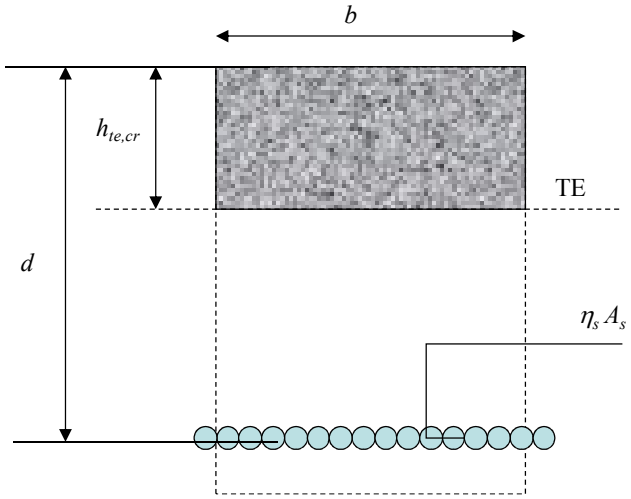
E_c ve E_s sırasıyla betonun ve donatının elastisite modülleridir. Betonun elastisite modülü birçok yönetmelik tarafından basınç dayanımına bağlı olarak verilmektedir. Tablo 5.1'de en sık kullanılan bağıntılar görülmektedir.

Tablo 5.1. Basınç dayanımına bağlı olarak betonun elastisite modülü için önerilen bağıntılar

Yönetmelik	Beton elastisite modülü, E_c
ACI 318 (1989)	$E_c = 4730\sqrt{f_{ck}}$ (MPa)
TS500 (2000)	$E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000$ (MPa)
ACI 363 (1984)	$E_c = 40000\sqrt{f_{ck}} + 10^6$ (psi)
CEB (1993)	$E_c = 21500\,(f_c/10)^{1/3}$ $f_c = f_{ck} + 8$ (MPa)

Donatı çeliğinin elastisite modülü değeri için yine farklı yönetmeliklerde 1,95-2,10 GPa aralığında değerler önerilmiştir.

Akma sonrası bölgesinin başlangıcı olan akma momenti (M_y), çatlamış kesit özelliklerinden faydalanılarak hesaplanır. Bu durumda kesitin tarafsız ekseni ($h_{te,cr}$) Denklem (5.15)'te görülen polinomun çözülmesiyle yeniden konumlandırılır (Şekil 5.2) ve Denklem (5.16) ile çatlamış kesit atalet momenti hesaplanır.



Şekil 5.2. Çatlamış kesit tarafsız ekseni

$$\frac{b}{2}\left(h_{te,cr}\right)^2 + \eta_s\ A_s\left(h_{te,cr}\right) - \eta_s\ A_s\ d = 0 \tag{5.15}$$

$$I_{cr} = \frac{b\left(h_{te,cr}\right)^3}{3} + \eta_s\ A_s\left[d - \left(h_{te,cr}\right)\right]^2 \tag{5.16}$$

Kesitin dengeli donatı oranının (betonun ezildiği anda donatının akması için gerekli donatı oranı) gereğinin altında bir donatı oranına sahipse göçme, donatının kopmasıyla gerçekleşir. Göçme momenti (M_u), çatlamış kesitin atalet momenti ve donatının kopma dayanımı (f_{sf}) yardımıyla Denklem (5.17) ile hesaplanır.

$$M_u = \frac{f_{sf}\ I_{cr}}{\eta_s\left(d - h_{te,cr}\right)} \tag{5.17}$$

Basit mesnetli numune ortasında gerçekleşen düşey deplasman (Δ), Denklem (5.18)'de görüldüğü gibi, herhangi bir yük seviyesindeki moment (M_a), numune atalet momenti (I, hangi atalet momentinin kullanılacağına yük-deplasman eğrisinin hangi bölümünde kalındığına göre karar verilir), betonun elastisite modülü (E_c), numune uzunluğu (l) ve yükün mesnete olan uzaklığı (a_s) yardımıyla hesaplanır. Efektif atalet momenti, çatlamamış ve çatlamış kesit atalet momentleri değerleri arasında bir değere sahiptir ve her yük seviyesi için hesaplanır. Denklem (5.19) ile hesaplanan efektif atalet momenti, çatlama momentine (M_{cr}) ve herhangi bir yük seviyesindeki moment değerine (M_a) bağlıdır.

$$\Delta = k\frac{M_a}{E_c I}\left(3l^2 - 4a_s{}^2\right) \tag{5.18}$$

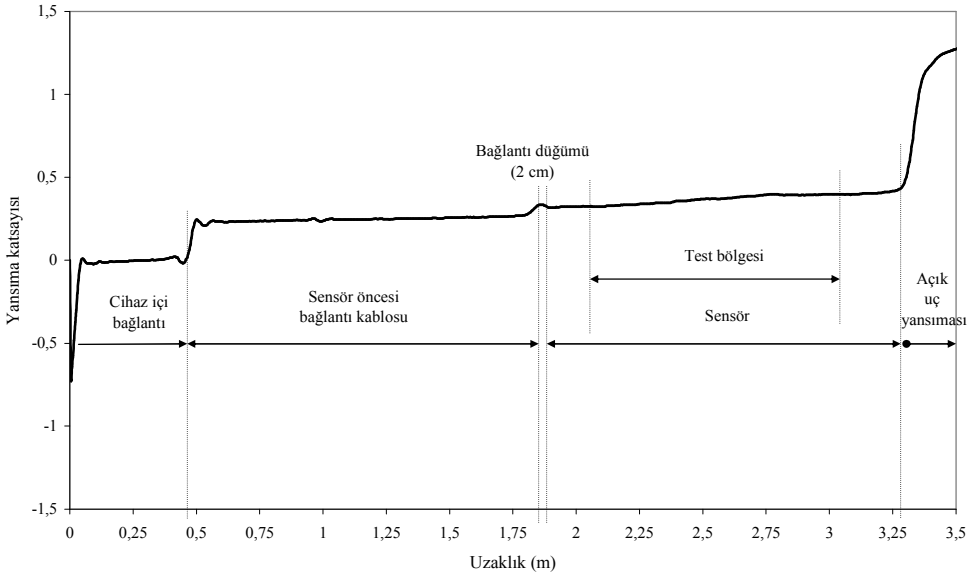
k, yükleme geometrisine ve mesnetlenme şartlarına bağlı bir katsayıdır.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \times I_{cr} \tag{5.19}$$

5.2.1. RG59/U-6 S1 M numunesi

Bu numuneye ait sonuçlar paylaşılırken, TDR yönteminin daha iyi anlaşılabilmesi için tüm ölçüm detayları paylaşılmıştır. Bu detaylar referans ölçümünün yapılması, eğilme testi sonuçlarının elde edilişi, numunenin TDR ile PCTDR yazılımı üzerinden izlenmesi, çatlak oluşumunun TDR ile görüntülenmesi, oluşan çatlakların TDR ile konumlandırılması ve çatlak genişlemesinin TDR yansımalarına etkisi olarak sıralanmıştır. Diğer numunelerde, bu numune için anlatılan ve tekrar edilen prosedürlerlere yer verilmemiştir.

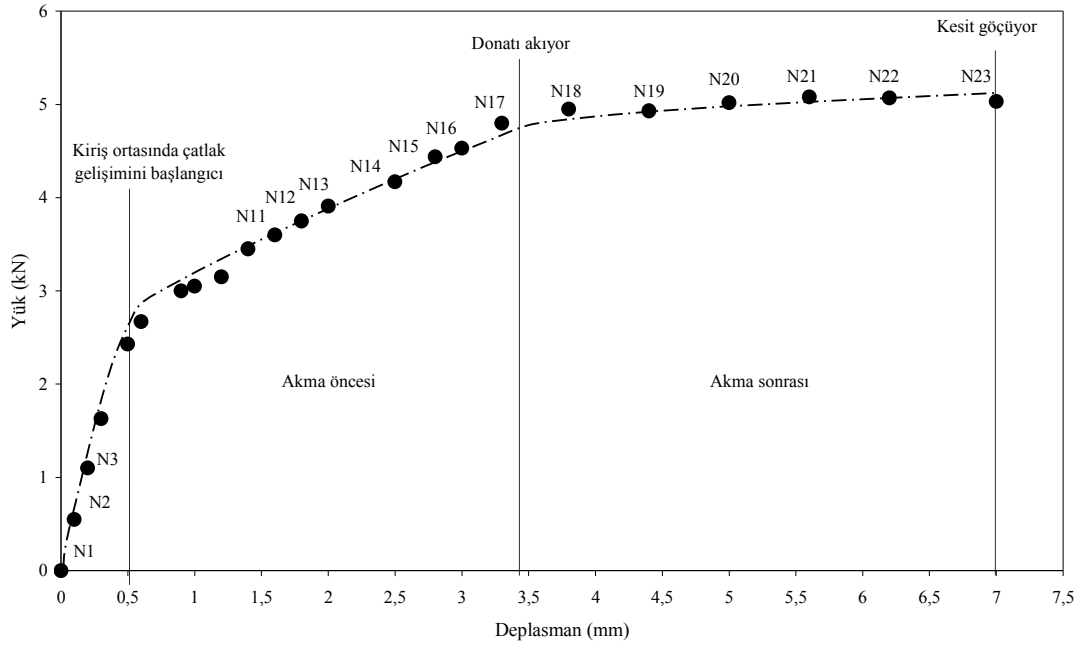
Test başlatılmadan önce sensör üzerinde yapılan ve referans olarak kullanılan TDR ölçümü üzerinde cihaz içi bağlantı, sensör öncesi bağlantı kablosu, sensör, test ve açık uç yansıması bölgeleri Şekil 5.3'te görüldüğü gibi belirlenmiştir.



Şekil 5.3. RG59/U-6 S1 M numunesi referans ölçümü

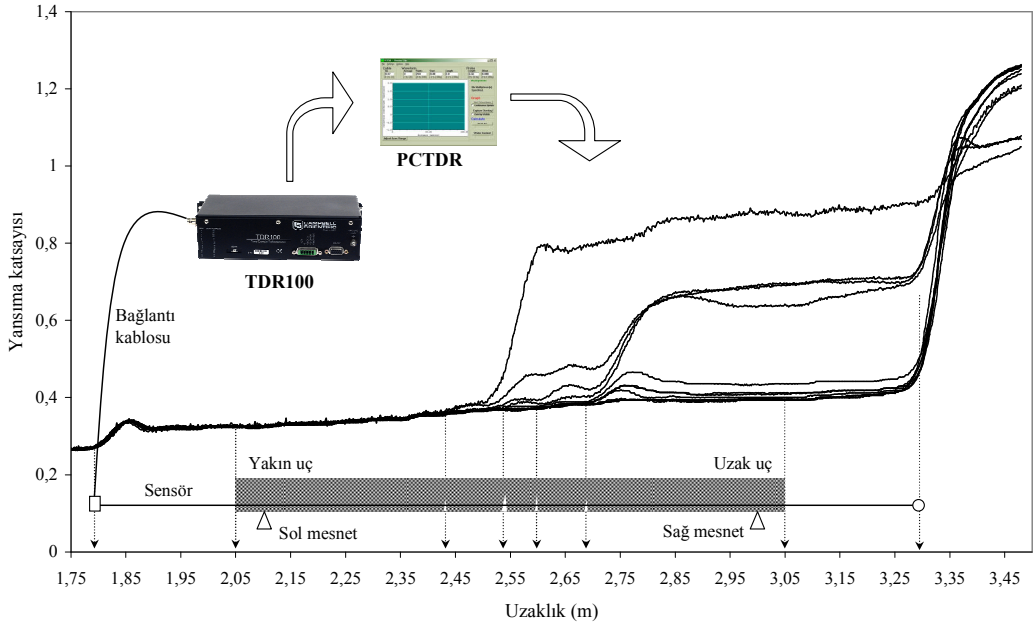
Referans ölçümünde, sensör öncesi bağlantı kablosunun uzunluğu 140 cm olup daha sonrasında sensörle bağlantı düğümü yer almaktadır. Bu düğümün, ölçüm başlangıç noktasına yani TDR cihazına uzaklığı 1,84 m'dir. Daha sonrasında sensörün numune yakın ucundan dışarı uzanan kısmı yer almaktadır. Bu kısmın uzunluğu 26 cm'dir. Bu noktadan (2,05 m) sonra numune uzunluğu olan 1 m'lik kısım test bölgesi olarak adlandırılmıştır. Test bölgesinin uzak ucunun başlangıç noktasına uzaklığı 3,05 m olup bu bölgeden sonra sensörün numune uzak ucundan dışarı çıkan 20 cm'lik kısmı boyunca sensör bölgesi devam etmektedir. Sensör bölgesinden hemen sonra açık uç yansıması ile referans ölçümü sonlanmaktadır.

Numune, dengeli donatı oranının (ρ_{bs}) altında tasarlanmış olan çekme donatısının kopmasıyla göçmüştür. Kesit davranışı monotonik yükleme şartlarında tipik bir betonarme kesitten beklendiği üzere 3 bölgeli (çatlama öncesi, akma öncesi ve akma sonrası) oluşmuştur. Numuneye ait yük-deplasman eğrisi, üzerinde TDR ölçüm noktaları (N1-N23) ve davranış bölgeleri ile Şekil 5.4'te görülmektedir. Göçme yükü yaklaşık 5 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 7 mm olmuştur.



Şekil 5.4. RG59/U-6 S1 M numunesinin yük-deplasman eğrisi

PCTDR yazılımı yardımıyla sensörden gelen verilerin değerlendirilmesi sonucunda hazırlanan grafik Şekil 5.5'te görülmektedir.

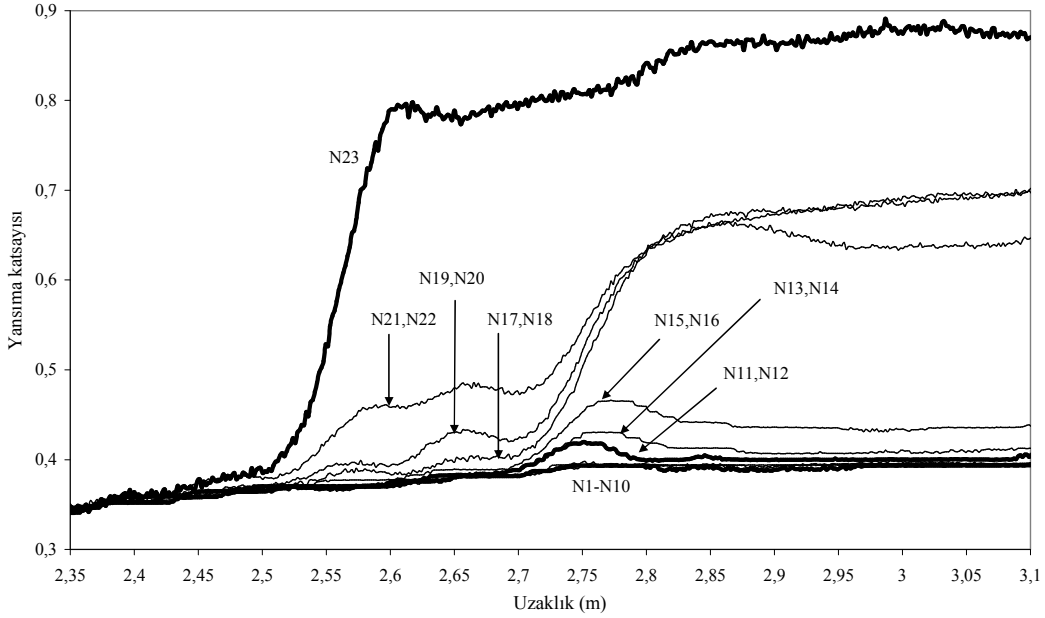


Şekil 5.5. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak gelişiminin TDR ölçümleri ile izlenmesi

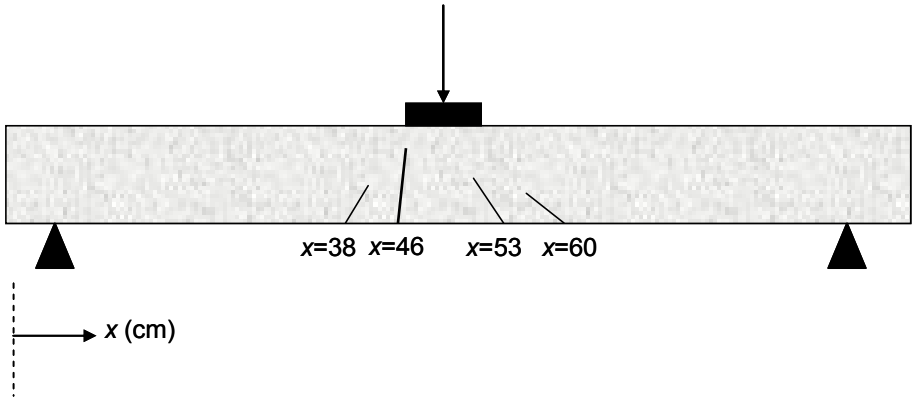
Artan yük ile birlikte sensör üzerindeki yansıma katsayısı dağılımının değişimi, numune üzerindeki hasarı işaret etmektedir. Numunede gelişen çatlaklar, eş konumlu olarak sensör üzerinde de tespit edilmiştir.

Şekil 5.6'da test boyunca gerçekleştirilen TDR ölçümlerinin, yük-deplasman eğrisi üzerinden takip edilebilmesi için yük uygulama noktasına odaklanılarak hazırlanan grafik görülmektedir. Grafik üzerindeki eğrilerin daha net görülebilmesi için hasarın ilk algılandığı nokta olan N11'den itibaren ardışık 2 ölçümün ortalaması kullanılmıştır. Benzer şekilde N1 ve N10 noktaları arasında yansıma katsayısı grafiğinde bir değişim gözlenmediği için bu aralıkta kalan TDR ölçümlerinin de ortalaması kullanılmıştır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.6 beraber değerlendirildiğinde TDR yöntemiyle ilk çatlağın yani hasarın, akma öncesi bölgesinin ortalarında tespit edildiği görülmektedir. Bu noktada kesit kapasitesinin %70'ine ulaşılmıştır ve çatlak genişliği 0,4 mm'dir. İlk çatlağın ardından artan yükle birlikte gelişen yeni çatlaklar da TDR ile belirlenebilmiştir. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 12 cm, sağında (uzak uç tarafı) 10,5 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 7,15 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,2 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.7'de numunede gerçekleşen çatlak

paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 4 adet çatlak oluşmuştur.

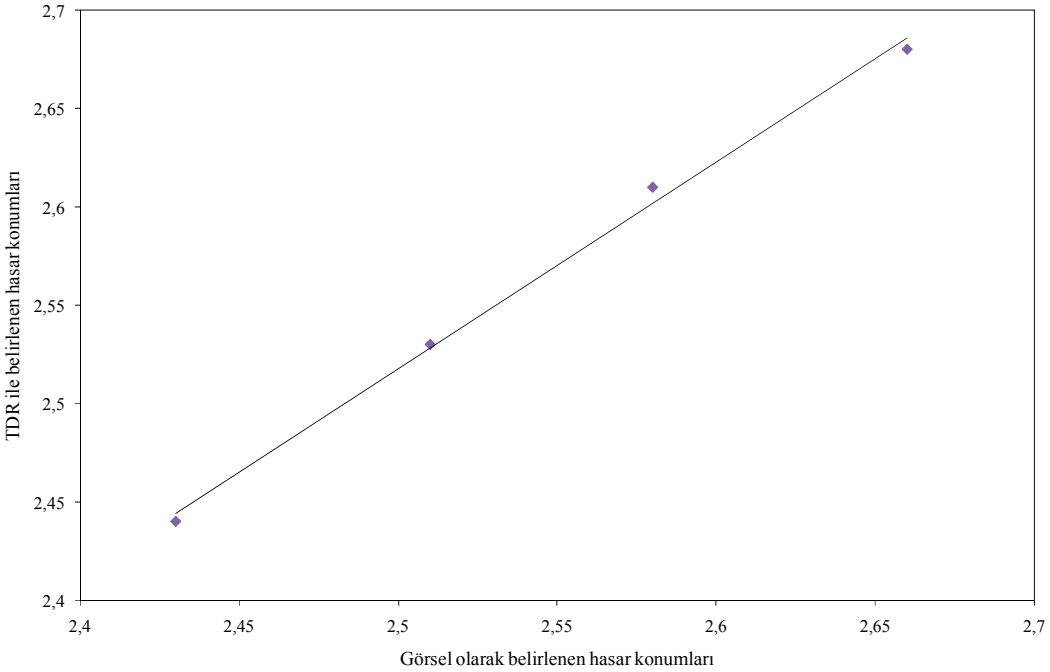


Şekil 5.6. RG59/U-6 S1 M numunesi TDR ölçümleri üzerinde yük-deplasman eğrisi noktaları



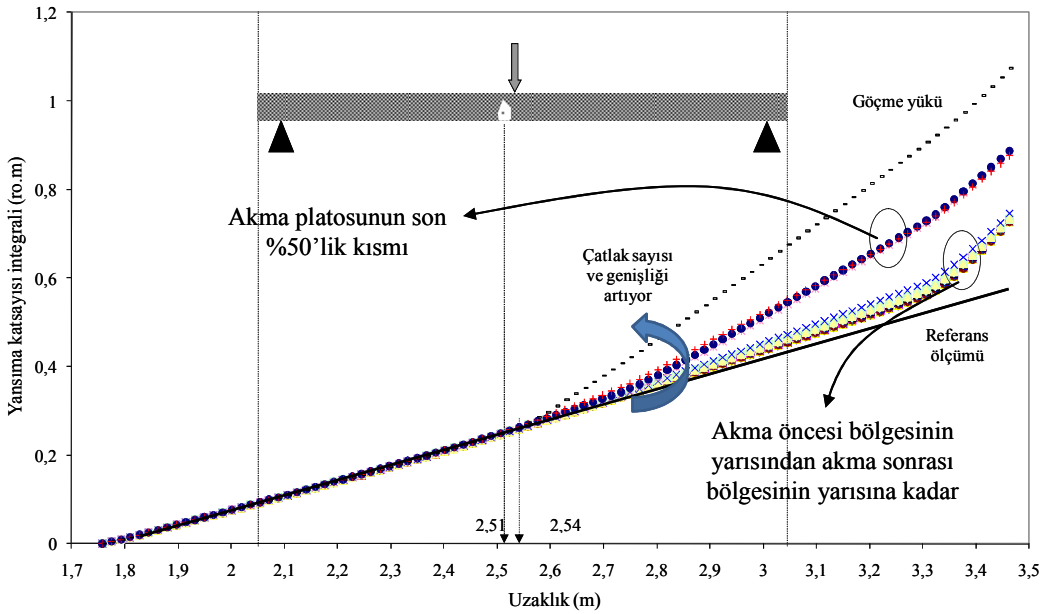
Şekil 5.7. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak paterni

TDR ölçümü ile elde edilen uzaklık-yansıma katsayısı grafiğinde yansıma katsayısının referans değerden farklılaştığı nokta hasar noktası olarak değerlendirilmiştir. TDR yöntemiyle Şekil 5.5'te görüldüğü gibi belirlenen hasar noktaları ile Şekil 5.7'de verilen gerçekleşen çatlak paterni karşılaştırıldığında hasarın en fazla 3 cm hatayla belirlenebildiği görülmüştür. Bu değer sensör toplam uzunluğunun %2'si kadardır. Şekil 5.8'de görsel inceleme ve TDR yöntemiyle belirlenen hasar noktalarının konumları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.8. RG59/U-6 S1 M numunesi çatlak paterni

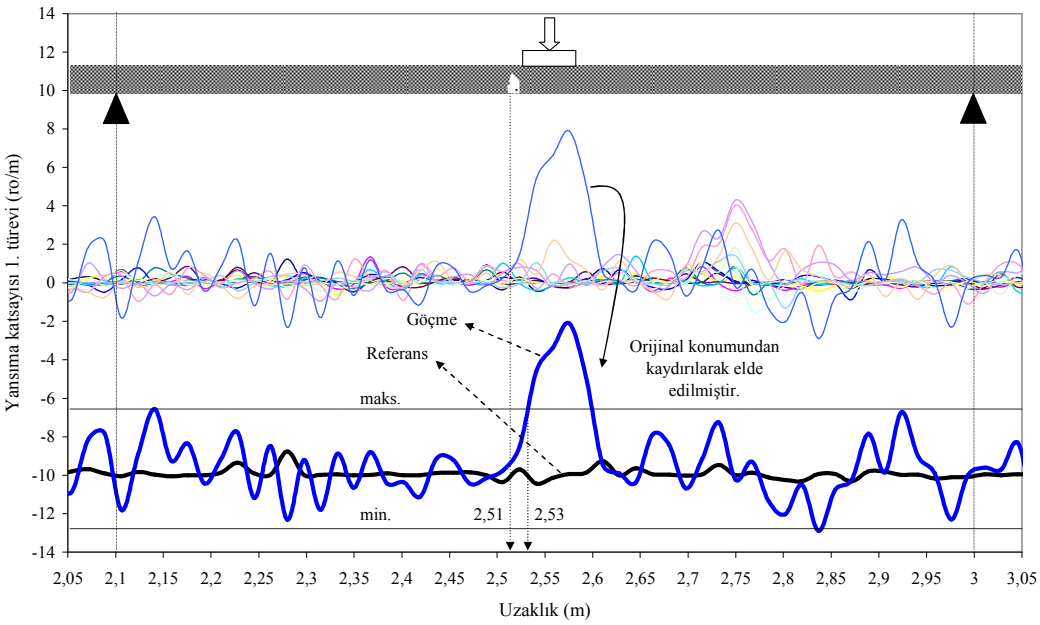
Hasarın, TDR ölçümüne nasıl yansıdığını daha iyi anlayabilmek için yansıma katsayısının numune boyunca integralini almak yoluna da gidilmiştir. Şekil 5.9'da görülebileceği üzere her çatlak integral değerinde bir sapma meydana getirmiştir.



Şekil 5.9. İntegral alma yöntemiyle TDR ölçümünün değerlendirilmesi

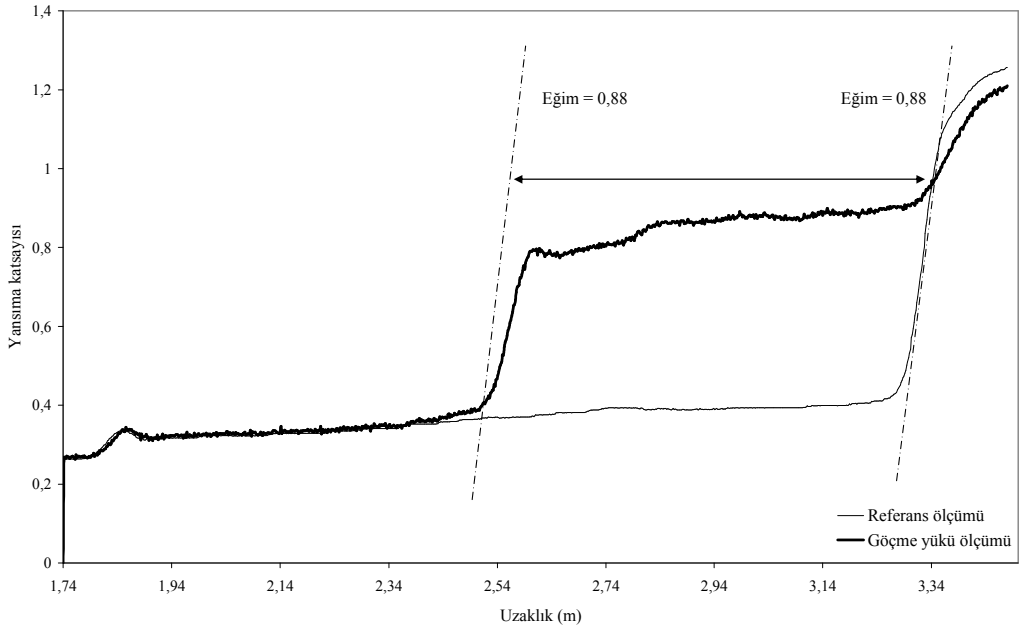
İntegral değerinin referans ölçümünden hangi açıyla saptığı hasarın boyutunu işaret edebilir. Şekil 5.9'da göçme yükünde ve referans ölçümünde yapılan TDR ölçümlerinin integral eğrileri arasında kalan iki grup eğriden üstte kalan grup akma sonrası bölgesinin ortasından göçmeye kadar olan kısmı, aşağıda kalan grup ise akma öncesi bölgesinin yarısından akma sonrası bölgesinin yarısına kadar olan kısmı temsil etmektedir.

Yansıma-uzaklık eğrisinin türevi de hasarın konumunu belirlemek için kullanılmıştır. Şekil 5.10'un üst kısmında tüm ölçümlerin türevleri görülürken alt kısma göçme yüküne ve referans ölçümüne ait yansıma katsayılarının uzaklığa göre türevleri yerleştirilmiştir. Göçme yükü yansıma katsayısı türevinin en büyük ve en küçük değerleriyle sınırlandırılan bir bant oluşturulmuştur. Türevin bu bandı aştığı nokta hasar noktası olarak tayin edilmiştir. Bu şekilde hasar 2 cm hatayla konumlandırılmıştır.



Şekil 5.10. Türev alma yöntemiyle TDR ölçümünün değerlendirilmesi

Numunenin göçme yükünde kaydedilen yansıma katsayısı-uzaklık grafiğinde görülen yükselmenin, numunenin referans ölçümündeki açık uç sonlanmasından kaynaklanan yansımaya çok benzediği dikkat çekmiştir. Şekil 5.11'de söz konusu durum gösterilmiştir.



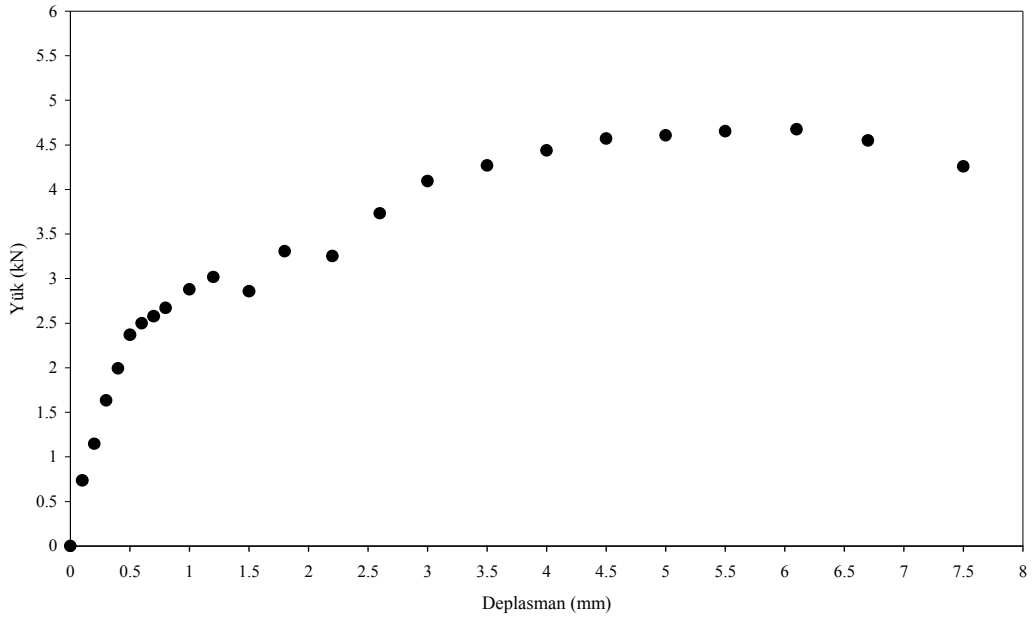
Şekil 5.11. Göçme yükü ve referans ölçümü yansıma eğimleri

Bu sebeple göçmenin oluşup oluşmadığına karar verebilmek için yansıma eğiminin esas alınması doğru olacaktır.

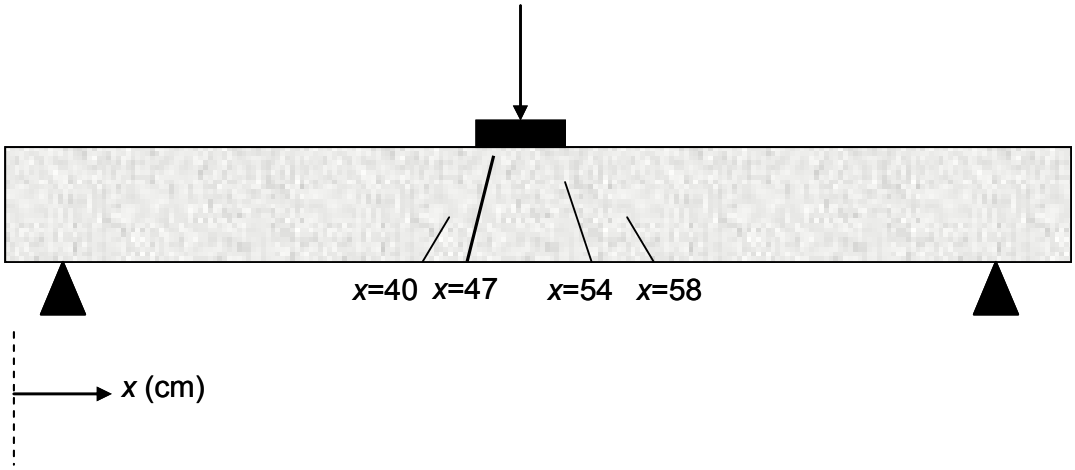
5.2.2. RG6/U-4 S1 M numunesi

RG6/U-4 S1 M numunesi 1 adet modifiye edilmiş RG6/U-4 tipi kablo sensörle izlenmiştir. Numune test çerçevesine yerleştirildikten sonra yapılan referans ölçümüyle birlikte gerekli hazırlıklar tamamlanıp, yükleme aşamasına geçilmiştir. Numune yüklemesinden elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.12'de görülmektedir.

Göçme yükü yaklaşık 4,6 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 7,5 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 10 cm, sağında (uzak uç tarafı) 8 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 6 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,4 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.13'te numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 4 adet çatlak oluşmuştur.



Şekil 5.12. RG6/U-4 S1 M numunesi yük deplasman eğrisi

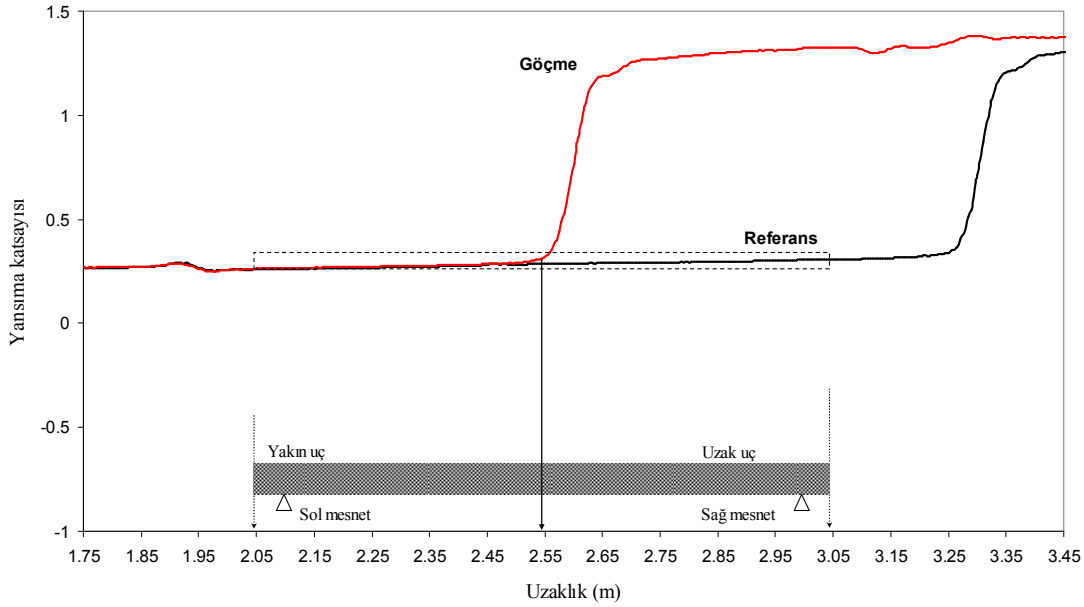


Şekil 5.13. RG6/U-4 S1 M numunesi çatlak paterni

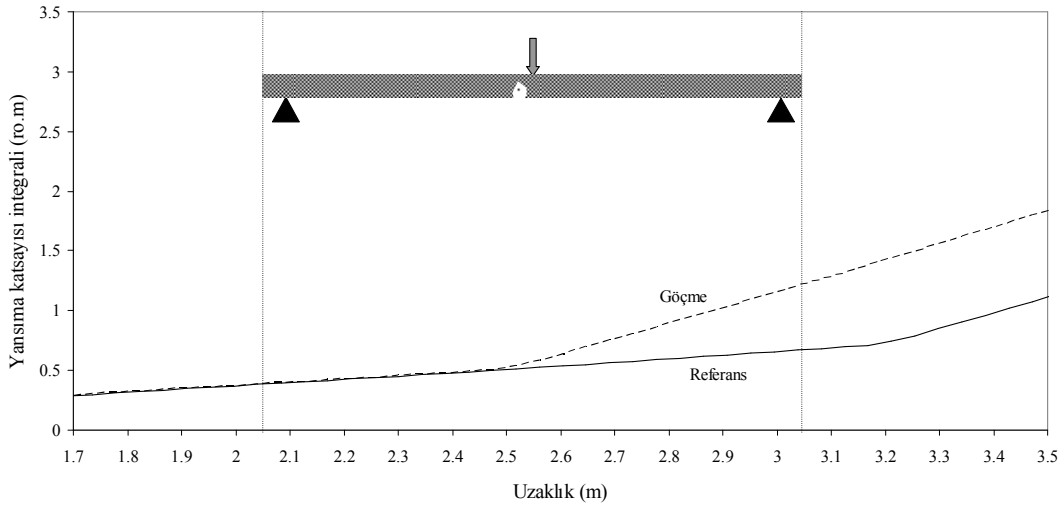
Numunede oluşan söz konusu çatlakların gelişimi modifiye edilmiş olan bu sensör tipiyle tespit edilememiştir. Şekil 5.12'de görülen ölçüm noktalarında elde edilen TDR yansıma katsayısı değişimi incelendiğinde ancak göçme yüküne ulaşıldığında önemli bir yansıma gözlemlenmiştir. Bu yansıma da açık uç yansımasına yakın eğimli olup, kesitin tamamen göçtüğünü göstermektedir (Şekil 5.14).

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alınmış ve referans integral eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.15). İntegral eğrisinin çatlak noktasında referans eğriden saptığı rahatlıkla görülmektedir.

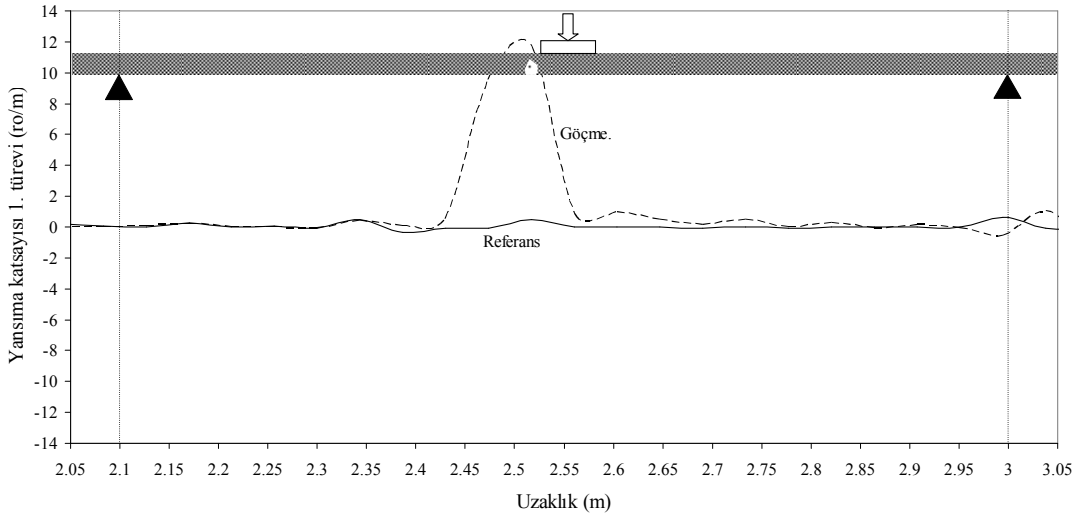
Yansıma katsayısının numune boyunca türevi alındığında ise çatlak noktasında referans türev eğrisine göre bir sıçrama gözlemlenmiştir (Şekil 5.16). Çatlağın fiziksel konumu ile TDR ile elde edilen konumu arasında yaklaşık 1,5 cm farklılık oluşmuştur.



Şekil 5.14. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti



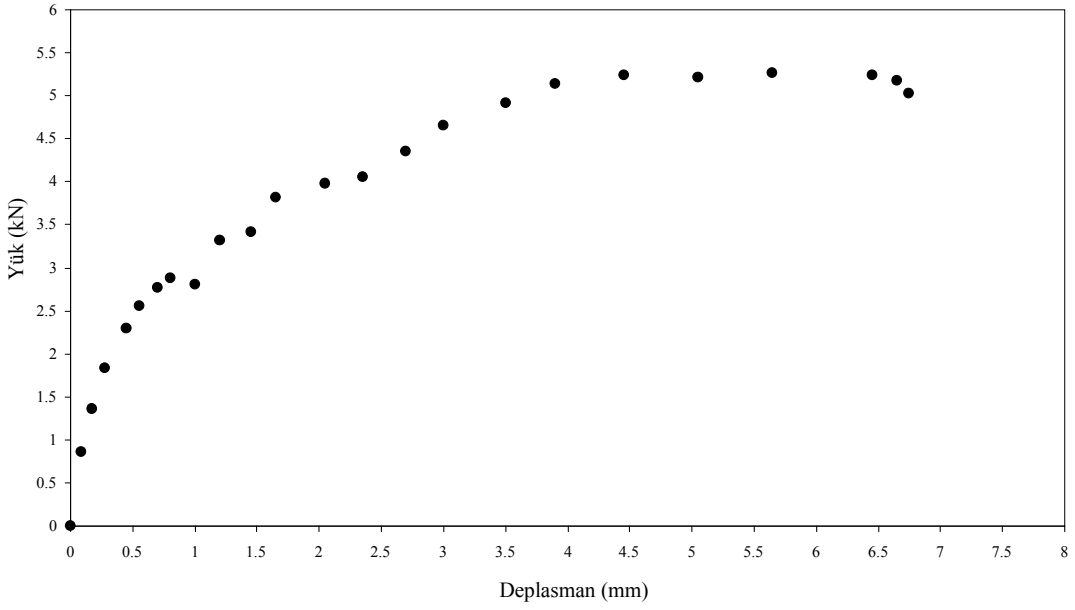
Şekil 5.15. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi



Şekil 5.16. RG6/U-4 S1 M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

5.2.3. RG59/U-6 S1 N numunesi

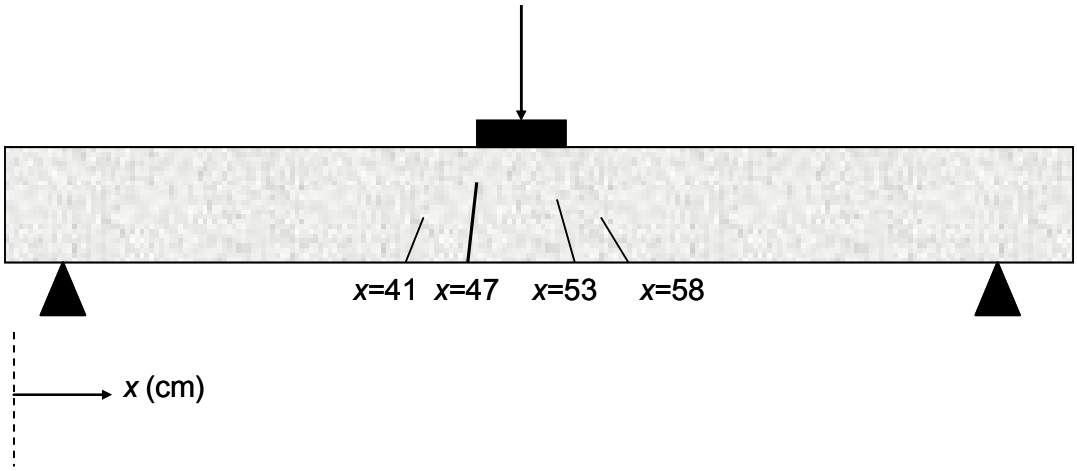
RG59/U-6 S1 N numunesi 1 adet modifiye edilmemiş RG59/U-6 tipi kablo sensörle izlenmiştir. Numune test çerçevesine yerleştirildikten sonra yapılan referans ölçümüyle birlikte gerekli hazırlıklar tamamlanıp, yükleme aşamasına geçilmiştir. RG59/U-6 S1 N numunesinde elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.17. RG59/U-6 S1 N numunesi yük deplasman eğrisi

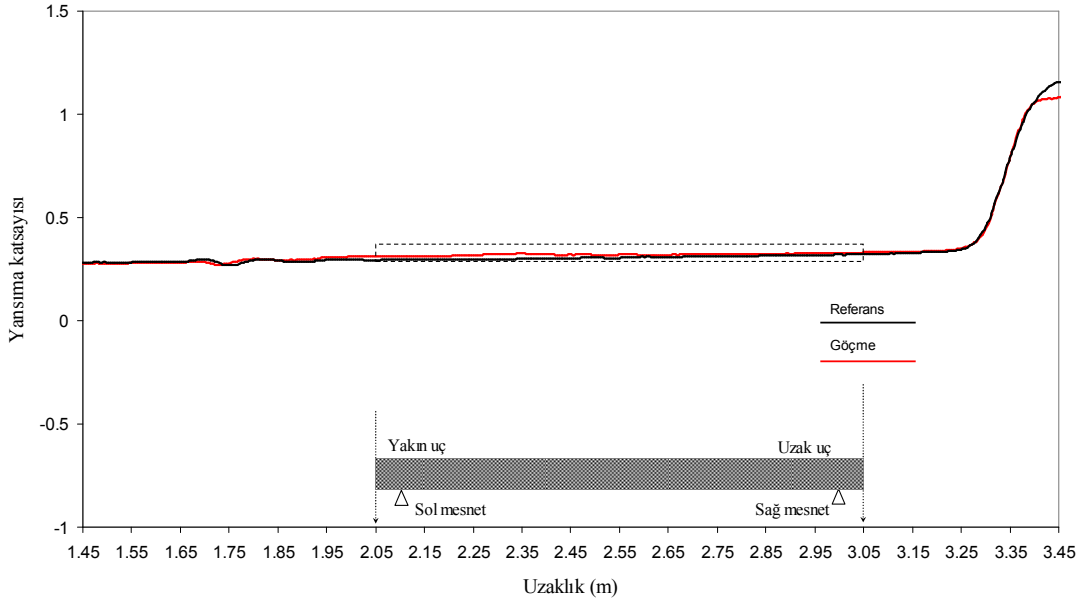
Göçme yükü yaklaşık 5,0 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 6,7 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 9 cm, sağında (uzak uç tarafı) 8 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 6 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,3 mm olarak ölçülmüştür.

Şekil 5.18'de numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 4 adet çatlak oluşmuştur.



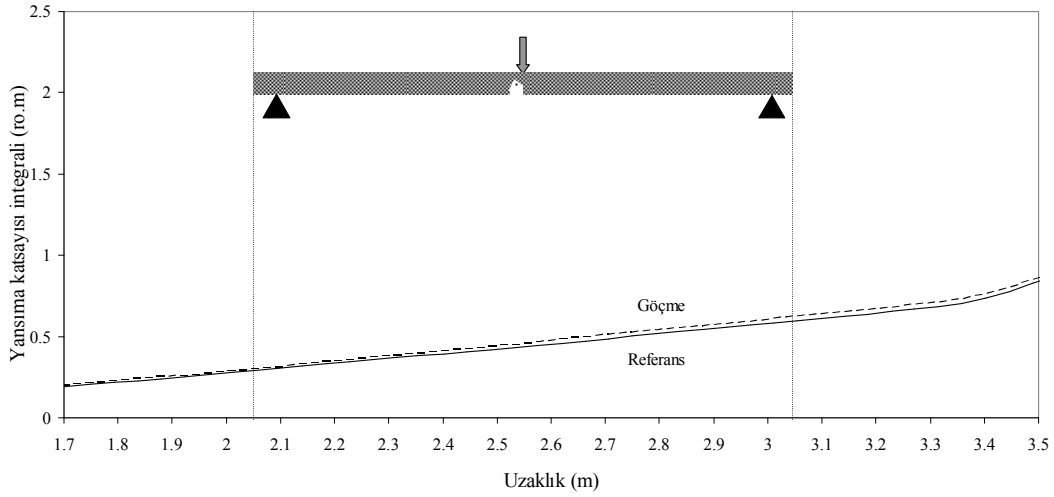
Şekil 5.18. RG59/U-6 S1 N numunesi çatlak paterni

Numunede oluşan söz konusu çatlakların gelişimi, modifiye edilmemiş olan bu sensör tipiyle tespit edilememiştir. Şekil 5.17'de görülen ölçüm noktalarında elde edilen TDR ölçümlerindeki yansıma katsayısı değişimi incelendiğinde ancak göçme yüküne ulaşıldığında küçük boyutlu ve numune boyunca yayılmış bir yansıma gözlemlenmiştir. Bu yansıma da kesitin durumu hakkında net bilgi sağlamamıştır (Şekil 5.19).

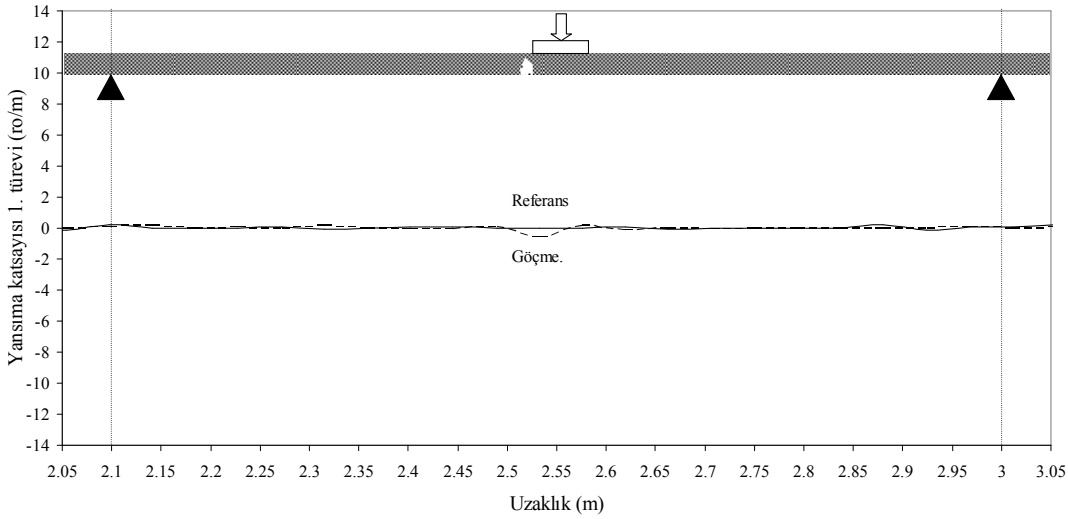


Şekil 5.19. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin TDR ile tespiti

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alınmış ve referans integral eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.20). İntegral eğrisinin tüm numune boyunca referans eğriden saptığı rahatlıkla görülmektedir. Fakat bu sapmanın boyutu ve dağılımı çatlağın konumunu belirlememek için yeterli olamamıştır. Yansıma katsayısının numune boyunca türevi alındığında ise çatlak noktasında referans türev eğrisine göre bir sıçrama gözlemlenmiştir (Şekil 5.21). Çatlağın fiziksel konumu ile TDR ile elde edilen konumu arasında yaklaşık 1,0 cm farklılık oluşmuştur.



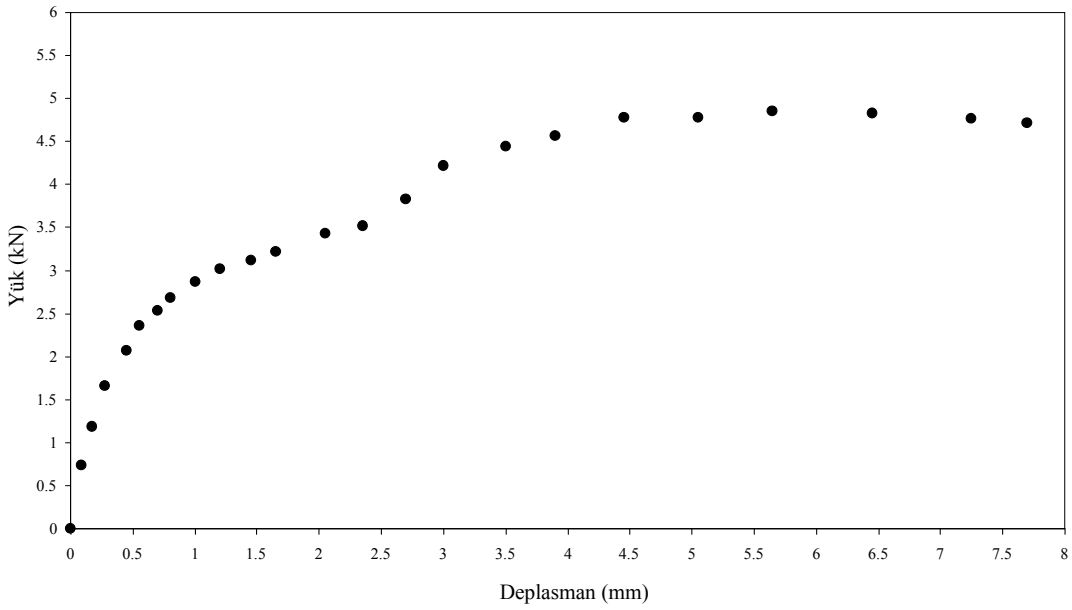
Şekil 5.20. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi



Şekil 5.21. RG59/U-6 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

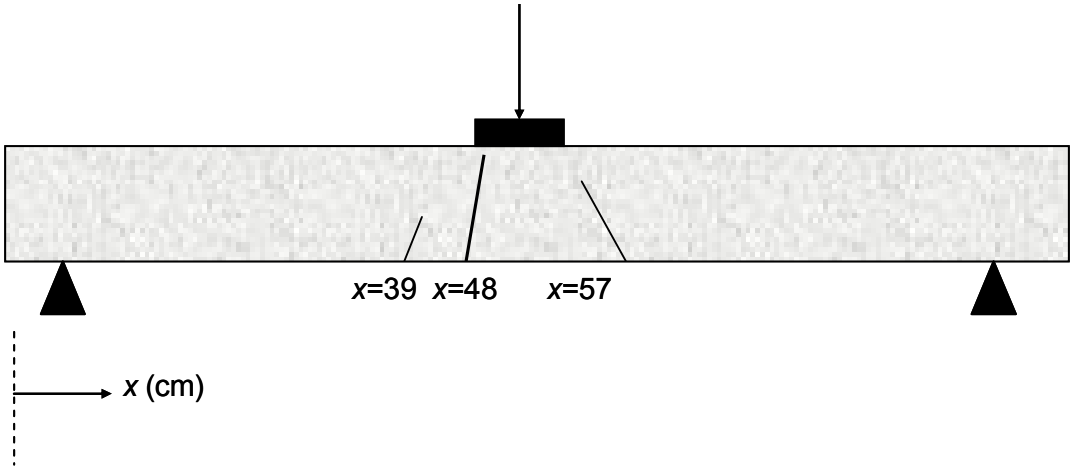
5.2.4. RG6/U-4 S1 N numunesi

RG6/U-4 S1 N numunesi 1 adet modifiye edilmemiş RG6/U-4 tipi kablo sensörle izlenmiştir. Numune test çerçevesine yerleştirildikten sonra yapılan referans ölçümüyle birlikte gerekli hazırlıklar tamamlanıp, yükleme aşamasına geçilmiştir. RG6/U-4 S1 N numunesinde elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.22'de görülmektedir.



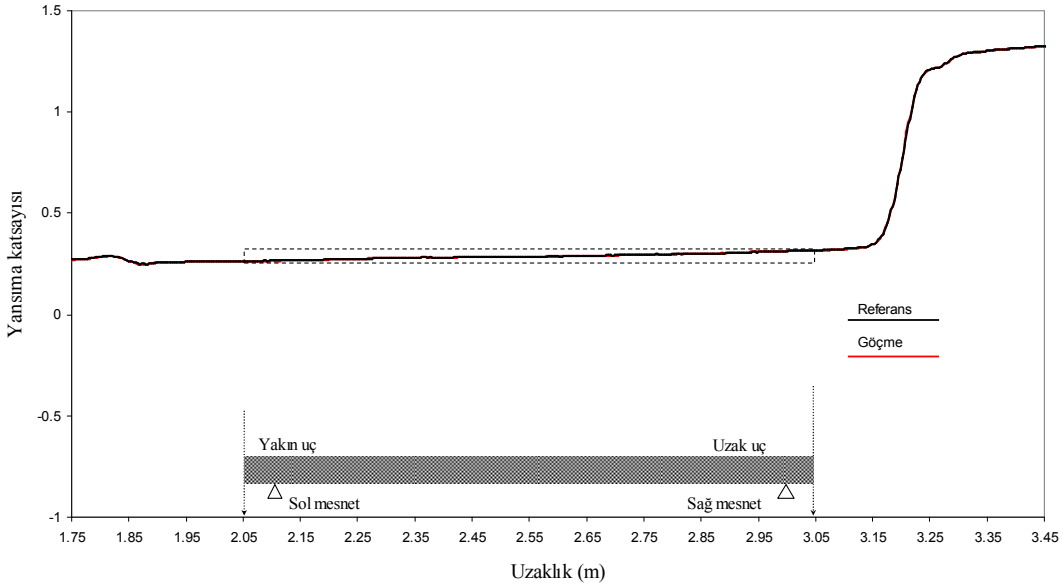
Şekil 5.22. RG6/U-4 S1 N numunesi yük deplasman eğrisi

Göçme yükü yaklaşık 4,7 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 7,7 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 11 cm, sağında (uzak uç tarafı) 7 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 9 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,5 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.23'te numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 3 adet çatlak oluşmuştur.



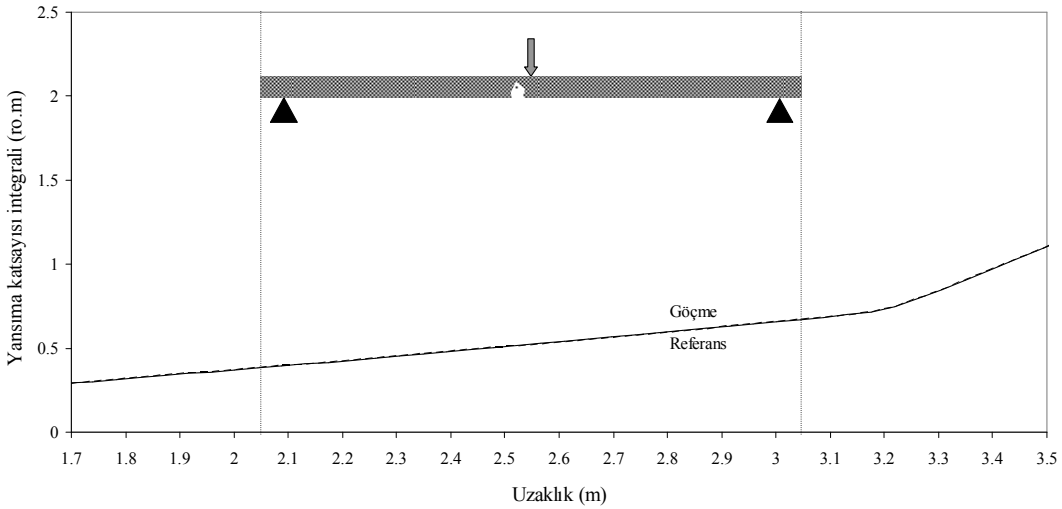
Şekil 5.23. RG6/U-4 S1 N numunesi çatlak paterni

Numunede oluşan söz konusu çatlakların gelişimi modifiye edilmemiş olan bu sensör tipiyle tespit edilememiştir. Şekil 5.22'de görülen ölçüm noktalarında elde edilen TDR yansıma katsayısı değişimi incelendiğinde göçme yüküne ulaşıldığında bile bir yansıma gözlemlenmemiştir (Şekil 5.24).

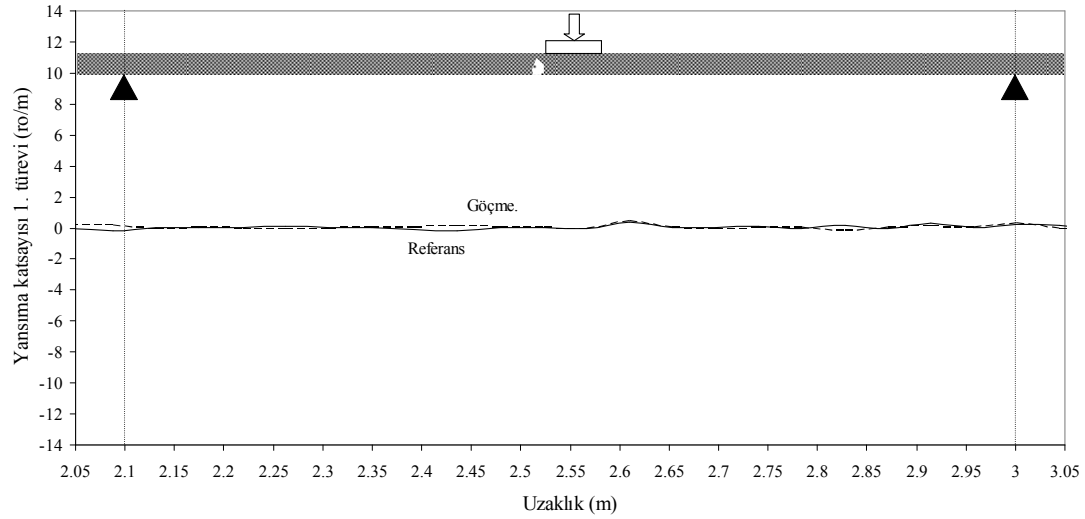


Şekil 5.24. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin TDR ile tespiti

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alınmış ve referans integral ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.25). İntegral eğrisinin numune boyunca referans eğriden sapmadığı görülmektedir. Bu durum çatlağın tespit edilemediği anlamını taşır. Benzer şekilde yansıma katsayısının numune boyunca türevi alındığında da numune boyunca referans türev eğrisine göre herhangi bir farklılık gözlemlenmemiştir (Şekil 5.26).



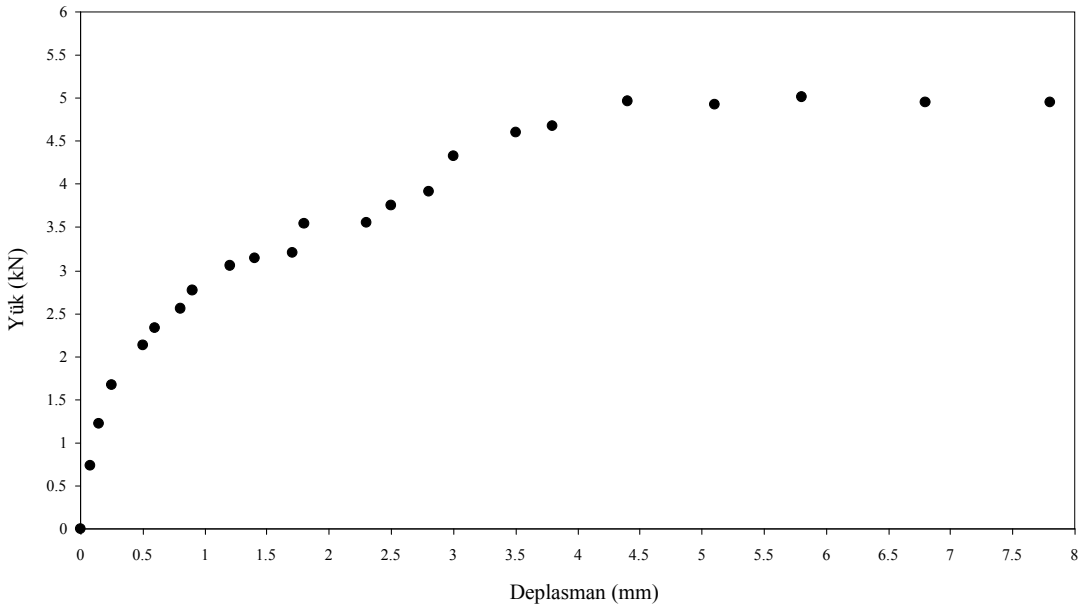
Şekil 5.25. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi



Şekil 5.26. RG6/U-4 S1 N numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

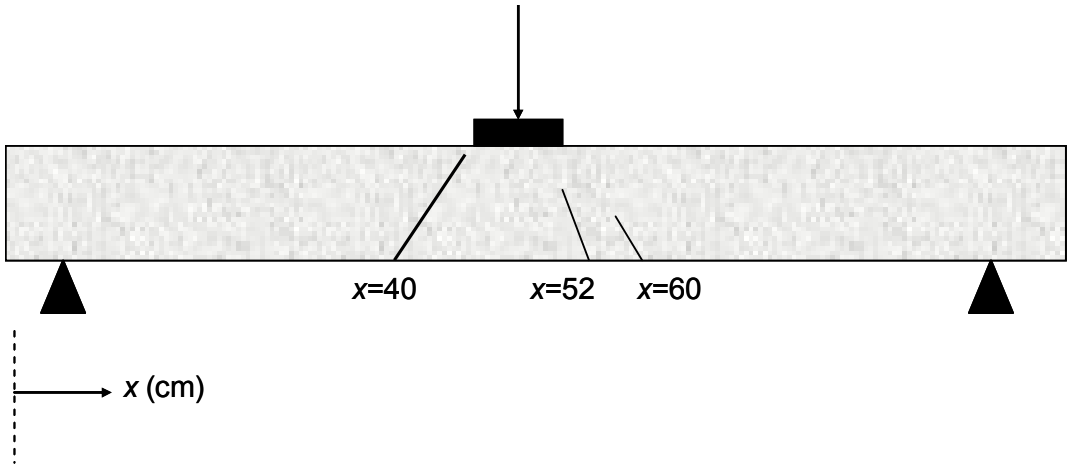
5.2.5. RG59/U-6 S2 N-M numunesi

RG59/U-6 S2 N-M numunesi, 2 adet RG59/U-6 tipi kablo sensörle izlenmiştir. Bu sensörlerden birisi modifiye edilmemiş (N) diğeri ise modifiye edilmiş (M) sensördür. Numune test çerçevesine yerleştirildikten sonra yapılan referans ölçümüyle birlikte gerekli hazırlıklar tamamlanıp, yükleme aşamasına geçilmiştir.



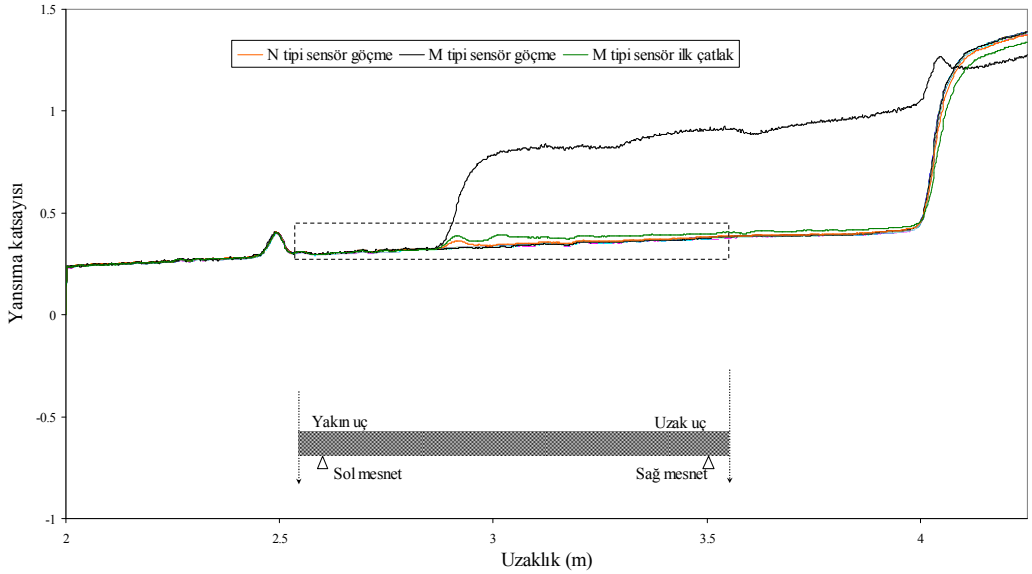
Şekil 5.27. RG59/U-6 S2 N-M numunesi yük deplasman eğrisi

RG59/U-6 S2 N-M numunesinde elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.27'de görülmektedir. Göçme yükü yaklaşık 4,9 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 7,8 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 10 cm, sağında (uzak uç tarafı) 10 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 10 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,6 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.28'te numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 3 adet çatlak oluşmuştur.



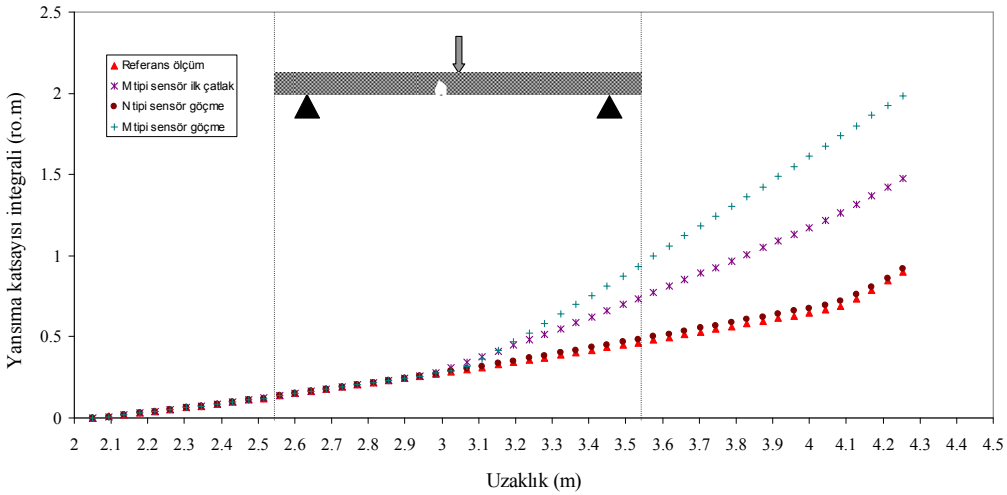
Şekil 5.28. RG59/U-6 S2 N-M numunesi çatlak paterni

Bu numune daha önceki 4 numuneden farklı olarak aynı kesitte aynı sensör kablonun modifiye olanı ve olmayananı beraber içeren çift sensörlü bir numunedir. Şekil 5.27'de görülen ölçüm noktalarında elde edilen TDR yansımaları incelendiğinde, modifiye sensörün ilk çatlamayı ve göçme anını tespit edebildiği, fakat modifiye olmayan sensörün yalnızca göçme anında sınırlı bir yansıma yakalayabildiği görülmüştür (Şekil 5.29).



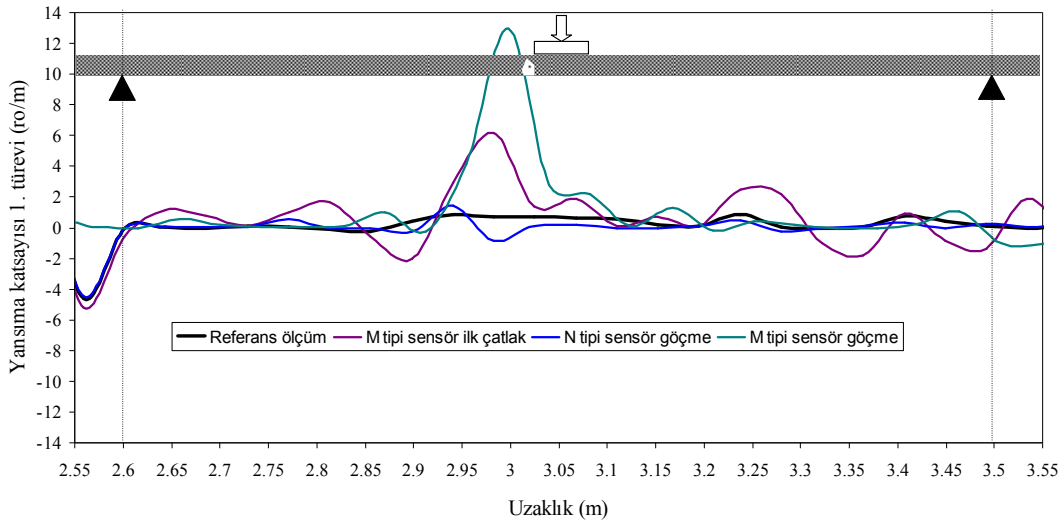
Şekil 5.29. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alınmış ve referans integral eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.30). Modifiye sensör için integral eğrisinin ilk çatlama ile referans eğriden saptığı ve göçmede bu sapma değerinin arttığı görülmektedir. Modifiye olmayan sensörde ise göçme anı da dahil referans integral eğrisinden önemli bir sapma oluşmamıştır.



Şekil 5.30. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi

Benzer şekilde yansıma katsayısının numune boyunca türevi alındığında modifiye sensörde hem ilk çatlama anında hem de göçme anında çatlak noktasında referans türev eğrisine göre farklı boyutlarda sıçramalar gözlemlenmiştir. Modifiye olmayan sensörde ise yalnızca göçme anında türevde bir sıçrama görülebilmiştir (Şekil 5.31).

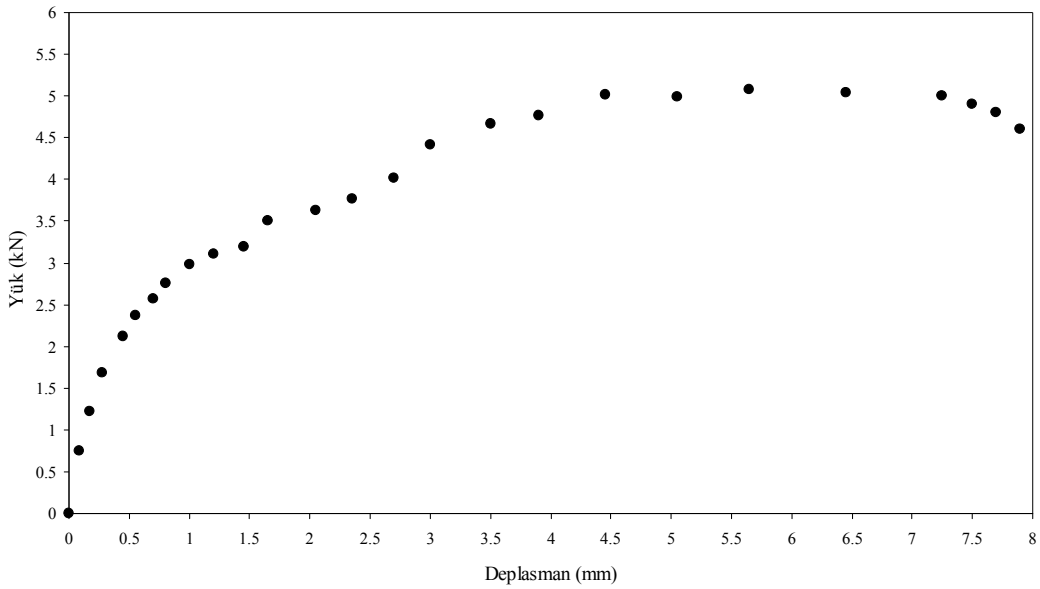


Şekil 5.31. RG59/U-6 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

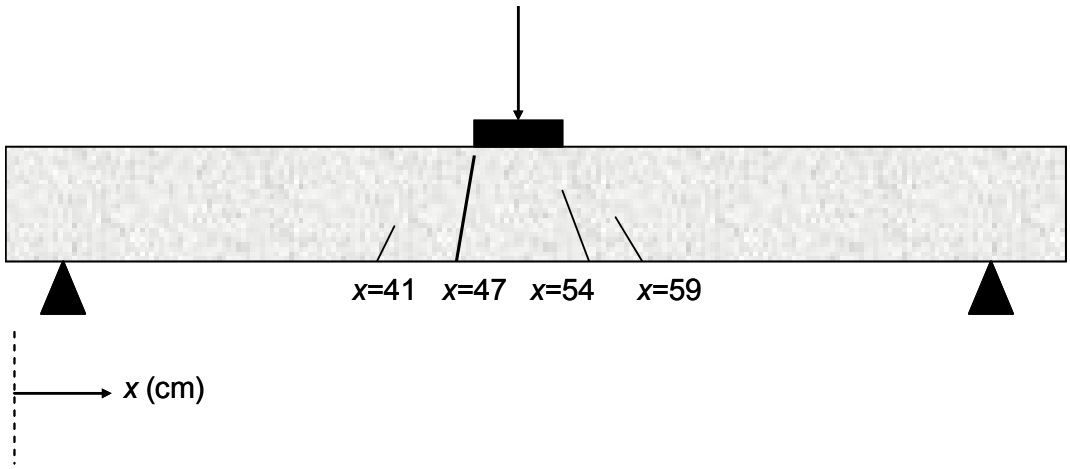
5.2.6. RG6/U-4 S2 N-M numunesi

RG6/U-4 S2 N-M numunesi, 2 adet RG6/U-4 tipi kablo sensörle izlenmiştir. Bu sensörlerden birisi modifiye edilmemiş (N) diğeri ise modifiye edilmiş (M) sensördür. Numune test çerçevesine yerleştirildikten sonra yapılan referans ölçümüyle birlikte gerekli hazırlıklar tamamlanıp, yükleme aşamasına geçilmiştir.

RG6/U-4 S2 N-M numunesinde elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.32'de görülmektedir. Göçme yükü yaklaşık 4,6 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 7,9 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 9 cm, sağında (uzak uç tarafı) 9 cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 6 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,7 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.33'te numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 4 adet çatlak oluşmuştur.

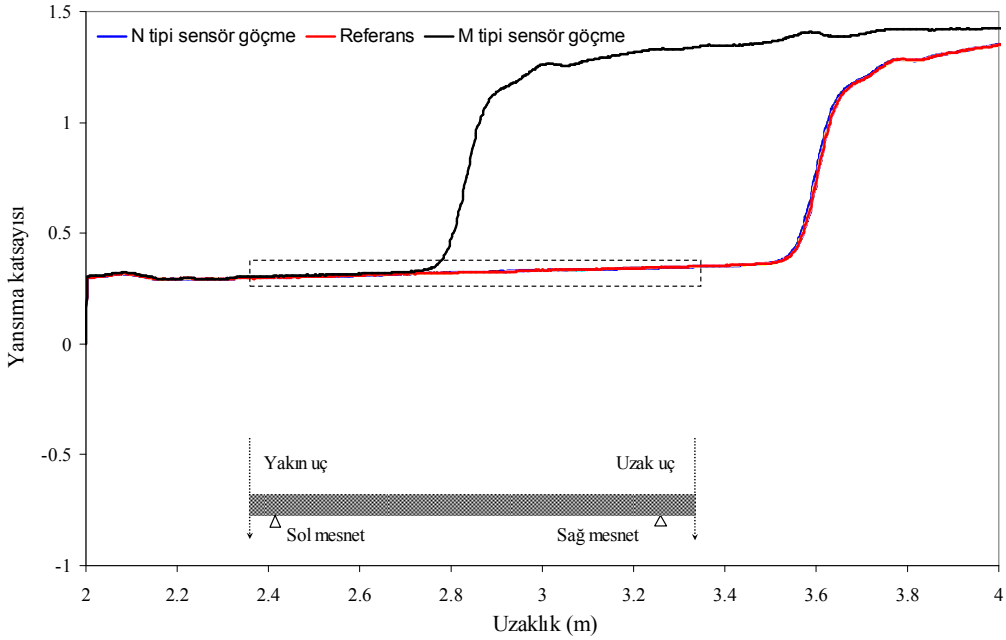


Şekil 5.32. RG6/U-4 S2 N-M numunesi yük deplasman eğrisi



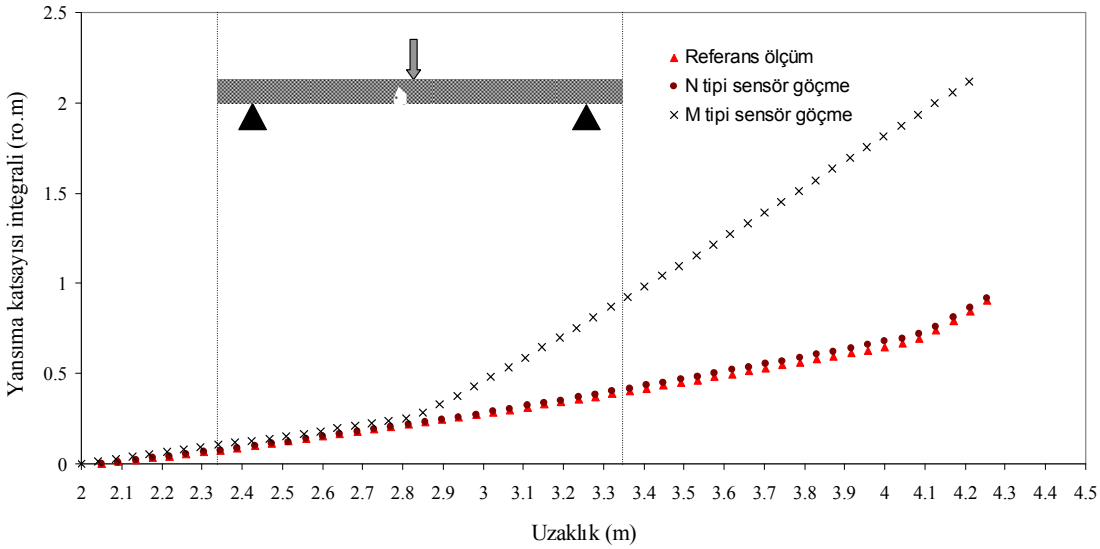
Şekil 5.33. RG6/U-4 S2 N-M numunesi çatlak paterni

Numunede oluşan söz konusu çatlakların gelişimi modifiye edilmiş sensör tipiyle tespit edilememiştir. Şekil 5.32'de görülen ölçüm noktalarında elde edilen TDR yansıma katsayısı değişimi incelendiğinde ancak göçme yüküne ulaşıldığında önemli bir yansıma gözlemlenmiştir. Bu yansıma da açık uç yansımasına yakın eğimli olup, kesitin tamamen göçtüğünü göstermektedir. Modifiye edilmemiş sensörle ise göçme anında bile bir yansıma tespit edilememiştir (Şekil 5.34).

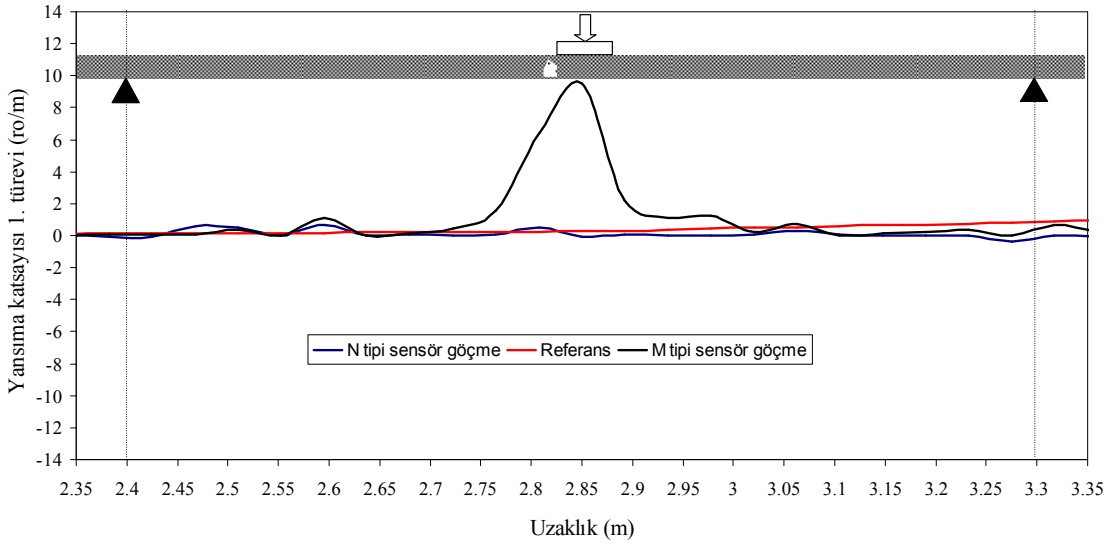


Şekil 5.34. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alınmış ve referans integral eğrisi ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.35). Modifiye edilmiş sensörle integral eğrisinin çatlak noktasında referans eğriden saptığı rahatlıkla görülmektedir. Modifiye edilmemiş sensörden alınan yansımalar incelendiğinde integral eğrisinde göçme anı da dahil herhangi bir sapma görülmemiştir. Modifiye edilmiş sensörden alınan yansımalar incelendiğinde, yansıma katsayısının numune boyunca türevi alındığında çatlak noktasında referans türev eğrisine göre bir sıçrama gözlemlenmiştir (Şekil 5.36). Çatlağın fiziksel konumu ile TDR ile elde edilen konumu arasında yaklaşık 1,0 cm farklılık oluşmuştur. Modifiye edilmemiş sensörde ise göçme anı dahil türevde bir sıçrama oluşmamıştır.



Şekil 5.35. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi

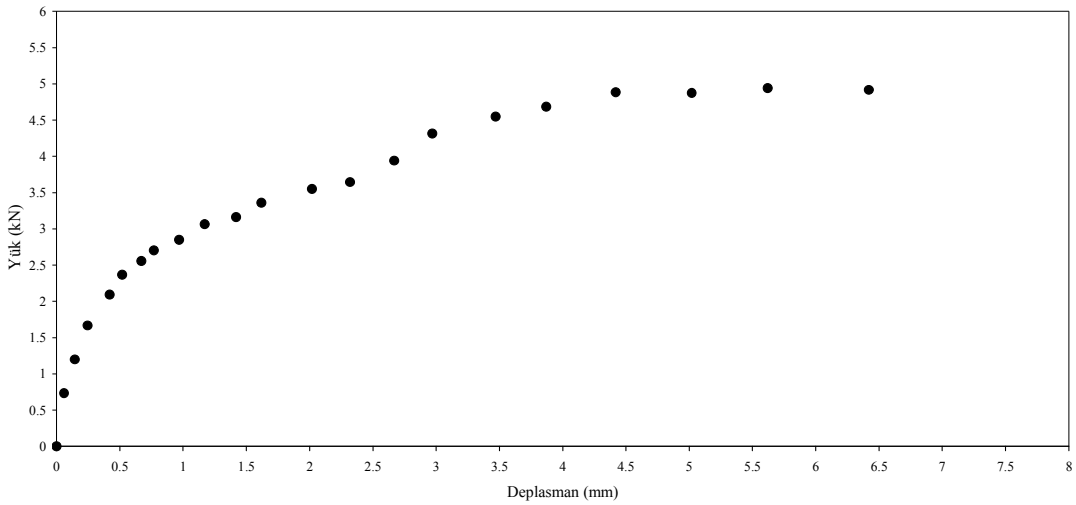


Şekil 5.36. RG6/U-4 S2 N-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

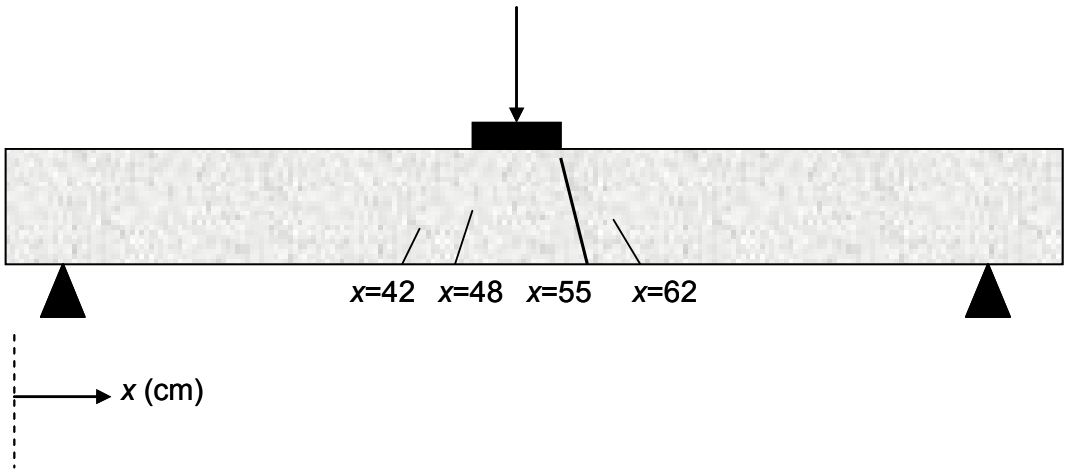
5.2.7. RG S2 M-M numunesi

RG S2 M-M numunesi modifiye edilmiş iki farklı tip sensörü (RG59/U-6 ve RG6/U-4) karşılaştırmak amacıyla üretilmiş ve test edilmiştir. RG S2 M-M numunesinde elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 5.37'de görülmektedir. Göçme yükü yaklaşık 4,9 kN ve göçmeden önce ölçülen en büyük düşey deplasman 6,4 mm olmuştur. Numunede eğilme testi boyunca oluşan çatlaklar beklendiği üzere çekme yüzünde ve yük uygulama noktasının solunda (yakın uç tarafı) 8 cm, sağında (uzak uç tarafı) 12

cm boyunca dağılmıştır. Çatlaklar arası ortalama mesafe yaklaşık 7 cm olmuştur. Göçmeye kadar oluşan en büyük çatlak genişliği 1,2 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.38'de numunede gerçekleşen çatlak paterni görülmektedir. Göçme anına ulaşılana kadar numune üzerinde gözle görülebilen 4 adet çatlak oluşmuştur.

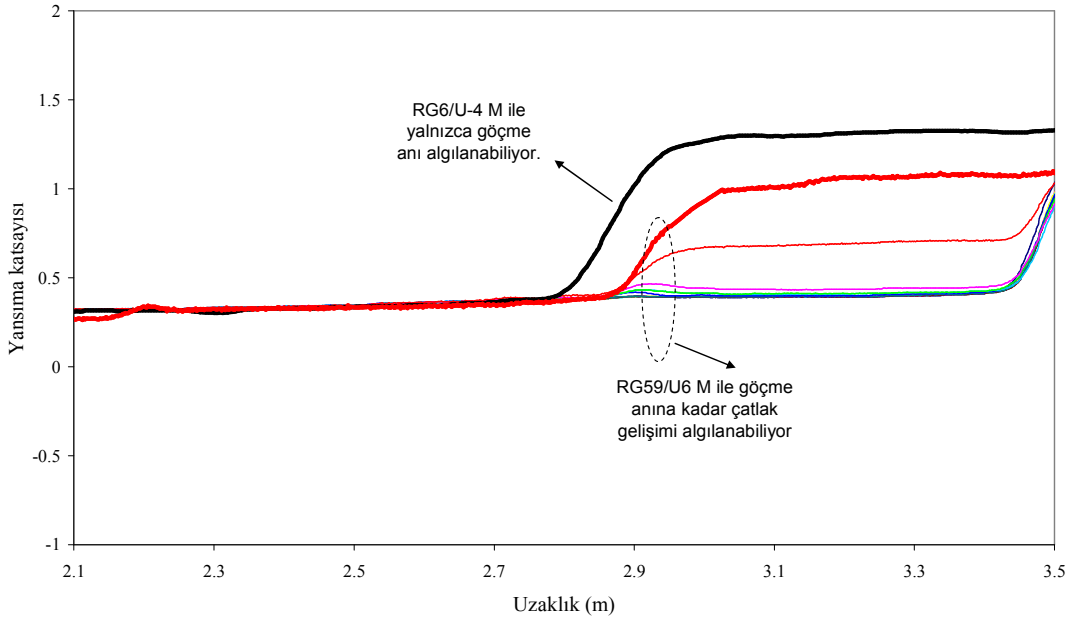


Şekil 5.37. RG S2 M-M numunesi yük deplasman eğrisi



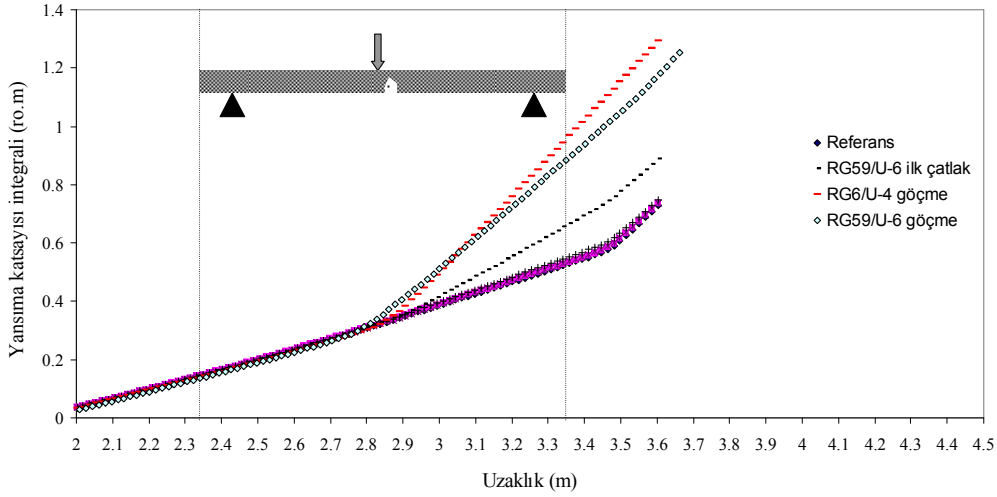
Şekil 5.38. RG S2 M-M numunesi çatlak paterni

Şekil 5.39'da RG S2 M-M numunesinde Şekil 5.37'de görülen ölçüm noktalarından elde edilen bazı yansımalar görülmektedir. Şekil 5.39'dan görülebileceği üzere, RG59/U-6 sensörle göçme anına kadar çatlağın genişlemesi izlenebilmektedir. Fakat RG6/U-4 sensörden yalnızca göçme anında bir yansıma elde edilmiştir.

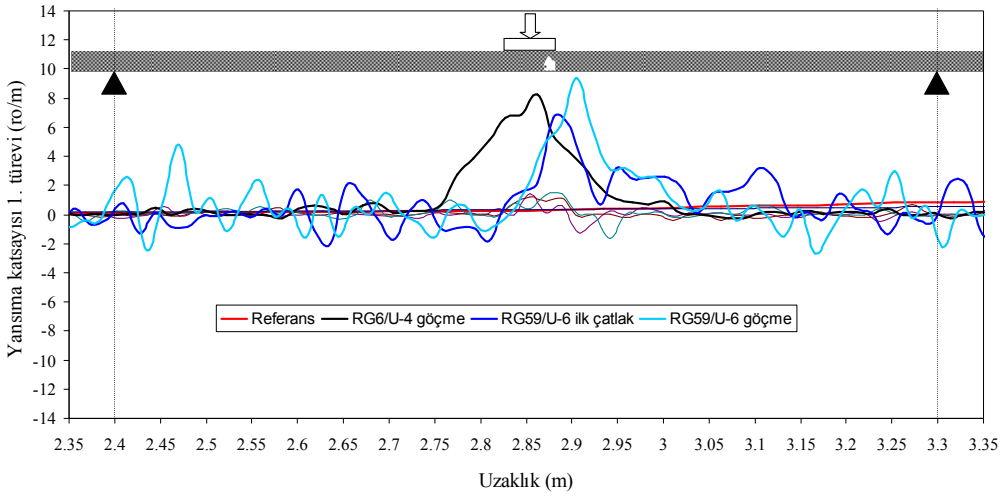


Şekil 5.39. RG S2 M-M numunesi göçmesinin TDR ile tespiti

Yansıma katsayısının numune boyunca integrali alındığında, RG59/U-6 sensöründe ilk çatlama ile referans integral eğrisinden bir sapma oluşmuş ve göçme anında sapma açısı açık uç yansımasına ulaşmıştır. RG6/U-4 sensörde ise yalnızca göçme anı görülebilmiştir (Şekil 5.40). Benzer şekilde yansıma katsayısının numune boyunca türevi incelendiğinde, RG59/U-6 sensörle ilk çatlak ve göçme ayrı ayrı tespit edilebilmişken, RG6/U-4 sensöründe sadece göçme anı görülebilmiştir (Şekil 5.41).



Şekil 5.40. RG S2 M-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı integraline etkisi



Şekil 5.41. RG S2 M-M numunesi göçmesinin yansıma katsayısı türevine etkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kazık hasarlarının belirlenebilmesi için TDR yönteminin kullanılabilirliği, temsili kazık olarak üretilen betonarme prizmatik kiriş numuneleri üzerinde araştırılmıştır. Bu amaçla, numunelere kazıkların depremlerde sıvılaşma nedeniyle en sık maruz kaldıkları şekilde monotonik yükleme ile 3 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Tezin sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

Testlerde sensör olarak numunenin çekme yüzüne yerleştirilen koaksiyel kablolar, empedans ve iletim hızı gibi karakteristik özellikleri TDR yöntemiyle rahatlıkla belirlenebilen ekonomik kablolardır. Bu kabloların empedansları malzeme ve geometri özelliklerine bağlı olduğu için kabloda oluşan gerilme ile orantılı bir biçimde değişmektedir. Bu sebeple koaksiyel kablolar, sensör olarak yerleştirildikleri ortamda oluşan deformasyonlara duyarlı hale gelmektedir. Testlerde kullanılan sensörlerin bu duyarlılığını istenilen seviyeye yükseltmek için kablo yapısında değişikliğe gidilmiştir. Bu değişiklik ile hasarı algılama stratejisi, sensörün gerilmeye bağlı şekil değiştirmesi yerine sensör dış iletkeninin iç yalıtkandan sıyrılması üzerine kurulmuştur. Geliştirilen bu sensör yapısının, koaksiyel kablonun karakteristik özelliklerinde hiçbir değişim oluşturmadığı yapılan TDR ölçümleriyle teyit edilmiştir.

Eğilme testi boyunca her yük seviyesinde gerçekleştirilen TDR ölçümlerinden elde edilen yansıma katsayısı-uzaklık eğrileri incelenmiştir. Kazıkta hasarın oluşmasıyla yansıma katsayısı referans eğrisi üzerinde değişimler meydana gelmiştir. Hasarın TDR ile ilk tespit edilebildiği yükleme değeri akma öncesi bölgesinin ortasındadır. Test sonuçları incelendiğinde kazık boyunca oluşan çatlak gelişiminin uygun sensör seçimiyle önemli oranda belirlenebildiği görülmüştür. Kazıkta oluşan çatlakların konumları TDR yöntemi ile en fazla 3 cm hatayla belirlenmiştir. Bu hatanın sebebi, betonla sensör arayüzünde gelişen aderansın belirli bir yük seviyesinden sonra azalmasıyla ortaya çıkan sıyrılmadır.

Konumlandırma işlemi için yansıma katsayısının uzaklığa göre türevinin veya integralinin alınması, doğrudan yansıma katsayısı-uzaklık grafiğinin kullanımına oranla daha kolay tespit imkanı sağlamaktadır.

Sensörün eğilme testinde algılayabildiği en küçük çatlak genişliği 0,4 mm olmuştur. Bu değerin, sensörle çekme yüzeyi arasında kalan beton kabuk kalınlığından kaynaklandığı ve bu kalınlığın azalmasıyla çatlak tayininin daha hassas olacağı düşünülmektedir. Algılanabilen 0,4 mm çatlak genişliği, birçok yönetmelikte zemin içinde kalan betonarme elemanlarda donatı korozyonunu engellemek için belirlenmiş, izin verilebilir en büyük çatlak genişliği olan 0,3 mm değerine oldukça yakındır.

Kazık kesitinin göçtüğüne karar verebilmek için TDR ölçümünde gerçekleşen yansımanın yükselme kolunun eğimine bakmak yeterli olmaktadır. Bu eğimin, iletim hattı teorisinden bilinen açık uç yansımasında gerçekleşen değerle aynı olması durumunda sensörün tamamen koptuğu düşünülebilir. Eğer kazığın karşılıklı iki yüzeyinde bulunan sensörlerde böyle bir durum oluşmuşsa sıvılaşma yükü gibi monotonik yükler altında kazığın göçmüş olduğu söylenebilir.

Yöntemin başarıyla uygulanabilmesi için kesite yerleştirilecek sensörün nominal empedans ve iletim hızı değerlerinin laboratuvar şartlarında tespit edilmesinde fayda vardır. Bu değerler, çatlağın varlığının belirlenmesinde ve konumlandırılmasında TDR yönteminin başvuracağı parametrelerdir.

Sensörün herhangi bir noktasında içerden bir kopukluk olması durumunda bu noktadan ileriye ölçüm yapılamayacağı unutulmamalıdır. Bu sebeple kazıklara yerleştirilecek sensörün uzunluğunun tamamı boyunca süreksizlik testi yapılmalıdır.

Sensör ile beton arasında sağlanması gereken aderansın arttırılması amacıyla kimyasal yapıştırıcılar kullanılabilir. Fakat bu yapıştırıcıların, sensörün elektomanyetik özelliklerine zarar vermeyecek türden olmaları gerekir.

KAYNAKLAR

ACI 228.2R-98, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI Committee Report, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, MI, 1998.

Agilent Technologies, High Precision Time Domain Reflectometry, Application Note, *Agilent Technologies*, 5301 Stevens Creek Blvd Santa Clara, CA 95051, USA, 2003.

Ang E. C., Numerical Investigation of Load Transfer Mechanism in Slopes Reinforced with Piles, PhD. Dissertation, University of Missouri, Columbia, 2005.

Arsoy S., Özgür M., Keskin E., Yilmaz C., Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils, *Geoderma*, 2013, **195-196**, 133-144.

ASTM C1040-93, Standard Test Methods for Density of Unhardened and Hardened Concrete In Place By Nuclear Methods, *American Society for Testing and Materials*, USA, 2000.

ASTM D6565, Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by the time-domain reflectometry (TDR) method, *American Society for Testing and Materials*, USA, 2005.

Baker C. N, Drumwright E. E., Briaud J. L., Mensah D. F., Parikh G., Drilled Shafts for Bridge Foundations, *Federal Highway Administration (FHWA)*, FHWA-RD-92-004, 1993.

Baker J. M., Allmaras R. R., System for Automating and Multiplexing Soil Moisture Measurement by Time Domain Reflectometry, *Soil Science Society of America Journal*, 1990, **54**, 1-6.

Becker R., Huebner C., Stacheder M., Electromagnetic Simulation of Time Domain Reflectometry Probes: Simplified Approaches to Assess Calibration Curves, Sensitivity, Field Extent and Transient Response, *3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications*, Purdue University, West Lafayette, USA, 2006.

Berrill J. B., Christensen S. A., Keenan R. P., Okada W. and Pettinga J. R, Case Studies of Lateral Spreading Forces on a Piled Foundation, *Geotechnique*, 2001, **51**(6), 501-517.

Bhattacharya S., Bolton M. D., Madabhushi S. P., A Reconsideration of the Safety of Piled Bridge Foundations in Liquefiable Soils, *Soils and Foundations*, 2005, **45**(4), 13-25.

Bird J. O., *Electrical Circuit Theory and Technology*, 2nd Revised Edition, Newnes (an imprint of Butterworth-Heinemann Ltd), Great Britain, 2003.

Blackburn J. T., Finite Element Analysis of TDR Cable-Grout-Soil Mass Interaction During Localized Shearing, Master of Science Dissertation, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinoise, USA, 2002.

Bobet A., Salgado R, and Loukidis D., Seismic Design of Deep Foundations, *Federal Highway Administration (FHWA)*, FHWA/IN/JTRP-2000/22, USA, 2001.

Bordas S. P., Numerical Simulation of Measured Time Domain Reflectometry Signatures, Master of Science Dissertation, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinoise, USA, 1998.

Bowen H. J., Behaviour of Piles in Liquefiable Deposits During Strong Earthquakes, Master of Science Dissertation, Civil Engineering University of Canterbury New Zealand, 2007

Brown G. D., Bandwidth and Rise Time Calculations for Digital Multimode Fiber-Optic Data Links, *Journal of Lightwave Technology*, 1992, **10**(5), 672-678.

Burgt M. J., Coaxial Cables and Applications, *Belden Electronics Division*, South Richmond, IN 47374, USA, 2003.

Celep Z., *Yapı Elemanı Olarak Yerinde Dökme Betonarme Kazıklar*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, 2007.

Chakraborty S., Brown D. A., Evaluation of Unknown Pile Length Under Existing Bridges in Alabama, *Highway Research Center Auburn University*, IR-97-05, Alabama, 1997.

Chen G. D., Sun S. S., Pommerenke D., Drewniak J. L., Greene G. G., McDaniel R. D., Belarbi A., Mu H. M., Crack Detection of a Full-Scale Reinforced Concrete Girder with a Distributed Cable Sensor, *Smart Mater. Struct.*, 2005, **14**, 88–97.

Cheung R.,. Lo D., Use of Time-Domain Reflectometry for Quality Control of Soil-Nailing Works, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(12), 1222-1235.

Chung C. C., Improved Dielectric Characterization of Soil Using Time Domain Reflectometry, Research Proposal, *National Chiao Tung University*, Taiwan, 2005.

Curtis J. O., Moisture Effects on the Dielectric Properties of Soil, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**, 125-128.

Dash, S. R., Bhattacharya, S., Blakeborough, A., Bending-Buckling Interaction: Investigation of this Failure Mechanism of Pile Foundations in Seismically

Liquefiable Deposits, *Department of Engineering Science, University of Oxford*, Technical report -2302/08, UK, 2008.

Davis A. G., Malcolm K. L., Petersen C. G., Rapid and Economical Evaluation of Concrete Tunnel Linings with Impulse Response and Impulse Radar Non-destructive Methods, *Non-Destructive Testing and Evaluation International*, 2005, **38**(3), 181-186.

Davisson M. T., Robinson K. E, Bending and Buckling of Partially Embedded Piles, *6th ICSMFE*, Montreal, 1965.

Demes, Koaksiyel Kablolar Ana Parametreler, Teknik Bilgiler*, Demes Kablo*, İstanbul, 2008.

Dennis N. D., Ooi C. W, Wong V. H., Estimating Movement of Shallow Slope Failures Using Time Domain Reflectometry, *3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications*, Purdue University, West Lafayette, USA, 2006.

Drnevich, V. P., Yu, S., Lovell, J., Beta Testing Implementation of the Purdue Time Domain Reflectometry (TDR) Method for Soil Water Content and Density Measurement, Final Report, *Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation – Purdue University*, FHWA/IN/JTRP-2000-20, USA, 2003.

Ellsworth D. E., Ginnado K., Guide for Visual Inspection of Structural Concrete Building Components, *USACERL*, Technical Report M-91/18, USA, 1991.

Eugene E. C., Meehan J. F., *Reflections on the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake*, Structural Engineers Association of California Ad Hoc Earthquake Reconnaissance Committee, Sacramento, 1991.

Fukuoka M., Damage to civil engineering structures, *Soils and Foundations*, 1966, **6**(2),45–52.

Gamry, Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy, Application Note, *Gamry Instruments*, 734 Louis Drive Warminster, PA 18974, USA, 2007.

Shanker K, Basudhar P., Patra N., Buckling of piles under liquified soil conditions, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, **25**(3), 303-313, DOI:10.1007/s10706-006-9111-6.

Haldar S., Babu S, Probabilistic Seismic Design of Pile Foundations in Non Liquefiable Soil by Response Spectrum Approach, *Journal of Earthquake Engineering*, 2009, **13**(6), 737-757.

Hamada M., Damage to Piles by Liquefaction-Induced Ground Displacements, *3rd U.S. Conference Lifeline Earthquake Eng.*, Los Angeles, 1991.

Hamada M., Large ground deformations and their effects on lifelines: 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, Volume-1, Japanese case studies, *National Centre*

for Earthquake Engineering Research (NCEER), NCEER-92-0001, Florida, 1992.

Hartebrodt M., Kabitzsch K., Fault detection in fieldbuses with time domain reflectometry, *7th AFRICON Conference in Africa*, Bostwana, 2004.

Horne J. C, Kramer S. L., Effects of Liquefaction on Pile Foundations-Research rept., *Washington State Transportation Center*, Seattle, 1998.

HP, Time Domain Reflectometry Theory, Application Note 1304-2, *Hewlett Packard Company*, Englewood, CO, USA, 1988.

Huang Y. H., Ni S. H., Lo K. F., Charng J.J., Assessment of Identifiable Defect Size in a Drilled Shaft Using Sonic Echo Method: Numerical Simulation, *Computers and Geotechnics*, 2010, **37**(6), 757–768.

IAEA, Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2002.

IPC, Characteristic Impedance of Lines on Printed Boards by TDR, *IPC Association Connecting Electronics Industries*, 2215 Sanders Road Northbrook, IL 60062-6135, USA, 2003.

Ishihara K., Cubrinovski M., Performance of large-diameter piles subjected to lateral spreading of liquefied deposits, *Thirteenth Southeast Asian Geotechnical Conf*., Taipei, Taiwan, 1998.

İyibakanlar G., Oktay A., Bazı Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin Frekansla Değişimlerinin İncelenmesi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2007, **3**(1), 11-19.

Jones S. B., Wraith J. M., Or D., Time Domain Reflectometry Measurement Principles and Applications, *Hydrol. Processes*, 2002, **16**, 141-153.

Kanagasabai S., Three Dimensional Numerical Modelling of Rows of Discrete Piles used to Stabilise Large Landslides, PhD. Dissertation, University Of Southampton, UK, 2010.

Kim D. J., Choi S. I., Ryszard O., Feyen J., Kim H. S., Determination of moisture content in a deformable soil using time-domain reflectometry (TDR), *European Journal of Soil Science*, 2000, **51**(1), 119-127.

Kulhawy F. H., Carter J. P., Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock, *Electric Power Research Institute*, Report EL-5918, USA, 1988.

Ledieu J., De Ridder P., De Clerck P., and Dautrebande S., A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry, *Journal of Hydrology*, 1986, **88**, 319-328.

Leung C. K., Lam F. K., Locating Bus Cable Break Point in a Local Area Network, *International Journal of Electronics*, 1992, **74**, 159-165.

Li, D. Q., Zhang L. M. and Tang W. H. Tang, Reliability Evaluation of Cross-Hole Sonic Logging for Bored Pile Integrity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(9), 1130-1138.

Liebich B. A., Acceptance Testing of Drilled Shafts by Gamma‐Gamma Logging, *Geo-Institude's GeoTrans 2004 Conference*, Los Angeles, 2004.

Lin C. P., , Tang S. H., Chung C. C, Lin W. C., Quantification of Localized Shear Deformation with Time Domain Reflectometry, *3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications*, Purdue University, West Lafayette, USA, 2006.

Lin C. P., Chung C. C., Tang S. H., Geoelectrical Measurements by TDR Penetrometer, *3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications*, Purdue University, West Lafayette, USA, 2006.

Lin C. P., Tang S. H., Lin W. C., Chung C. C., Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry-Implications to Landslide Monitoring, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(1), 143-152.

Lin M. W., Thaduri J., Gopu V., A Distributed Strain Sensor for Bridge Monitoring, *University Transportation Center for Alabama*, UTCA Report Number 02304, USA, 2003.

Lin M. W., Thaduri J., Structural Damage Detection Using an Embedded ETDR Distributed Strain Sensor, *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2005, **6**(4), 315-336.

Liu N., Soil and Site Characterization Using Electromagnetic Waves, PhD. Dissertation, Blacksburg, VA 24060 Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2007.

Liu W., Hunsperger R. G., Chajes M. J., Folliard K. J., Kunz E., Corrosion detection of steel cables using time domain reflectometry, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2002, **14**(3), 217-223.

Logsdon S. D., Effect of Cable Length on Time Domain Reflectometry Calibration for High Surface Area Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, **64**, 54-61.

Madabhushi P.G., Knappett J. A., Haigh, S.K., *Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils*. Imperial College Press, UK, 2010.

Mahmoud N. H., Ismail Y. I., Accurate Rise Time and Overshoots Estimation in RLC Interconnects, *IEEE Int. Symp. Circuits Syst*., USA, 2003.

Malicki M. A., Plagge R., Roth C. H., Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil, *European Journal of Soil Sciences*, 1996, **47**, 357-366.

Mendoza M. J., Auvinet G., The Mexico earthquake of September 19, 1985-

Behavior of building foundations in Mexico City, *Earthquake Spectra*, 1988, **4**(4), 835- 852.

Meymand P. J., Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction In Soft Clay, PhD. Dissertation, University of California, Berkeley, USA, 1998.

Mojid M. A., Wyseure C. L., and Rose D. A., Electrical Conductivity Problems Associated with Time-Domain Reflectometry (TDR) Measurement in Geotechnical Engineering, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2003, **21**, 243–258.

NAWC, *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Naval Air Warfare Center, Avionics Department, Washington, DC 20361, USA, 1999.

Ni S. H., Huang Y. H., Integrity Evaluation of PCC Piles Using the Surface Reflection Method, *Experimental Techniques,* 2012.

Ni S. H., Huang Y. H., Zhou X. M., Lo K. F., Inclination correction of the parallel seismic test for pile length detection, *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(2), 127-132.

Nussberger M., Soil Moisture Determination with TDR: Single-Rod Probes and Profile Reconstruction Algorithms, PhD. Dissertation, Swiss Federal Institute Of Technology, Zurich, 2005.

O'Neil M. W., Reese L. C., Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods, *Federal Highway Administration (FHWA)*, IF99-025, Washington D.C., 1999.

Özgür M., Arsoy S., TDR Yöntemi ile Zeminlerde Kayma Düzleminin Belirlenmesi, *4. Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2011.

Paquet J., Etude Vibratoire des Pieux en B´eton: R´eponse Harmonique (Vibration Study of Concrete Piles: Harmonic Response, *Annales de l'Institut Technique du Batiment*, **245**, 789–803 (in French), (English translation by Yee X. in Master of English Report, pp. 33–77, University of Utah, Salt Lake City, UT, USA), 1991.

Phanikanth V. S., Choudhury D., Reddy R., Response of Single Pile under Lateral Loads in Cohesionless Soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **15**, 813-830.

Picosecond, Time Domain Reflectometry (TDR) and Time Domain Transmission (TDT) Measurment Fundamentals, *Picosecond Pulse Labs*, 2500 55th Street Boulder, Colorado 80301, USA, 2004.

Poulos H. G., Davis E. H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.

Quinones H., Ruelle P., Nemeth I., Comparison of Three Calibration Procedures for

TDR Soil Moisture Sensors, *Irrig. And Drain.*, 2003, **52**, 203-217.

Robinson D. A., Calculation of the Dielectric Properties of Temperate and Tropical Soil Minerals from Ion Polarizabilities Using the Clausius-Mosotti Equation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, **68**, 1780-1785.

Sansalone M., Carino N. J., *Stress Wave Propagation Methods in Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1991.

Sargand S. M., Sargent L., Farrington S. P., Inclinometer-Time Domain Reflectometry Comparative Study, *Federal Highway Administration (FHWA)*, FHWA/OH-2004/010, USA, 2004.

Shanker K., Basudhar P., Patra N., Buckling of Piles under Liquefied Soil Conditions, Sitar N., Geotechnical Reconnaissance of the Effects of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Japan, *Earthquake Eng. Research Ctr., Univ. of California*, UCB/EERC-95/01, USA, 1995.

SoilMoisture, MiniTrase Kit Operating Instructions, *Soilmoisture Equipment Corp*., P.O. Box 30025, Santa Barbara, California 93130 USA, 2002

Stain R. T., Integrity Testing, *Civil Engineering*, 1982, **5**, pp. 71-73.

Takata T., Tada Y., Toshida I., Kuribayashi E., Damage to bridges in Niigata earthquake, *Public Works Research Institude*, Report No.125, Japan, 1965.

Tang L., Tao X., Choy C. L., Possibility of Using Coaxial Cable as a Distributed Strain Sensor by Time Domain Reflectometry, *Smart Materials and Structure*, 2001, **10**, 221-228.

Tang T., Yeung A. T., Full-Scale Field Testing of Surface Waves, TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles, *3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Soils Applications*, Purdue University, West Lafayette, USA, 2006.

TDY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, *T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi,* Ankara, 2007.

Tektronix, TDR Impedance Measurements: A Foundation for Signal Integrity, *Tektronix*, Beaverton, OR 97077, USA, 2007.

Tektronix, Understanding Ossilloscope Bandwidth, Rise Time and Signal Fidelity, Technical Brief, *Tektronix*, Beaverton, OR 97077, USA, 2009.

Timoshenko S. P., Gere, J. M., *Theory of elastic stability*, McGraw Hill book company, New York, USA, 1961.

Tokimatsu K., Asaka Y., Effects of liquefaction induced ground displacements on pile performance in the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, *Soils and Foundations*

(Special Issue), 1998, 163-177.

Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 1980, **16**(3), 574-582.

TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2000.

TS 3168 EN 1536, Özel Jeoteknik Uygulamalar–Delme (Fore) Kazıklar (Yerinde Dökme Betonarme Kazıklar), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2001.

Turner J. P., Time Domain Reflectometry for Monitoring Slope Movements, *Federal Highway Administration (FHWA)*, FHWA/ WY-06/03F, USA, 2006.

USF, Factors Affecting Anomaly Formation in Drilled Shafts-Final Report, *FDOT*, Project BC353-19, USA, 2005.

Whitaker J. C., The *Reasorce Handbook of Electronics*, 1st. Ed., CRC Press LLC, Boca Raton, 2001.

Wilson S. D., Hilts D. E., How to determine lateral load capacity of piles, *Pile Foundations,* Washington, 1967.

Yasuda S., Berril J. B., Observations of the earthquake response of foundations in soil profiles containing saturated sands, *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Australia, 2000.

Yu X., Yu X, Time Domain Reflectometry Automatic Bridge Scour Measurement System: Principles and Potentials, *Structural Health Monitoring*, 2009, **8**(6), 463-476.

Yu X. B., Liu Y., Development of Time Domain Reflectometry Instrument for QA/QC of Fresh and Early Stage Concrete-Final Report, *National Cooperative Highway Research Program Ohio Department of Transportation*, Ohio, 2010.

EKLER

EK-A

TDR YÖNTEMİYLE İLGİLİ LİTERATÜR ÖZETİ

Tablo A1. Literatür araştırması özeti

Konulara Göre Literatür Özeti		
İletim Hattı Teorisi , TDR Ölçüm Prensipleri Ve Parametreleri		
A.P. Dobos, 2006	High Speed Time Domain Reflectometer	Yüksek bant genişliğine sahip düşük maliyetli TDR: tasarım ve üretim
Gamry Instruments, 2007	Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy	Direnç, empedans, kapasitans, indüktans vb. kavramlar
M. J. Burgt, 2003	Coaxial Cables and Applications	Koaksiyel kabloların elektriksel ve fiziksel özellikleri
G. İyibakanlar, A. Oktay, 2007	Bazı Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin Frekansla Değişimlerinin İncelenmesi	Silikon, PVC ve polietilen gibi malzemelerin dielektrik sabitlerinin artan frekans ile azalımı
Agilent Technologies, 2006	Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials	Dielektrik teori, dielektrik mekanizması (kutuplanma, gevşeme, iyonik iletkenlik), TDR ile ölçüm teknikleri
A. Joshi, S. Kumar, 2005	Variation of Dielectric Strength of a Insulation Paper with Thermal Aging	Dielektrik mukavemet kavramı
C.A. Harper, 2002	Handbook of Plastics, Elastomers and Composites	İç yalıtkan (dielektrik) olarak kullanılan malzemeler: elektriksel ve mekanik özellikler
C.K. Leung, F.K. Lam, 1993	Locating Bus Cable Break Point in a Local Area Network	Kablo hasarının TDR ile bulunması, adım sinyal (step pulse) yerine sinüsoidal sinyal kullanılması
J.C. Whitaker, 2001	The Resource Handbook of Electronics	Direnç, empedans, kapasitans, indüktans vb. kavramlar
J.O. Bird, 2003	Electrical Circuit Theory and Technology	Direnç, empedans, kapasitans, indüktans vb. kavramlar

Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

Naval Air Warfare Center, 1999	Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook	Voltaj duran dalga oranı (voltage standing wave ratio), yansıma katsayısı, eşleşmezlik kaybı (mismatch loss), dönüş kaybı (return loss) gibi kavramlar
IPC Association Connecting Electronics Industries, 2003	Characteristic Impedance of Lines on Printed Boards by TDR	Elektronik devrede yer alan iletim hattının empedansını ölçme, Aşma (overshoot), düşme (undershoot), stabilizasyon süresi (settling time) gibi sinyal bozuklukları (signal aberrations)
Picosecond Pulse Labs, 2004	Time Domain Reflectometry (TDR) and Time Domain Transmission (TDT) Measurement Fundamentals	TDR test sinyalleri, yükselme süresi (rise time), çözünürlük, kapasitif ve indüktif süreksizlikler
Tektronix, 2007	TDR Impedance Measurements: A Foundation for Signal Integrity	Yansıma katsayısı, sinyal bozuklukları, TDR ölçüm doğruluğunu etkileyen faktörler
N.H. Mahmoud, Y.I. Ismail, 2003	Accurate Rise Time and Overshoots Estimation in RLC Interconnects	Yükselme süresi, sinyalde aşma
B.J. LaMeres, 2008	Digital System Design Lecture Notes-Lecture 3	Yükselme süresi ve bant genişliği
Tektronix	Understanding Oscilloscope Bandwidth, Rise Time and Signal Fidelity	Yükselme süresi ve bant genişliği, sinyal bozuklukları, kapasitif ve indüktif süreksizlikler
G.D. Brown, 1992	Bandwidth and Rise Time Calculations for Digital Multimode Fiber-Optic Data Links	Elektronik sinyallerde bant genişliği ve yükselme süresi
D. Smolyansky, 1999	SCSI Connector and Cable Modeling from TDR Measurements	İletim hattı denklemleri, bant genişliği, yükselme süresi, çoklu yansıma etkisi
Agilent Technologies, 2003	High Precision Time Domain Reflectometry	TDR ölçüm temelleri, çözünürlük, TDR ölçümünden frekans parametrelerinin elde edilmesi
TDR ile Zeminlerin HSİ, Yoğunluk, Elektriksel İletkenlik gibi Özelliklerinin Belirlenmesi		
P. Castiglione, P.J. Shouse, 2003	The Effect of Ohmic Cable Losses on Time-Domain Reflectometry Measurements of Electrical Conductivity	Zeminlerin TDR ile iletkenlik ölçümü, kablo uzunluğu etkisi

Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

J.A. Huisman, H. Vereecken, 2006	Comments on Time Domain Reflectometry Laboratory Calibration in Travel Time, Bulk Electrical Conductivity, and Effective Frequency	Zeminlerin TDR ile iletkenlik ölçümü, kablo uzunluğu etkisi
R. Becker, C. Huebner, M. Stacheder, 2006	Electromagnetic Simulation of Time Domain Reflectometry Probes: Simplified Approaches to Assess Calibration Curves, Sensitivity, Field Extent and Transient Response	Zeminlerin HSİ değerinin TDR ile belirlenmesinde kullanılan probların oluşturduğu EM alan ve probların hassasiyeti
C.C. Chung, 2005	Improved Dielectric Characterization of Soil Using Time Domain Reflectometry	Dielektrik karışım modeli, TDR penetrometre, Zeminlerin elektriksel davranışından çıkartılabilecek sonuçlar
M. Nussberger, 2005	Soil Moisture Determination with TDR: Single-Rod Probes and Profile Reconstruction Algorithms	Zeminlerin HSİ değerinin TDR ile belirlenmesinde tek iletkenli prob, tek iletkenli probların örnekleme hacminin daha büyük, EM alan dağılımının daha simetrik olduğu ortaya konulmuş
D.A. Robinson, 2004	Calculation of the Dielectric Properties of Temperate and Tropical Soil Minerals from Ion Polarizabilities Using the Clausius-Mosotti Equation	Zemin minerallerinin dielektrik sabitlerinin atomik kutuplanabilirlik özellikleri yardımıyla Clausius-Mosotti modeliyle hesaplanması
J.M. Blonquist, S.B. Jones, D.A. Robinson, 2005	A Time Domain Transmission Sensor with TDR Performance Characteristics	Zeminlerin HSİ değerinin TDR ile belirlenmesinde zaman tanım alanında iletim (TDT) ve TDR karşılaştırması, TDT uzun koaksiyel kablolarla kullanım açısından daha avantajlı, hassasiyet farkı yok
SoilMoisture Equipment Comp., 2002	Operating Instructions-MiniTrase Kit	SoilMoisture firmasına ait TDR cihazı ve probları ile HSİ ölçümü uygulama notları
A. Cataldo, L. Tarricone, A. Trotta, F. Attivissimo, C. Urso, 2003	Time Domain Reflectometry Technique for Monitoring of Liquid Characteristics	Sıvı tanklarında TDR ile seviye tespiti, TDR ölçüm kayıtlarının irdelenmesi

Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

C.P Lin, 2003	Frequency Domain versus Travel Time Analyses of TDR Waveforms for Soil Moisture Measurements	TDR ölçümlerinde teğet çizgisi yöntemi fiziksel anlamdan yoksun olarak yorumlanmış, frekans tanım alanında yansıma (FDR) ile daha kısa problarla dielektrik sabitinin frekansa bağlı olarak bulunabileceği düşünülmüş, TDR ölçümlerinin prob uzunluğu, bant genişliği, dielektrik gevşeme ve elektriksel iletkenlikten nasıl etkilendiği numeric olarak çalışılmış
D.J. Timlin, Y.A. Pachepsky, 1996	Comparison of Three Methods to Obtain the Apparent Dielectric Constant from TDR Wave Traces	Yansıma süresinin belirlenmesinde kullanılan teğet çizgisi, birinci türev ve Yanuka modellerinin karşılaştırılması, yakın sonuçlar elde edilmiştir
X. Yu, X. Yu, 2006	Time Domain Reflectometry Tests of Multilayered Soils	Farklı su içeriği, yoğunluk ve kalınlık değerlerine sahip tabakalardan oluşmuş tabakalı zeminlerde TDR ile HSİ tespiti, bu tip zeminlerde TDR başarılı bulunmuş, karışım modelleri kullanılabilir
H. Quinones, P. Ruelle, I. Nemeth, 2003	Comparison of Three Calibration Procedures for TDR Soil Moisture Sensors	Sürekli damlama, süreksiz damlama ve su içeriği bilinen bir numuneye TDR probunun farklı derinliklere yerleştirilmesi ile TDR kalibrasyonu yapılmıştır, benzer sonuçlar elde edilmiştir
M.A. Mojid, G.C.L. Wyseure, and D.A. Rose, 2003	Electrical Conductivity Problems Associated with (TDR) Measurement in Geotechnical Engineering	Dielektrik sabiti ölçümünde numunenin elektriksel iletkenliğinin etkisi teorik ve deneysel olarak çalışılmış, TDR ölçümünden elde edilen rölatif dielektrik sabitinin gerçel kısmını tespit edebilmek için bir model ortaya konmuştur
C.E. Zambrano, V.P. Drnevich, X. Yu, R. Nowack, 2006	Soil Texture Characterization from TDR Waveform Analysis	Zeminlerin elektromanyetik özelliklerinin TDR ölçümüne olan etkisi incelenmiştir, TDR ile HSİ ve yoğunluk belirlemenin dışında zeminin bileşimi tayini
M.A. Hilhorst, C. Dirksen, F.W.H. Kampers, R.A. Feddes, 2000	New Dielectric Mixture Equation for Porous Materials Based on Depolarization Factors	Zemin bileşenlerinin oranları zeminin elektriksel iletkenliğini etkilemektedir, dielektrik sabiti için zemin içinde bulunan hava, su ve katı minerallerin elektriksek özelliklerinden faydalanılarak teorik çalışmalar sonucu poroziteye ve HSİ değerine bağlı bir karışım modeli kurulmuştur

Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

S.D. Logsdon, 2000	Effect of Cable Length on Time Domain Reflectometry Calibration for High Surface Area Soils	Düşük ve yüksek miktarda absorbe su içeren zeminlerin TDR ile HSİ değerlerinin belirlenmesinde kablo uzunluğu ve sıcaklık etkisi araştırılmıştır,
N. Liu, 2007	Soil and Site Characterization Using Electromagnetic Waves	Zeminlerin elektromanyetik özellikleri yardımıyla HSİ, kuru yoğunluk, boşluk oranı, porozite, sıkıştırılabilirlik, sıvılaşma, anizotropi, hidrolik iletkenlik gibi geoteknik özelliklerinin belirlenmesi konusunda kapsamlı bir literatür araştırması
J. O. Curtis, 2001	Moisture Effects on the Dielectric Properties of Soil	Zeminlerin HSİ ile dielektrik sabiti arasında polinomial bir bağıntı kurulmuştur (100 MHz) frekans
S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or, 2002	Time Domain Reflectometry Measurement Principles and Applications	TDR ile yapılan HSİ ölçümlerinde dielektrik karışım modelleri, prob konfigürasyonu, absorbe su üzerinde sıcaklığın etkisi, tuzluluk gibi konular araştırılmıştır
C.P. Lin, C.C. Chung, S.H. Tang, 2004	Development of a TDR Dielectric Penetrometer	Klasik çok çubuklu problar yerine penetrometre ile gerçekleştirilen TDR ölçümlerinin sonuçları değerlendirilmiştir, örnekleme hacmi ve penetrasyon etkisi çalışılmıştır
TDR ile Şevlerde Kayma Düzlemlerinin Tespiti, Hareketliliğin Algılanması		
C.P. Lin, S.H. Tang, C.C. Chung, W.C. Lin, 2006	Quantification of Localized Shear Deformation with Time Domain Reflectometry	TDR ile şevlerde kayma düzlemlerinin kontrolüne yönelik bir çalışma, sensör olarak kullanılan koaksiyel kablonun kayma deformasyonu ile mekanik davranışı, zemine gömülen sensörün etrafını saran enjeksiyon kaplamanın optimum rijitliği üzerine değerlendirmeler
N.D. Dennis, C.W. Ooi, V.H. Wong, 2006	Estimating Movement of Shallow Slope Failures Using Time Domain Reflectometry	Şev hareketliliğinin algılanması üzerine bir çalışma, farklı tipte kablo sensörler, farklı rijitlikte enjeksiyon kaplamalarla zemine gömülmüş, enjeksiyon kaplamanın çok esnek olması veya çok rijit olması halinde TDR ölçümüyle sonuca varılamadığı belirtilmiş, TDR ile algılamanın gerçekleşmesi için gerekli minimum kayma deformasyonu spesifik olarak belirlenmiş, laboratuvar kalibrasyonları ile saha uygulamaları arasında bir uyumsuzluk tespit edilmiş ve bu yüzden daha fazla araştırma tavsiye edilmiş

Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

S.M. Sargand, L. Sargent, S.P. Farrington, 2004	Inclinometer - Time Domain Reflectometry Comparative Study	Şevlere yerleştirilen eğim ölçerler ve TDR kayma düzleminin derinliğini yaklaşık olarak aynı vermiştir, TDR sonuçlarından kayma deformasyonunun miktarı hakkında net bir sonuca varılamamıştır, geliştirilmiş bir sinyal işleme süreci ile deformasyon miktarı için daha net sonuçlar bulunabileceği belirtilmiştir, eğim ölçerlerle karşılaştırıldığında TDR çok daha kullanıcı dostu ve ekonomik olarak yorumlanmıştır
J.T. Blackburn, 2002	Finite Element Analysis of TDR Cable-Grout-Soil Mass Interaction During Localized Shearing	Kablo sensörün enjeksiyon kaplama içinde davranışının araştırıldığı bir çalışma, daha önce yapılmış kesme kutusu deneyleri ele alınmıştır ve bu deneyler kurulan sonlu elemanlar modeliyle karşılaştırılmıştır
S.P. Bordas, 1998	Numerical Simulation of Measured Time Domain Reflectometry Signatures	Yansıma genişliği kavramı ileri sürülmüştür, kayma deformasyonu ile kablo sensörde oluşan yansımanın genişliği ve genliği ilişkilendirilmiştir
J.P. Turner, 2006	Time Domain Reflectometry for Monitoring Slope Movements	Yansıma genişliğinin, deformasyonun ölçüm cihazına olan uzaklığından ne kadar etkilendiği araştırılmıştır, aynı deformasyonun ölçüm cihazından farklı uzaklıklarda olması halinde yansıma genişliği değeri değişmektedir. Artan ölçüm uzaklığı ile yansıma genişliği de artmaktadır. Bu durum ölçüm uzaklığının hassasiyeti olumsuz yönde etkilediğine bir işarettir
Yapı Elemanlarında TDR Kullanımı		
G.D. Chen, S.S. Sun, D. Pommerenke, J.L. Drewniak, G.G. Greene, R.D. McDaniel, A. Belarbi, H.M. Mu, 2005	Crack Detection of a Full-Scale Reinforced Concrete Girder with a Distributed Cable Sensor	Test edilen boşluklu kiriş, burulma çerçevesine yerleştirilmiş ve döner mesnetler ile sabitlenmiştir, tersinir tekrarlı olarak uygulanan burulma yükü ile kirişte oluşan çatlaklar TDR ile belirlenmeye çalışılmıştır, sensör olarak özel geliştirilen koaksiyel kablo kullanılmıştır, dış iletkeni spiral olarak sarılan sensörde yükle birlikte spiral aralığının değişmesi sonucu yansımalar oluşmuştur

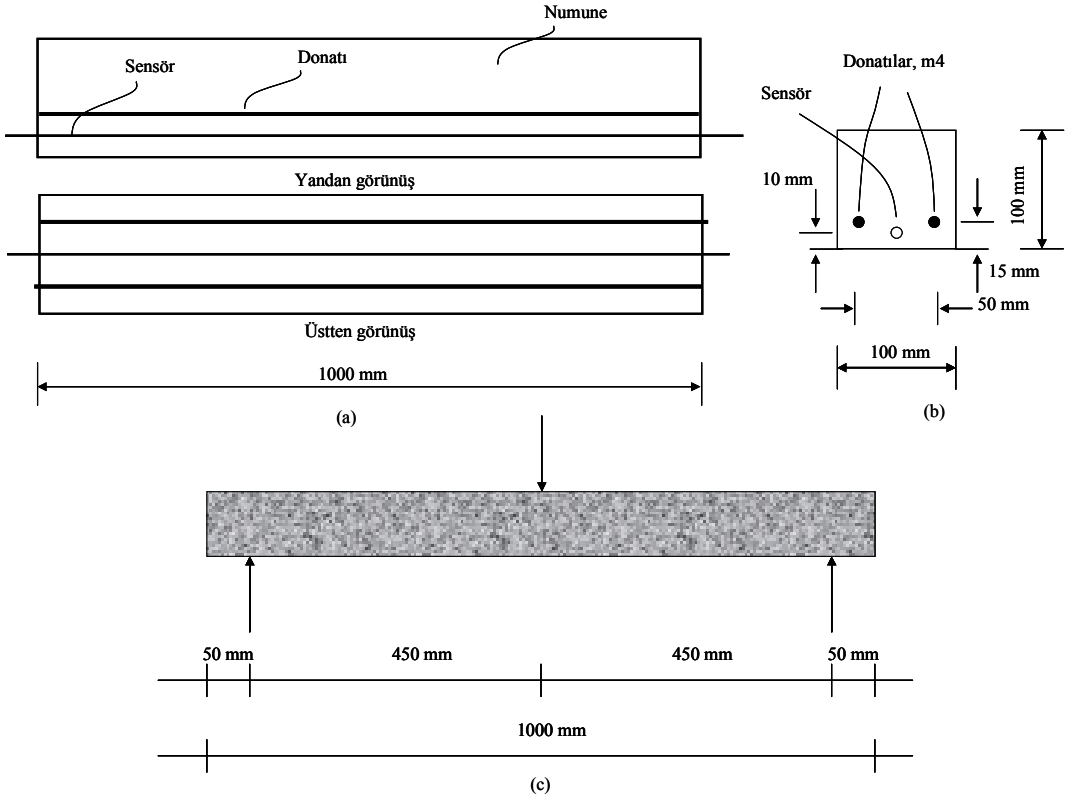
Tablo A1. Literatür araştırması özeti (Devam)

T. Tang, A.T. Yeung, 2006	Full-Scale Field Testing of Surface Waves, TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles	TDR yönteminin betonarme kazıkların bütünlük testi (pile integrity test – pit) ve kazık uzunluğu tespiti için kullanıldığı bir çalışma, fakat farklılık olarak, sensör vazifesi gören koaksiyel kablo yerine, boyu önceden hassas bir şekilde ölçülmüş olan kazık donatısı iletken olarak kullanılmıştır, TDR cihazından, kazık donatısına aktarılan elektromanyetik dalga (voltaj adımı), zemin üzerinden dönerek, paralel iki iletkenli iletim hattı oluşturulmuş olur
L. Tang, X. Tao, C.L. Choy, 2001	Possibility of Using Coaxial Cable as a Distributed Strain Sensor by Time Domain Reflectometry	Kablo sensör eksenel yük altında kesit değişimine uğrar, iletim hattı teorisi hatırlanacak olursa bir kablo sensörün geometrik yapısının bozulması sonucu empedans değeri değişmekteydi, bu çalışmada empedans değişimi ile eksenel birim deformasyon arasında bir bağıntı kurulmuştur
M.W. Lin, J. Thaduri, 2005	Structural Damage Detection Using an Embedded ETDR Distributed Strain Sensor	Betonarme kirişlerde eğilme testleri, TDR ile yüzey çatlağı oluşmadan hasar yerinin tahmini, kablo sensörden alınan TDR ölçümü ile hasarın boyutu arasında bir modelin oluşturulması gerektiği vurgulanmış

EK-B

NUMUNELERİN KESİT ÖZELLİKLERİ ve ANALİZİ

Numunelerin kesit özellikleri ve yükleme geometrisi Şekil B1'de görülmektedir.



Şekil B1. Numunelerin (a) kalıp planı (b) kesit geometrisi (c) yükleme geometrisi

Bu bölümde gerçekleştirilen 3 noktalı eğilme testinin sonuçlarıyla, mukavemet ve betonarme tasarım kuralları yardımıyla elde analizin teorik sonuçları karşılaştırılacaktır. Böylelikle reaksiyon çerçevesi ve kullanılan ölçüm cihazlarının güvenilirliğinden emin olunacaktır. Tablo B1'de numunelerin analizinde kullanılacak kesit ve malzeme özellikleri görülmektedir.

Tablo B1. Kesit analizinde kullanılacak parametreler

Analiz Parametreleri			
Kesit geometrisi		Malzeme özellikleri	
b_w (MPa)	100	f_{ck} (MPa)	26
d (mm)	85	$f_{ctk} = 0{,}35\sqrt{f_{ck}}$ (MPa)	1,78
h (mm)	100	$f_r = 2{,}5\ {f_{ck}}/{1{,}5}$	2,96
l (mm)	900	$E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000$ (MPa)	30000
A_s (mm^2)	2 adet m4 25,133	f_y (MPa)	450
h_{te} (mm)	50,43	f_{su} (MPa)	700
$s = \beta \times h_{te}$ (mm)	48,41	f_{sf} (MPa)	500
$z = d - {s}/{2}$ (mm)	60,8	E_s (MPa)	210000
$I_g = \frac{b_w h^3}{12}$ (mm^4)	$8{,}33 \times 10^6$	$\eta_s = E_s / E_c$	3
		$\alpha = 0{,}85 - 0{,}0015 f_{ck}$	0,84
		$\beta = 0{,}97 - 0{,}0025 f_{ck}$	0,96

Numunenin çatlama momenti Denklem (B.1) yardımıyla hesaplanır.

$$M_{cr} = \frac{2{,}96 \times 8{,}33 \times 10^6}{50} = 0{,}4931 \times 10^6 \text{ Nmm} \quad \text{(B.1)}$$

Basit mesnetli bir kirişin üzerinde oluşacak en büyük moment Denklem (B.2) ile hesaplanır.

$$M_{maks} = \frac{P \times l}{4} \quad \text{(B.2)}$$

Çatlamaya neden olan yük (P_{cr}), Denklem (B.1) ve Denklem (B.2) beraber değerlendirildiğinde;

$$\frac{P_{cr} \times l}{4} = 4{,}931 \times 10^{5} \Rightarrow P_{cr} = 2191{,}7 \text{ N};\ P_{cr} = 2{,}19 \text{ kN} \tag{B.3}$$

olarak bulunur.

Çatlama yükünde numunenin orta noktasında oluşacak düşey deplasman Denklem (B.4) ile hesaplanır.

$$\Delta_{cr} = k \frac{M_{cr}}{E_c I_g} \left(3l^2 - 4{a_s}^2\right) \tag{B.4}$$

k, yükleme geometrisine ve mesnetlenme şartlarına bağlı olarak 0,125 kabul edilmiştir. a_s, yük uygulama noktasının mesnete olan uzaklığıdır.

$$\Delta_{cr} = 0{,}125 \frac{0{,}4931 \times 10^{6}}{30 \times 10^{6} \times 8{,}33 \times 10^{-6}} \left(3 \times 0{,}9^2 - 4 \times 0{,}45^2\right) = 0{,}0004 \text{ m}=0{,}4 \text{ mm} \tag{B.5}$$

Akma yükünü hesaplamak için donatı olarak kullanılan çeliğin (Grade A2-Class 70) akma dayanımı kullanılmıştır. Teorik olarak gerçek akma dayanımının %85'i olarak verilen akma dayanımı 450 MPa'dır. Bu durumda donatıda akma yükünde oluşan gerilme 450/0,85=529 MPa'dır. Betonun gerilme bloğuyla karşılanması gereken bu gerilme değerinden, gerilme bloğunun yüksekliği hesaplanır.

$$s = \frac{529 \times 25{,}13}{0{,}84 \times 26 \times 100 \times 0{,}5} = 12{,}17 \text{ mm} \tag{B.6}$$

$$M_y = 529 \times 25{,}13 \times \left(85 - 12{,}17/2\right) = 1{,}049 \times 10^{6} \text{ Nmm} \tag{B.7}$$

Bu moment değerini oluşturacak akma yükü (P_y), Denklem (B.8) ile hesaplanır.

$$\frac{P_y \times l}{4} = 1{,}049 \times 10^{6} \Rightarrow P_y = 4662 \text{ N};\ P_y = 4{,}66 \text{ kN} \tag{B.8}$$

Bu yükün sebep olacağı Δ_y deplasmanı Denklem (B.9) ile hesaplanacaktır. Fakat bu denklemin kullanılabilmesi için öncelikle efektif atalet momentinin ve bunun için de çatlamış kesitin atalet momentinin bulunması gerekir. Çatlamış kesitin tarafsız eksen derinliği, $h_{te,cr}$, Denklem (5.15)'teki polinomun çözülmesiyle Denklem (B.10)'da görüldüğü gibi bulunur.

$$\Delta_y = k\frac{M_y}{E_c I_e}\left(3l^2 - 4{a_s}^2\right) \tag{B.9}$$

$$h_{te,cr} = \frac{-\eta A_s + \sqrt{(\eta_s A_s)^2 + 4\times(b_w/2)\times\eta_s A_s d}}{b_w} = 15{,}62 \text{ mm} \tag{B.10}$$

$$I_{cr} = \frac{b\left(h_{te,cr}\right)^3}{3} + \eta_s\, A_s\left[d - \left(h_{te,cr}\right)\right]^2 = 1{,}175\times10^6 \text{ mm}^4 \tag{B.11}$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \times I_{cr} = 1{,}92\times10^6 \text{ mm}^4, (M_a = M_y) \tag{B.12}$$

$$\Delta_y = 0{,}125\frac{1{,}05}{30\times1{,}92}\left(3\times0{,}9^2 - 4\times0{,}45^2\right)\times1000 = 3{,}69 \text{ mm} \tag{B.13}$$

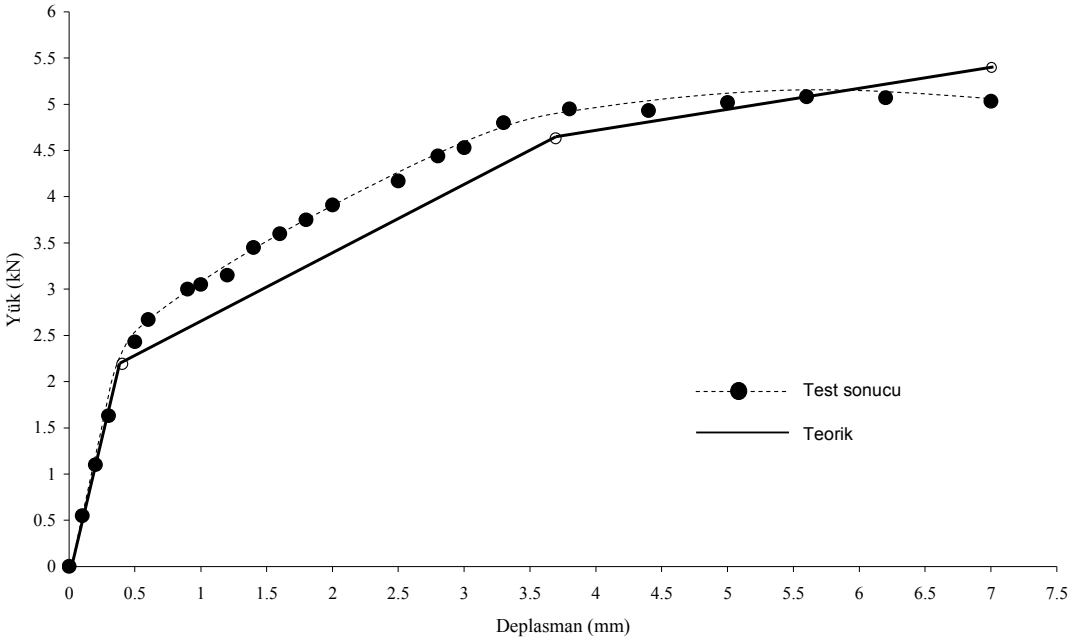
Numune göçme momenti, yükü ve bu değerlere karşılık gelen düşey deplasmanı, kesitin tamamen çatlamış olduğu kabulüyle aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_u = \frac{f_{sf}\, I_{cr}}{\eta_s\left(d - h_{te,cr}\right)} = \frac{500\times1{,}175\times10^6}{7\left(85 - 15{,}62\right)} = 1{,}21\times10^6 \text{ Nmm} \tag{B.14}$$

$$\frac{P_u \times l}{4} = 1{,}21\times10^6 \Rightarrow P_u = 5377 \text{ N};\ P_u = 5{,}38 \text{ kN} \tag{B.15}$$

$$\Delta_u = k\frac{M_u}{E_c I_{cr}}\left(3l^2 - 4{a_s}^2\right) = 0{,}125\frac{1{,}21}{30\times1{,}175}\left(3\times0{,}9^2 - 4\times0{,}45^2\right) = 6{,}98 \text{ mm} \tag{B.16}$$

Elde edilen bu teorik veriler, eğilme testinde elde edilen yük-deplasman eğrisiyle Şekil B.2'de görüldüğü üzere örtüşmektedir.



Şekil B.2. RG59/U-6 S1 M numunesine ait yük-deplasman eğrisinin teorik yük deplasman eğrisiyle karşılaştırması

Tablo B-2'de RG59/U-6 S1 M numunesinde çatlama, akma ve göçme noktaları için yapılan teorik hesaplamaların gerçekleşme oranları sunulmuştur.

Tablo B.2. Teorik sonuçların test sonuçlarıyla karşılaştırılması ve hata oranları

Nokta	Teorik[1]		Test [2]		Hata oranı (1-2)/1	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P	Δ
Çatlama	2,19	0,4	2,21	0,42	-0,009	-0,05
Akma	4,66	3,69	4,83	3,35	0,036	0,092
Göçme	5,38	6,98	5,15	7	0,042	-0,003

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Arsoy S., **Özgür M.**, Keskin E., Yilmaz C., Enhancing TDR based water content measurements by ANN in sandy soils, *Geoderma*, 2013, **195-196**, 133-144.

[2] Polat O., Keskin E., Yilmaz C., **Özgür M.**, Arsoy S., Effect of elevated temperature on behavior of cohesive soils, *7th International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, European University of Lefke, Lefke, 29-30 November 2012.

[3] **Özgür M.**, Arsoy S., TDR applications in civil engineering, *7th International Symposium on Civil and Environmental Engineering*, European University of Lefke, Lefke, 29-30 November 2012.

[4] **Özgür M.**, Arsoy S., TDR Yöntemi ile Zeminlerde Kayma Düzleminin Belirlenmesi, *4. Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 1-2 Aralık 2011.

[5] Arsoy S., Keskin E., Yılmaz C., **Özgür M.**, Kurutmaya Dayalı Zemin Su Muhtevası Ölçme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi*, İKÜ, İstanbul, 30 Eylül-1 Ekim 2010.

[6] Arsoy S., **Özgür M.**, Keskin E., Yılmaz C., Accuracy of Soil Moisture Content with ADR Probes in Saline Soils, *10. International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances Conference*, The International Society for Electromagnetic Aquametry, Finland, 1-5 Haziran 2009.

[7] Arsoy S., Yılmaz C., Keskin E., **Özgür M.**, Infrared Lambası Kullanarak Zeminlerin Su İçeriğinin Tespit Edilmesi, *3. Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.

[8] Arsoy S., Keskin E., **Özgür M.**, Yılmaz C., TDR Yöntemiyle Zemin Su İçeriği Belirleme Yaklaşımlarının İrdelenmesi, *3. Geoteknik Sempozyumu*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Adana, 3-4 Aralık 2009.

[9] Arsoy S., **Özgür M.**, Yılmaz C., Keskin E., ADR Yöntemiyle Belirlenen Su İçeriğine Tuzluluğun Etkisi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12.Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.

[10] Arsoy S., Yılmaz C., Keskin E., **Özgür M.**, Zemin Su Muhtevasının Elektromanyetik Yöntemlerle Belirlenmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12.Ulusal Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya, 16-17 Ekim 2008.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Antakya'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İskenderun'da tamamladıktan sonra 2001 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı okulda başladığı yüksek lisans eğitimini 2003 yılında tamamladı. Bir süre özel sektörde çalıştıktan sonra 2005 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.