

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
HİDROLİK BİLİM DALI**

**DALGA, SEDİMENT VE SIVILAŞAN ZEMİN İTKİLERİNE  
MARUZ RIHTIM KAZIKLARININ  
DİNAMİK DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ**

**Muhammet Ensar YİĞİT**

**Danışman  
Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ**



**MANİSA-2019**

## TEZ ONAYI

**Muhammet Ensar YİĞİT** tarafından hazırlanan "**Dalga, Sediment Ve Sıvılaşan Zemin İtkilerine Maruz Rıhtım Kazıklarının Dinamik Davranışlarının Modellenmesi**" adlı tez çalışması 10/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman** **Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ** .....

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi** **Prof. Dr. Gökmen TAYFUR** .....

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

**Jüri Üyesi** **Prof. Dr. Yeliz YÜKSELEN AKSOY** .....

Dokuz Eylül Üniversitesi

**Jüri Üyesi** **Doç. Dr. Mustafa Erkan TURAN** .....

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi** **Doç. Dr. Engin GÜCÜYEN** .....

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Muhammet Ensar YİĞİT**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VII
TABLO DİZİNİ.....	X
TEŞEKKÜR .....	XI
ÖZET.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. KAPSAM .....	9
4. AMAÇ .....	10
5. RIHTIM KAZIKLARI .....	11
5.1 Kazıkların Fiziksel Özellikleri.....	11
5.2 Kazıkların Çevresel Yükleri .....	12
6. MATEMATİKSEL MODELLEME .....	14
6.1 Rıhtım Kazıklarının Hareketine İlişkin Matematik Model.....	14
6.2 Dalga Hareketine İlişkin Matematik Model .....	17
6.2.1 Dalga Teorileri .....	17
6.2.1.1 Stokes-1 Dalga Teorisi .....	20
6.2.1.2 Stokes-2 Dalga Teorisi .....	22
6.2.1.3 Stokes-3 Dalga Teorisi .....	23
6.2.2 Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri .....	25
6.3 Sediment Hareketine İlişkin Matematik Model.....	30
6.3.1 Dalga-Sediment Etkileşimi .....	32
6.3.2 Deniz Suyu Yoğunluğu- Sediment Etkileşimi .....	33
6.4 Sıvılaştan Zemine ilişkin Matematik Modelleme .....	35
6.4.1 Newtonyen Akışkan İçin Navier-Stokes Denklemine Dayalı Matematiksel Model.....	37
6.4.2 Non-Newtonyen Akışkan İçin Navier-Stokes Denklemine Dayalı Matematiksel Model.....	38
7. NÜMERİK MODELLEME (ABAQUS YAZILIM) .....	42
7.1 Abaqus ile Sayısal Modelleme Esasları .....	42
7.2 Hidrolik Modelleme-ABAQUS .....	47
7.3 Hidrodinamik Modelleme-ABAQUS .....	49
7.4 Akışkan-Yapı Etkileşiminin Modellenmesi.....	49
7.5 Akışkan-Yapı Etkileşiminde Kazık Üzerindeki Von-Mises Gerilmeleri ....	50

8. RIHTIM KAZIKLARINA İLİŞKİN UYGULAMA .....	55
8.1 Akışkan-Yapı Etkileşim Modelinin Tanıtımı .....	55
8.2 Modelleme .....	56
8.3 Malzeme Kesit ve Özellikleri .....	57
8.4 Ağ Tasarımı .....	58
8.5 Sınır Şartları .....	59
8.6 Yakınsama Analizi.....	62
9. NÜMERİK ANALİZ BULGULARI .....	63
9.1 Dalga Parametreleri .....	63
9.2 Eksenel Yüklü Kazıkların Modellenmesi .....	66
9.2.1 Model IA İçin Nümerik Analiz.....	66
9.2.1.1 S1-RS-ZS Modeli.....	67
9.2.1.2 S2-RS-ZS Modeli.....	72
9.2.1.3 S3-RS-ZS Modeli.....	75
9.2.1.4 Model IA İçin Değerlendirme .....	78
9.2.2 Model IIA İçin Nümerik Analiz.....	80
9.2.2.1 S1-RD-ZS Modeli .....	82
9.2.2.2 S2-RD-ZS Modeli .....	85
9.2.2.3 S3-RD-ZS Modeli .....	88
9.2.2.4 Model IIA İçin Değerlendirme.....	91
9.2.3 Model IIIA İçin Nümerik Analiz .....	93
9.2.3.1 S0-RS-ZA Modeli .....	94
9.2.3.2 Model IIIA İçin Değerlendirme .....	95
9.2.4 Model IVA İçin Nümerik Analiz.....	97
9.2.4.1 S1-RS-ZA Modeli .....	98
9.2.4.2 S2-RS-ZA Modeli .....	101
9.2.4.3 S3-RS-ZA Modeli .....	104
9.2.4.4 Model IVA İçin Değerlendirme .....	107
9.2.5 Model VA İçin Nümerik Analiz .....	109
9.2.5.1 S1-RD-ZA Modeli.....	110
9.2.5.2 S2-RD-ZA Modeli.....	113
9.2.5.3 S3-RD-ZA Modeli.....	116
9.2.5.4 Model VA İçin Değerlendirme.....	119
9.3 Eksenel Yük Hariç Kazıkların Modellenmesi .....	121
9.3.1 Model IB İçin Nümerik Analiz .....	122
9.3.1.1 S1-RS-ZS Modeli.....	122

9.3.1.2	S2-RS-ZS Modeli.....	123
9.3.1.3	S3-RS-ZS Modeli.....	124
9.3.1.4	Model IB İçin Değerlendirme .....	125
9.3.2	Model IIB İçin Nümerik Analiz.....	127
9.3.2.1	S1-RD-ZS Modeli .....	127
9.3.2.2	S2-RD-ZS Modeli .....	128
9.3.2.3	S3-RD-ZS Modeli .....	129
9.3.2.4	Model IIB İçin Değerlendirme .....	130
9.3.3	Model IIIB İçin Nümerik Analiz.....	132
9.3.3.1	S0-RS-ZA Modeli .....	132
9.3.3.2	Model IIIB İçin Değerlendirme.....	133
9.3.4	Model IVB İçin Nümerik Analiz .....	134
9.3.4.1	S1-RS-ZA Modeli .....	134
9.3.4.2	S2-RS-ZA Modeli .....	135
9.3.4.3	S3-RS-ZA Modeli .....	136
9.3.4.4	Model IVB İçin Değerlendirme .....	137
9.3.5	Model VB İçin Nümerik Analiz.....	139
9.3.5.1	S1-RD-ZA Modeli.....	139
9.3.5.2	S2-RD-ZA Modeli.....	140
9.3.5.3	S3-RD-ZA Modeli.....	141
9.3.5.4	Model VB İçin Değerlendirme.....	142
9.4	Modellerin Çoklu Regresyon Bağlıntıları:.....	144
10.	SONUÇ VE ÖNERİLER .....	155
10.1	Eksenel Yüklü Modellerin Değerlendirmesi .....	155
10.2	Eksenel Yük Hariç Modellerin Değerlendirmesi.....	162
	KAYNAKLAR .....	168
	ÖZGEÇMİŞ.....	173

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- $A$  : Alan,  
 $a_I$  : Sönüm katsayısı,  
 $C_0$  : Sesin akışkandaki hızı,  
 $C_D$  : Sürüklenme katsayısı,  
 $C_M$  : Atalet katsayısı,  
 $c$  : Dalga yayılım hızı,  
 $c_s$  : Yapısal Sönüm,  
 $c^*$  : Genelleştirilmiş sönüm,  
 $c_{(y)}$  : Katı madde konsantrasyonu,  
 $D$  : Silindirik kazık çapı,  
 $d$  : Sakin su seviyesi altındaki deniz derinliği,  
 $d_k$  : Katı maddenin çapı,  
 $d_*$  : Boyutsuz tane çapı,  
 $E$  : Elastisite modülü,  
 $E_t$  : Toplam enerji,  
 $F_{FS}(t)$  : Hidrodinamik kuvvet,  
 $F^*(t)$  : Dış yük,  
 $F_D(y,t)$  : Hidrodinamik sürüklenme kuvveti,  
 $F_I(y,t)$  : Hidrodinamik atalet kuvveti,  
 $G$  : Kayma modülü,  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi,  
 $H$  : Dalga yüksekliği,  
 $H_r$  : Kum tepciği yüksekliğini,  
 $I$  : Birim tensör,  
 $I_m$  : Ataleti momentini,  
 $J$  : Kanal eğimi,  
 $k$  : Dalga sayısı,  
 $k_s$  : Yapısal Rijitlik,  
 $k^*$  : Genelleştirilmiş rijitlik,

- $L$  : Dalga boyu,  
 $L_d$  : Su derinliği,  
 $L_k$  : Kazık boyu,  
 $L_r$  : Kum tepeciği boyu,  
 $L_s$  : Sönümlenme mesafesi,  
 $m_s$  : Yapısal kütle,  
 $m^*$  : Genelleştirilmiş kütle,  
 $N_y$  : Eksenel yük,  
 $n$  : Kuvvet fonksiyonu indeksi,  
 $P$  : Nümerik modellemede basınç,  
 $p$  : Hidrodinamik basınç,  
 $p_i$  : x-yönünde tekil kuvveti,  
 $R$  : Hidrolik yarıçap,  
 $S$  : Nümerik modellemede gerilme,  
 $S_k$  : Katı maddenin özgül ağırlığı,  
SSS ; Sakin su seviyesi,  
 $s$  : Deniz tabanından itibaren yükseklik,  
 $T$  : Dalga periyodu,  
 $T_a$  : Sıcaklık,  
 $t$  : Zaman,  
 $U$  : Nümerik modellemede yer değiştirme,  
 $U_f$  : Sürtünme hızı,  
 $U_m$  : Tabandaki orbital hızın maksimum değeri,  
 $U_0$  : Taban üzerinde oluşan orbital hız,  
 $u$  : Akışkanın yatay hızı,  
 $u_s$  : Statik durumda boşluk suyu basıncı,  
 $u_d$  : Dinamik durumda boşluk suyu basıncı fazlalığı,  
 $W$  : Enerji,  
 $w_s$  : Çökelme hızı,  
 $X_D$  : Yer değiştirme,  
 $x$  : Yatay koordinat,



$V$	: Nümerik modellemede hız,
$Y$	: Nümerik modellemede derinlik,
$y$	: Düşey koordinat,
$z$	: Sayfa düzlemine dik koordinat, Normal,
$\gamma_d$	: Deniz suyu birim hacim ağırlığı,
$\delta$	: Yer değiştirme,
$\varepsilon$	: Birim şekil değiştirme,
$\eta$	: Su yüzü profili,
$\theta$	: Shields parametresi,
$\theta'$	: Sürtünme direnci,
$\theta_r$	: Boyutsuz kayma gerilmesi,
$\mu$	: Akışkan dinamik viskozitesi,
$\mu_0$	: Akışkanın kıvamı,
$\nu$	: Poisson oranı,
$\rho_s$	: Sediment parçacıklarının yoğunluğu,
$\rho_\zeta$	: Çelik malzemenin yoğunluğu,
$\rho_d$	: Deniz suyu yoğunluğu,
$\rho_{(y)}$	: Sediment-Deniz suyu karışımı yoğunluğu,
$\sigma$	: Yüzeysel gerilme,
$\sigma_{v0}$	: Toplam gerilme,
$\sigma'_{v0}$	: Efektif gerilme,
$\tau_0$	: Cidar kayma gerilmesi,
$\tau_b$	: Taban kayma gerilmesi,
$\tau'_b$	: Sürtünme direnci,
$\tau''_b$	: Şekil direnci,
$\nu$	: Akışkan kinematik viskozitesi,
$\Phi$	: Hız potansiyeli,
$\Psi$	: Akım fonksiyonu,
$\omega$	: Frekansı,
$\underline{\underline{\Delta}}$	: Deformasyon hız tensörü,

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Dalga teorilerinin geçerlilik sınırları.....	1
Şekil 6.1. Tekil rıhtım kazığı ve etkiyen yükler.....	14
Şekil 6.2. Dalga teorilerinin geçerlilik sınırları.....	17
Şekil 6.3. Açık ve kapalı sularda dalga tipleri .....	18
Şekil 6.4. Deniz dalgalarının su yüzeyi profili.....	19
Şekil 6.5. Lineer dalga parametrelerinin genel tanımı .....	20
Şekil 6.6. Düşey silindirik kazığa etkiyen dalga kuvvetleri.....	26
Şekil 6.7. Reynold sayısına göre sürüklenme katsayısı .....	28
Şekil 6.8. Tane Reynolds sayısının ( $Re_*$ ) bir fonksiyonu olarak Kritik Shields .....	31
Şekil 6.9. Dalga ve akıntı etkisinde askıda sediment taşınımı .....	32
Şekil 6.10. Sıvılaşmanın fiziksel süreci .....	36
Şekil 6.11. a) Suya doymuş gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı, b) Suya doymuş sıkı zeminin drenajsız şartlarda davranışı.....	37
Şekil 7.1. Nümerik modellemede kullanılan eleman türleri .....	48
Şekil 7.2. a) FC3D8 Eleman geometrisi, b) S4R eleman geometrisi.....	48
Şekil 7.3. Yapı ve akışkan çözücüsünün etkileşimi .....	50
Şekil 7.4. Von Mises gerilmeleri .....	51
Şekil 8.1. Tasarım dalgalarının belirlenmesi.....	55
Şekil 8.2. Kazık yüzeyi inceleme noktaları.....	57
Şekil 8.3. a) FC3D8 eleman geometrisi, b) S4R eleman geometrisi.....	58
Şekil 8.4. a) Modelin ağ yapısı, b) Sıkılaştırma bölgesi ayrıntısı .....	58
Şekil 8.5. Modelin ağ yapısı.....	59
Şekil 8.6. Tip-1 modellemesi sınır şartları.....	60
Şekil 8.7. Tip-2 modellemesi sınır şartları.....	61
Şekil 8.8. Tip-3 modellemesi sınır şartları.....	61
Şekil 8.9. Yakınsama analizi.....	62
Şekil 9.1. Sabit yoğunluklu deniz ortamında kazığa etkiyen Stokes-1-2-3 dalga hızı, ivmesi ve hidrodinamik kuvveti derinlikle değişimi ( $t=3T/4$ ).....	63
Şekil 9.2. Değişken yoğunluklu deniz ortamında kazığa etkiyen Stokes-1-2-3 dalga hızı, ivmesi ve hidrodinamik kuvveti derinlikle değişimi ( $t=3T/4$ ).....	63
Şekil 9.3. Su yüzeyinde Stokes-1-2-3 dalgalarının a) Su Yüzü profili, b) basınç - zaman grafiği, c) dalga hızı - zaman grafiği, d) ivme - zaman grafiği.....	64
Şekil 9.4. Deniz tabanında Stokes-1-2-3 dalgalarının a) Su Yüzü profili, b) basınç - zaman grafiği, c) dalga hızı - zaman grafiği, d) ivme - zaman grafiği....	64
Şekil 9.5. Stokes-1-2-3 dalgalarının analitik ve nümerik karşılaştırması .....	65
Şekil 9.6. Sabit yoğunluklu deniz ortamında dalga etkisindeki rıhtım kazığı. ....	66
Şekil 9.7. Kazık etrafında akışkan a) basınç $P(kN/m^2)$ b) hız $U(m/sn)$ dağılımı. ....	67
Şekil 9.8. Kazık etrafında akışkan a) basınç-zaman grafiği, b)hız - zaman grafiği ...	67
Şekil 9.9. a) Rıhtım kazığı üzerinde yer değiştirme $U(m)$ dağılımları, b) gerilme $S(kN/m^2)$ dağılımları.....	68
Şekil 9.10. Rıhtım kazığı üzerinde a) yer değiştirme - zaman grafiği, b) gerilme - zaman grafiği.....	68
Şekil 9.11. S1-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	69
Şekil 9.12. S1-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri .....	70
Şekil 9.13. S1-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	71

Şekil 9.14. S2-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	72
Şekil 9.15. S2-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri .....	73
Şekil 9.16. S2-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	74
Şekil 9.17. S3-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	75
Şekil 9.18. S3-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri .....	76
Şekil 9.19. S3-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	77
Şekil 9.20. Model IA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m/sn)$ , $S(kN/m^2)$ ) .	79
Şekil 9.21. Derinlikle değişen yoğunluklu deniz ortamı.....	80
Şekil 9.22. a) Sediment düşey konsantrasyon profili, $c(y)$ , b) Deniz suyu yoğunluk profili, $\rho(y)$ .....	81
Şekil 9.23. S1-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	82
Şekil 9.24. S1-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	83
Şekil 9.25. S1-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	84
Şekil 9.26. S2-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	85
Şekil 9.27. S2-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	86
Şekil 9.28. S2-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	87
Şekil 9.29. S3-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	88
Şekil 9.30. S3-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	89
Şekil 9.31. S3-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	90
Şekil 9.32. Model IIA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )....	92
Şekil 9.33. Durgun Deniz Tabanında Akıcı Sıvılaştırmış Zemin Hareketi .....	93
Şekil 9.34. S0-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	94
Şekil 9.35. Rıhtım kazığı etrafında oluşan akışkan a) basınç-zaman grafiği, b) hız- zaman grafiği ( $y=5.0m$ ).....	94
Şekil 9.36. Rıhtım kazığı üzerinde oluşan a) yer değiştirme değerleri $U(m)$ , .....	95
Şekil 9.37. a) Rıhtım kazığı üzerinde oluşan yer değiştirme - zaman grafiği, b) Rıhtım kazığı tabanında oluşan gerilme - zaman grafiği.....	95
Şekil 9.38. Akıcı zeminde sabit yoğunluklu dalgalı deniz ortamında rıhtım kazığı..	97
Şekil 9.39. S1-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	98
Şekil 9.40. S1-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	99
Şekil 9.41. S1-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	100
Şekil 9.42. S2-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	101
Şekil 9.43. S2-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	102
Şekil 9.44. S2-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	103
Şekil 9.45. S3-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ) .....	104
Şekil 9.46. S3-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	105
Şekil 9.47. S3-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri .....	106
Şekil 9.48. Model IVA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )	108
Şekil 9.49. Akıcı zeminde değişken yoğunluklu dalgalı deniz ortamı rıhtım kazığı.	109
Şekil 9.50. S1-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	110
Şekil 9.51. S1-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	111

Şekil 9.52. S1-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	112
Şekil 9.53. S2-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	113
Şekil 9.54. S2-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	114
Şekil 9.55. S2-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	115
Şekil 9.56. S3-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(kN/m^2)$ , $V(m/s)$ ).....	116
Şekil 9.57. S3-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri.....	117
Şekil 9.58. S3-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	118
Şekil 9.59. Model VA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )..	120
Şekil 9.60. S1-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	122
Şekil 9.61. S2-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	123
Şekil 9.62. S3-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	124
Şekil 9.63. Model IB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )...	126
Şekil 9.64. S1-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	127
Şekil 9.65. S2-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	128
Şekil 9.66. S3-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	129
Şekil 9.67. Model IIB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )..	131
Şekil 9.68. S0-RS-Zs Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	132
Şekil 9.69. Model IIIB için kazık üzerindeki yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ ).....	133
Şekil 9.70. S1-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	134
Şekil 9.71. S2-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	135
Şekil 9.72. S3-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	136
Şekil 9.73. Model IVB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )..	138
Şekil 9.74. S1-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	139
Şekil 9.75. S2-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	140
Şekil 9.75. S3-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri.....	141
Şekil 9.77. Model VB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( $U(m)$ , $S(kN/m^2)$ )..	143

## TABLO DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 6.1. Deneysel olarak $C_M$ katsayısı değerlerinin belirlenmesi.....	29
Tablo 6.2. Bazı yapısal formlar için $C_M$ ve $C_D$ katsayısı. ....	29
Tablo 8.1. Analiz çeşitleri ve kodlanması.....	56
Tablo 8.2. Kazık parametreleri.....	57
Tablo 8.3. Akışkan parametreleri.....	57
Tablo 8.4. Dalga parametreleri.....	57
Tablo 9.1. Model IA için akışkan-yapı etkileşimi.....	78
Tablo 9.2. Derinlikle değişen kosatrasyon ve yoğunluk denklemleri .....	81
Tablo 9.3. Model IIA için akışkan-yapı etkileşimi .....	91
Tablo 9.4. Değişik akıcı zemin hızlarında $C_D$ katsayısı.....	96
Tablo 9.5. Model IIIA için akışkan-yapı etkileşimi .....	96
Tablo 9.6. Model IVA için akışkan-yapı etkileşimi.....	107
Tablo 9.7. Model VA için akışkan-yapı etkileşimi .....	119
Tablo 9.8. Model IB için akışkan-yapı etkileşimi.....	125
Tablo 9.9. Model IIB için akışkan-yapı etkileşimi .....	130
Tablo 9.10. Model IIIB için akışkan-yapı etkileşimi .....	133
Tablo 9.11. Model IVB için akışkan-yapı etkileşimi.....	137
Tablo 9.12. Model VB için akışkan-yapı etkileşimi .....	142
Tablo 9.13. Model IA için denklemler.....	145
Tablo 9.14. Model IIA için denklemler. ....	146
Tablo 9.15. Model IIIA için denklemler.....	147
Tablo 9.16. Model IVA için denklemler.....	148
Tablo 9.17. Model VA için denklemler.....	149
Tablo 9.18. Model IB için denklemler.....	150
Tablo 9.19. Model IIB için denklemler.....	151
Tablo 9.20. Model IIIB için denklemler.....	152
Tablo 9.21. Model IVB için denklemler.....	153
Tablo 9.22. Model VB için denklemler.....	154

## TEŞEKKÜR

Doktora tez konusu seçiminde görüş ve desteklerini esirgemeyen, problemlerimize getirdiği çözümler, teorik destek, literatür katkısı ve göstermiş olduğu anlayış için danışmanım Sayın Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ'a teşekkür ederim.

Doktora yapma kararı almamda verdiği destek, danışmanlık ve göstermiş olduğu anlayış için Sayın Prof. Dr. Bekir SOLMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışma kapsamında karşılaştığım problemlerin çözümünde görüş ve desteklerini esirgemeyen tez izleme jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Gökmen Tayfur, Sayın Doç. Dr. Mustafa Erkan TURAN ve Sayın Doç. Dr. B. Burak ÖZHAN'a teşekkür ederim. Ayrıca C.B.Ü. Mühendislik Fakültesinde çalıştığım süreçte desteği esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümündeki değerli hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Öğrencilik hayatım süresince maddi, manevi desteklerini esirgemeyen ve mesleki hayatımda aldığım kararlarda tecrübe, destek ve şahsıma duydukları güvenden dolayı Babama, Anneme, Eşime, Kardeşlerime ve diğer aile bireylerime de teşekkürlerimi sunarım.

Muhammet Ensar YİĞİT  
Manisa, 2019

## ÖZET

### Doktora Tezi

#### **Dalga, Sediment Ve Sıvılaştan Zemin İtkilerine Maruz Rıhtım Kazıklarının Dinamik Davranışlarının Modellenmesi**

**Muhammet Ensar YİĞİT**

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ**

Tekil kazıklardan ve kazık gruplarından müteşekkil deniz yapılarının dinamik davranışı, sayısal ve analitik olarak hesaplanabilmektedir. Özellikle dalga, sediment ve sıvılaştan zeminden oluşan çevresel yükler, yapısal-fonksiyonel yükler ve kazığın yapısal parametrelerinden oluşan dış kuvvetleri göz önüne alınmasıyla kazık dinamik davranışının hâkim denklemi öncelikle çıkarılmalıdır. Dalga denklemlerinin belirlenmesinde kazıkların inşaa edileceği derinliğe yönelik olarak tasarım parametreleri değişmektedir. Kazıklara etkiyecek hidrodinamik kuvvetlerin hesabında ise tasarım parametreleri büyük önem arz eder. Rıhtım kazığının faydalı ömrü içerisinde birden farklı dalga teorisinin etkisinde kalacağı su derinliği, dalga periyodu ve dalga yüksekliğine bağlı olarak belirlenebilmektedir. Dalga teorilerine bağlı olarak hesaplanan akış hızının tabandaki katı maddeleri harekete geçirerek belirli bir yüksekliğe kadar deniz suyu yoğunluğu artırdığı bilinmektedir. Bu çalışmada; lineer ve lineer olmayan dalga kuvvetlerine, taban askı yüküne ve sıvılaştan zemin basıncına maruz aksel basınç yüklü tekil kazığın hareketi formülize edilmiş ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Newtonyen akışkan olarak dalga ve sediment hareketi ile kuvvet fonksiyonlu Newtonyen olmayan akışkan olarak da sıvılaştan zemin hareketi; Navier-Stokes bağıntılarına göre tanımlanmıştır. Bu çalışmanın başlangıç ve sınır koşullarına göre ABAQUS yazılımı kullanılarak kazığın dinamik analizi sayısal olarak yapılmıştır. Tanımlanmış deniz ortamındaki silindirik-çelik-boru tipi kazık sistemi modellenirken, hem aksel yüklü hem aksel yükü olmayan kazıkların dalga kuvvetlerinden, sediment hareketinden ve sıvılaştan zemin kuvvetlerinden oluşan dış kuvvetlerin farklılaşmasına dayalı 2-ana model ve her biri için 5-alt model kurulmuştur. Kazık etrafında oluşan dalga-kökenli hidrodinamik basınçlar ve akış hızları, kazık boyunca yatay yer değiştirmeler ve Von-Mises gerilmeleri, geliştirilen her bir model için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizler sonucu ortaya çıkan böylesi parametreler değerlendirilmiş ve çoklu regresyonla analizi kullanılarak birbirleriyle ilişkilendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deniz Kazıklarının Dinamiği, Kazığa Etkiyen Birleşik Yükler, Dinamik Model Abaqus Çözümleme, Newtonyen Olmayan Akışkanlı Sıvılaştan Zemin

**2019, 172 sayfa**

## **ABSTRACT**

**PhD Thesis**

### **Modeling Dynamic Behaviours of Wharf Piles Due to Wave, Sediment and Liquefied Soil Effets**

**Muhammet Ensar YİĞİT**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Ümit GÖKKUŞ**

Dynamic behaviour of marine structures composed of single piles and pile groups can be numerically and analytically calculated. Especially, the governing equation of dynamic behaviour of pile must be firstly derived by considering the external forces including both of environmental loads such as wave, sediment and liquefied soil, and structural-functional loads and pile structural parameters. Design parameters for determining wave equation changes according to the construction depth of piles. Design parameters are of great importance in the calculation of hydrodynamic forces that affect the piles. The governing wave theory in the useful life of a pier can be determined depending on the wave period, water depth and wave height. It is known that the flow rate calculated according to the wave theories increases the density of seawater and triggers the sediment transport at the sea bed. In this study, the motion of a axially compressed single pile under linear and non-linear wave forces, suspended bed load and liquefied soil pressure is formulized and numerically analyzed. Wave and sediment motions as Newtonian fluid and liquefied soil motion as Non-Newtonian fluid covering the power-law rule are defined in accordance with the Navier-Stokes equation. Pile dynamical analysis is numerically performed by using the ABAQUS software in accordance with initial and boundary conditions of this study. While modelling the cylindrical steel pipe-like pile system in the defined marine environment system, 2-main models and 5-sub models for each main model based on differentiation of external forces consisting of wave forces, sediment and liquefied soil motions for both axially compressed and non-compressed pile are developed setup. Wave-induced hydrodynamic pressures and flow velocities around the pile and horizontal displacements and the Von-Mises stresses varying along steel pile are analyzed seperately for each developed model. Such resulting parameters are evaluated and correlated by using the multi-regression analysis.

**Keywords** Dynamics of Marine Piles, Combined Pile Loads, Dynamic Model Solving with Abaqus, Liquefied Soil as Non-Newtonian Fluid.

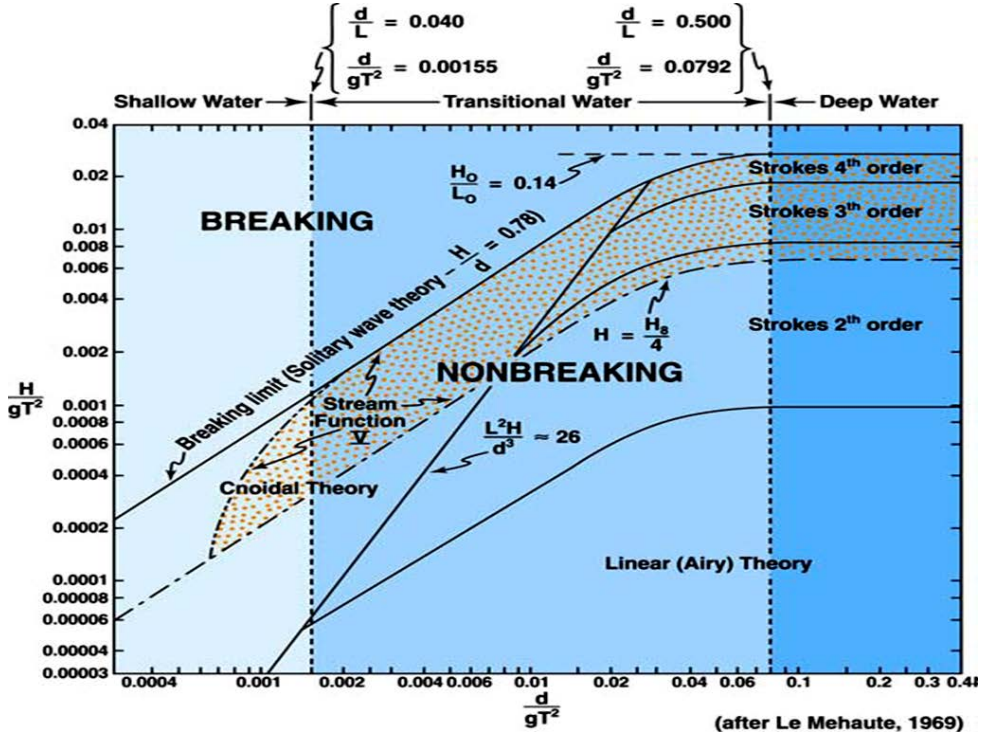
**2019, 172 pages**



## 1. GİRİŞ

Rıhtım kazıklarının etrafında oluşan dalga-kökenli hidrodinamik etkilere yönelik çalışmalar literatürde yer almaktadır. Karasız akış olarak modellenen dalga hareketi karşısında silindirik kazıklar üzerinde hidrodinamik kuvvetler; farklı dalga teorilerine göre teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bu dalga teorileri; küçük genlikli ve sonlu genlikli olarak iki ana grupta toplanmaktadır. Dalga istatistiğine yönelik analizlerde tasarım dalga parametreleri (dalga yüksekliği ve periyodu) oluşma olasılıklarına ve risk değerlerine göre farklılıklar göstermektedir. Kazıkların inşaa edileceği derinliğe yönelik olarak da tasarım parametreleri değişmektedir. Kazıklara etkiyecek hidrodinamik kuvvetlerin hesabında ise tasarım parametreleri büyük önem arz eder.

Tasarım parametreleri ise dalga teorilerine bağlı olarak değişim gösterir. Dalga teorilerinin geçerlilik bölgelerini belirleyen Le Mehaute diyagramında (Şekil 1.1), bir inşa derinliğindeki kazıkların istatistiksel analizleri göz önüne alındığında kazığın faydalı ömrü içerisinde birden farklı dalga teorisinin etkisinde kalacağı  $d/gT^2$  ve  $H/gT^2$  oranlarına bağlı olarak belirlenebilmektedir.



Şekil 1.1. Dalga teorilerinin geçerlilik sınırları [1].

Aynı derinlikte karşılaşılabilecek farklı tasarım parametreleri, farklı teorileri geçerli kılacak, bu da farklı dalga parçacık hız ve ivmelerinin kazık boyunca değişen hidrodinamik kuvvetlerini ortaya çıkaracaktır. Faydalı ömrü içerisinde gerçekleşmesi muhtemel tasarım parametrelerine ve dolayısıyla hidrodinamik kuvvet değişikliklerine göre silindirik çelik rıhtım kazıklarını tasarlamak ve projelendirmek gerekmektedir. Akışkan-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde yaygın kullanılan ABAQUS destekli hidrodinamik modelleme, böylesi problemlerin çözümünde de etkin olarak kullanılmaktadır.

Çelik-silindirik rıhtım kazıklarının inşaa edileceği deniz ortamında;

- Hidrolik-hidrodinamik yüklerin,
- Gemi yanaşma yüklerinin,
- Deprem yüklerinin,
- Rıhtım operasyonel yüklerinin,
- Yanal zemin yüklerinin,

etkin rol oynadığı saptanmıştır. Akışkan-yapı etkileşimini esas alan analizlerde ise hidrolik-hidrodinamik ve yanal zemin yükleri esaslı rol oynamaktadır. Hidrolik ve hidrodinamik yüklerde; akışın kararlı ya da kararsız olması, yanal zemin yüklerinde ise zeminin elastik yaylı ya da sıvılaştan olması akışkan-yapı etkileşim modellerinde karar verilecek olgulardır.

Sonuç olarak denilebilir ki bir çelik- silindirik rıhtım kazığının akışkan-yapı etkileşim modelinde kazık boyunca değişen su ve zemin hareketlerinin dinamik modelleme gereği ortaya çıkmaktadır. Bu modelleme; SDOF ve MDOF fonksiyonlarıyla geliştirilecek hareket denklemlerinin analitik olarak ya da sonlu farklar, sonlu elemanlar, sınırlı elemanlar ve sonlu hacimler yöntem esaslı yazılımlar (ANSYS-FLUENT, FLOW 3D, STAR CCM, ABAQUS, COMSOL, vb) kullanılarak nümerik olarak yapılabilmektedir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

İncelenen Doktora/Yüksek Lisans tezleri, akademik makaleler ve uygulama projelerinden kendi tez konumuza kaynak olabilecek çalışmalar seçilmiş ve son yıllarda yapılan çalışmalara ağırlık verilerek güncel konular incelenmiştir. Yapılan literatür taraması; silindirik rıhtım kazıklarına, akışkan ortamına ve sıvılaştan zemin ortamına ilişkin olarak üç ana grupta değerlendirilmiştir.

### *Rıhtım Kazıklarına İlişkin Literatürler:*

Fan ve Gazates (1991), kinematik davranış üzerinde, kazık grubu yerleşim biçimiyle kazıklar arası mesafenin etkisinin az olduğunu bağıl zemin-kazık rijitliklerinin ve kazık başlığının sabitlenmesinin ise daha önemli olduğunu tespit etmişlerdir [2].

Sadek ve Shahrour (2004), Sonlu Elemanlar yöntemi kullanılarak deprem yüklerine maruz kazıkların dinamik davranışı üç boyutlu olarak nümerik modellenmiştir. Analitik modellemesinde ise elastik zemine gömülü tekil kazığın kolon analizinde olduğu gibi yoğunlaşmış kütle ile tanımlanması ve Tek Serbestlik Dereceli dinamik hareket denklemi ile çözümlenmesi yoluna gidilmiştir. Deprem yükleri de dinamik dış yükleme olarak alınmış ve kazığın dinamik davranışı incelemiştir. Analiz sonucunda da kazık kesme kuvvetlerinde ve eğilme momentlerinde azalma olduğunu bulguları ortaya konulmuştur [3].

Sadek ve Shahrour (2005), çalışmalarında hem düşey hem de eğik kazıklar dikkate alınmış, zemin ise lineer değişen elastik yaylarla tanımlanmış ve kazığın mesnetlemesi ise sağlam kayaya oturan uç kazığı biçiminde tanımlanmıştır. Deprem yükü etkisinde kolon benzeri kazığın yoğunlaştırılmış kütleli dikkate alınarak Tek Serbestlik Dereceli analitik çözümleme yapılmıştır. Çözümleme sonucunda kazık iç kuvvetleri hesaplanmıştır ve bulgular büyüklük olarak kıyaslanmıştır [4].

Tamiş (2006), çalışmasında kohezyonsuz zeminlerdeki rıhtım kazıklarının, statik ve dinamik yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Hesaplamalarda düşey

statik yük olarak rıhtım platformundan gelen yükler, yatay dinamik yük olarak da dalga etkisiyle ortaya çıkan yükleri almıştır [5].

Çimen vd. (2009) yaptıkları çalışmada; zemini çoklu tabakalı ve farklı cinsten oluşacak biçimde ele almışlar ve onbir adet farklı zemine gömülü tekil kazıkların deprem dış dinamik yükü altında Tek Serbestlik Dereceli Sisteme göre nümerik (Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu-Katı Modelleme) çözümlemesi yer almaktadır. Zemin-kazık etkileşim modelinin nümerik çözümlemesinde ise Zaman Tanım Alanında Dinamik Analiz Yöntemi (Time History Analysis) kullanılmıştır. Sayısal modelleme sonucunda iki eksen doğrultusunda (yatay ve düşey) maksimum kazık yer değiştirmeleri ve kazık taban kesme kuvvetleri belirlenmiştir [6].

Şahin (2011) çalışmasında ise gemi pervanesinin dönüşü ve ortaya çıkan su jetinden kaynaklanan dış kuvvetler etkisindeki silindirik rıhtım kazıklarında oluşan dinamik davranışlar incelenmiştir. Çalışmada, kazıklar ana kayaya rijit olarak mesnetlenmiş kolon biçiminde tanımlanmıştır. Kazık etrafında oluşan akış ortamının tanımlanması; gemi pervanelerinden çıkan su jetinin dairesel kesitli duvar jetine benzetilmesi biçimindedir. Su jeti ve kazık dinamik davranışı modellemesi için fiziksel model kullanılmıştır. Deney esnasında; bir su tankında dairesel kesitli su jeti ve silindirik kesitli-rijit mesnetlenmiş kazık etrafında oluşan akışkan parametreleri ölçülmüştür. Kazık ve su jetinin konumu değiştirilmeksizin farklı hızdaki su jetinin kazık etrafında oluşturduğu akış incelenmiştir. Kazık etrafında ve jet eksenini boyunca kazığın memba ve mansabında değişen akışkan hızı ve kazık yüzeyindeki kayma gerilmeleri ölçülmüş ve kazık etrafındaki dağılımları ortaya konulmuştur [7].

#### *Akışkana İlişkin Literatürler:*

Ghoreishy ve arkadaşları (1998), 3-Boyutlu Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile non-lineer akışkan ortamındaki polimer eriyiklerinden müteşekkil silindirik bir cisim ele alınmışlardır. Kuvvet fonksiyonlu olarak Navier-Stokes denkleminin çözümlenmesinde Standart Galerkin tekniği, sayısal analizde ise Newton-Raphson denklemini kullanmışlardır. Nümerik modelleme deneysel verilerle eşleştirilerek doğrulanması yoluna gidilmiştir [8].

Gedik (1998) çalışmasında hem düzenli dalgaların hem de çoklu tekil dalga biçiminde tanımlanması yerine istatistiksel olarak tanımlanan düzensiz dalgaların etkisindeki kazıkların statik analizinin yapılması yoluna gidilmiştir. Kazıklara etkiyen düzenli veya düzensiz dalga kuvvetlerinin en uç değerlerini dikkate alarak farklı yük kombinasyonlarında statik çözümler elde etmiştir [9].

Marn ve arkadaşları (2001), Sonlu Farklar Metodu ile çözümlenen Non-Newtonyen akışkanlarının akış analizi ve Sonlu Hacimler nümerik modeli çalışmasında, sıkıştırılmaz akışkanların grid ve ağ yapılarının (mesh) test edilmesi ve sıkıştırılmaz akışkanlarda sonlu farklar ve sonlu hacimler metodlarının uygunluklarının incelenmesini yapmışlardır [10].

Dhiman ve arkadaşları (2006) yaptıkları araştırmada kare geometrili bir silindire dik olan ve kuvvet fonksiyonlu akışkanın kararlı akışını incelemişlerdir. Akışkan olarak polimer solüsyonları alınmış ve non-Newtonyen karalı akışın kuvvet fonksiyonu ifadeleri çıkarılmıştır. Kaymaya karşı kalın kıvamlı akışkan akışı, farklı Reynolds sayıları, kuvvet fonksiyonu indisleri ve basınç-sürtünme katsayılarının toplamı biçiminde ifade edilen sürüklenme kuvvet katsayıları kullanılarak modellenmiş ve bulgular araştırmalarında sunulmuştur [11].

Bharti ve arkadaşları (2007), kuvvet fonksiyonlu sıkıştırılmaz akışkanın ısıtılmış dairesel silindir etrafından kararlı akışı modellemiş ve momentum-termal enerji denklemleri geliştirilerek Sonlu Hacimler Metodu (SHM) ile nümerik analiz yapılmıştır. Akışkan ortamı non-uniform kartezyen gridleriyle tanımlanmış, Reynolds ve Prandtl sayıları belirlenerek akışa dik yerleştirilmiş ve üzeri ısıtılmış silindirik yüzeyden geçen akış modellenmiştir [12].

Gücüyen ve arkadaşları (2010) çalışmalarında düzensiz dalgaların çoklu tekil dalgaların kombinasyonları biçiminde tanımlanması ve enerji spektrum (Hızlı Fourier Dönüşümü-Fast Fourier Transform) yöntemi ile çoklu sinüzoidal dalgaların süperpoze edilmesi yoluna gitmişlerdir. Dış dinamik yükler; dalga yüküne ek olarak rüzgâr ve deprem yüklerin varlığı dikkate alınmışlardır. Bu birleşik yükler etkisindeki tekil bir kazıkta oluşan dinamik analiz; analitik olarak Tek Serbestlik Dereceli Sistem (TSDS) ve nümerik olarak bilgisayar destekli SAP 2000-Zaman Tanım Alanında

(ZTA) analiz yöntemleri kullanılarak yapmışlardır. Tekil kazığın doğal (serbest) ve dış yük (zorlama) frekanslarının büyüklükleri hesaplanmış ve tınlaşım olabirliliği incelenmişlerdir [17].

Janela ve arkadaşları (2010), ana damarlarda kan akışının modellenmesinde; genellikle kaymaya karşı ince kıvamlı akışkanın Newtonyen akışı dikkate alınırken bu çalışmada ince kıvamlı akışkan, viskoelastik cidarlı yüzey olarak tanımlanan damarlar ve toksiotropi esas alınarak modelleme yoluna gidilmiştir Carreau-Yasuda genelleştirilmiş Newtonyen model kullanılarak çözümlene yapılmıştır. Akış etkisiyle elastik davranış gösteren damarlardaki deformasyon, Akışkan-Yapı Etkileşim Modeli (AYEM) ile belirlenmiş ve grafikler şeklinde sonuçlar izah edilmiştir [13].

Mehmood ve arkadaşları (2017), kare kesitli bir cisim etrafında oluşan 2 boyutlu kararsız akışı incelemişler ve farklı non-Newtonyen akışkanlar için Navier-Stokes bağıntılarının çözümlenmelerini yapmışlar ve akışkanın basınç-hız özelliklerinin değişimlerini incelemişlerdir [14].

Azhdari ve arkadaşları (2017), helisel boruların içindeki non-Newtonyen akışkanların akışını, viskoz akışkanlar için kuvvet fonksiyonlu denklem ve boru için elastik cidarlı kabulü esas alarak boru içi hız ve basınç değişimlerini, boru cidarındaki kayma gerilmelerini ve ikincil akışları incelemişlerdir. Hem kaymaya karşı ince hem de kalın kıvamlı akışkanlara ilişkin farklı modeller üzerinde çalışmalarını yürütmüşlerdir [15].

Haza (2018), yaptığı çalışmada volkanik kökenli ve su-çamur-çakıllı zemin akışının (Lahar akışın) modellenmesini yapmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) için bir yazılım geliştirilmiş, laboratuvar çalışmalarından lahar akışa yönelik parametrelerin belirlenmesi ile laharın reolojik verileri elde edilmiştir. Viskoz sıkıştırılmaz olarak modellenen akışkan için kütle ve momentum korunumu bağıntılarına dayalı benzetim modeli gerçekleştirilmiştir. Boyutsuz Reynolds, atalet ve sürüklenme kuvvet katsayılarıyla köprü ayaklarında karşılaşılan non-Newtonyan akış ANSYS-Fluent yazılımıyla ve HAD tekniğiyle çözümlenmiştir [16].

### *Sıvılaştan Zemine İlişkin Literatürler:*

Ordu ve Özkan (2006) yaptıkları çalışmalarında; deprem etkisine maruz ve iki tabakalı zemine gömülü kazıkları ele alınmışlar ve zemin tabakaları arasındaki yüzeyde oluşabilecek ani değişimlerin olması durumundaki kazık içsel kuvvetleri incelemişlerdir. İki farklı tabakalı zemin profili içerisinde kazık gruplarının yapısal analizleri dikkate alınmıştır. Çalışmalarında zemin profilinin çoklu tabaka olarak tanımlanması durumundaki kazığa etkiyen deprem yükünün neden olduğu kazık kesme kuvvetleri ve kazık bünyesindeki momentlerin büyüklüklerinin değişimi ortaya koymuşlardır [18].

Uzuoka ve arkadaşları (2007) çalışmalarında sıvılaştırmış bir zemine gömülü olarak tasarlanmış olan kazık gruplarının dinamik davranışlarının incelendiği görülmüştür. Binanın temelinde yeralan ve temel yapısına bağlantılı olarak tasarlanan grup kazıkları, üç boyutlu tanımlanan zemine gömülü olarak modellenmiştir. Yapının yanal yer değiştirme etkisiyle zeminin de yanal yer değiştirmeye zorlandığı, başlangıçta akıcı zemin katmanının başında ve tabanında kazıkların atalet direncinin, hareketin devam etmesinde ise atalet etkilerinden ziyade kinematik etkilerin ortaya çıktığı tesbit edilmiştir [19].

Avcı (2008) çalışmasında ise sıvılaştan zeminde yüzen kazık gruplarının inşaa edilmesi durumunda, bu kazık gruplarına etkiyecek dinamik yüklerin eşdeğer statik yükler cinsinden tanımlanmasının uygulanabilirliğini incelemiştir. Tez çalışmasında, Plaxis paket programı dinamik modülü kullanılmış olup dinamik yüklere maruz kazık gruplarının deformasyonları hesaplanmış ve bu deformasyonların kullanılmasıyla geri hesap yapılmıştır. Dolayısıyla, kazık grubunda aynı deformasyonları yaptıracak eşdeğer statik yükler bulunmuştur. Sonuç olarak, dinamik etkilerin de hesaba katıldığı karmaşık yazılımların kullanılmadığı durumlar, üst yapı esaslı yüklere maruz sıvılaştan zeminlerdeki grup kazık biçimli temel tasarımında doğması muhtemel dinamik kuvvetlerin eşdeğer statik yük cinsinden uygulanabilirliği belirlenmiştir [20].

Bozkurt (2011) yaptığı çalışmada; suya doygun kil zemine gömülü olarak inşa edilen yüzen kazık gruplarına etkiyen dinamik yüklerin, eşdeğer statik yükler

cinsinden ifadesinin yapılabilirliğini incelemiştir. Avcı (2008) nın çalışmasına benzer olarak bu çalışmada da Plaxis paket programı dinamik modülü kullanılmıştır. Üst yapının dinamik yükler etkisindeki deformasyonunun kazık gruplarında neden olduğu deformasyona eşdeğer bir statik yükün araştırılması yoluna gidilmiştir. Dinamik etkilerin de hesaba katıldığı programların kullanılmadığı durumlarda, üst yapı kökenli yüklerle maruz kil zeminlere gömülü grup kazık tipi temellerin tasarımlarında; dinamik kuvvetlerin eşdeğer statik yük cinsinden uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Çalışmada; zemin mukavemeti  $c_u=0,1 \text{ kg/cm}^2$  olan zeminde 6,0 büyüklüğüne kadar olan depremler için kazık gruplarından temele etkileyen eşdeğer statik düşey yükün %120 arttırılarak kullanılabilceği ve aynı şekilde zemin mukavemeti  $c_u=0,8 \text{ kg/cm}^2$  olan zeminde aletsel büyüklüğü 6,0 ve 8,0 arasında değişen depremler için grup kazıklı temele etkileyen eşdeğer düşey statik yük %280 arttırılarak kullanılabilceği vurgulanmıştır [21].



### 3. KAPSAM

Rıhtım kazıkları, çevresel ve fonksiyonel yüklerin etkisinde tasarlanmaktadır. Üç aşamada bu tasarım gerçekleştirilebilir. 1.aşama: deniz suyunun yoğunluğundan kaynaklanan hidrostatik yükler, dalga-akıntı ve askı yükü etkisinde hidrodinamik yükler, akıcı zeminden kaynaklanan yanal zemin yükleri ile rıhtım öz ağırlığı ve rıhtım üstyapısından kaynaklanan elleçleme yükü ve taşıt yükleri dikkate alınarak rıhtım kazıkları dinamik analiz hesapları yapılmaktadır. 2.Aşama: kazık tasarımında yük analizine ek olarak kazık-platform taşıyıcı yapı tipi, kazık kesit geometrik tipi ve yapı malzemesi tipi belirlenmektedir. 3.Aşama: hidrodinamik-geometrik-yapısal analiz yöntemleri analitik ya da nümerik olarak belirlenmektedir.

İskele tarzı yapılaşmanın olduğu ve kargo elleçleme-yolcu hareketi olan limanlardaki kazıklı rıhtımlarda, yat turizmi için gerekli yürüme-yanaşma iskelelerinde, manevra amaçlı dolfinlerin tasarımında kazıklar deniz ortamında kullanılmaktadır. Çevresel etkilere maruz oldukları için hidrolojik-meteorolojik, geoteknik ve deprem yüklerine ilişkin verilerin mevsimsel değişimlerinden, etütlerden ve çözüm metodolojisinde kullanılacak yazılımların gereksinimi olacak parametrelerden müteşekkil veri setinin öncelikle belirlenmesi, bu çalışmaların başlangıcında öncelikle yerine getirilmelidir. Dolayısıyla bir veri analizi sonrası belirlenecek tasarım parametrelerine göre bu çalışmada değinilecek ve konu edilecek nümerik analiz işlemleri yapılması icap eder.

Bu çalışmanın sonucunda; nümerik analiz tekniğiyle dinamik modellenecek rıhtım kazığının tasarımında etkili olacak çevresel ve yapısal parametrelerin, boyutlandırılmada ne kadar önem derecesine sahip oldukları ve kullanılacak tasarım yükünün içindeki her bir parametrenin ağırlık oranlarının ne kadar oldukları tasarım öncesi ve tasarım esnasında ortaya çıkmış olacaktır. Dolayısıyla tesis edilecek bir kazıklı rıhtım ya da iskelede doğabilecek çevresel-yapısal yük kökenli hasarların önlenmesi, kazıkların nümerik yolla dinamik analizlerinin yapılmasıyla bir ölçüde önlenmiş olunacaktır.

#### 4. AMAÇ

Derinlikle değişen yoğunluklu veya sabit yoğunluklu dalgalı akış ortamında ki, zaman içinde farklı değerler alabilen dalga parametrelerinin neden olduğu dalga kuvvetler etkisindeki ve sıvılaştıran ve/veya sıvılaştırmayan belli bir tabaka kalınlığındaki zemin sürüklenme kuvvetleri etkisindeki kazık ya da kazık gruplarının etrafındaki hidrodinamik oluşumların ve dinamik davranışlarının belirlenmesine dolayısıyla tasarım-projelendirme–kazık ek yerlerinin analizi gibi hususlarda büyük yarar sağlayacağı ifade edilebilir. Tezin amacının belirlenmesinde bugüne değin yapılan spesifik çalışmalarda görülmüştür ki; her bir çalışma esas aldığı modele has silindirik rıhtım kazıklarının modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kendine has (spesifik) nümerik modeller; karalı akış, karasız akış, sıvılaştıran zemin, dalgalı ortam, sediment taşınımı gibi dış etken etkisindeki silindirik kazıklara göre yapılmıştır.

Bu çalışmada; hidrodinamik ve geoteknik kökenli dış etkenlere maruz çelik-silindirik rıhtım kazıklarının etrafında oluşan akış ve dinamik modellenmesi yapılmıştır. Nümerik modellemede dış etkenlerin kombinasyonu olarak: lineer-non lineer dalgalar ve bu dalgalardan kaynaklanan hidrodinamik kuvvetler, askı yüküne bağlı olarak değişen yoğunluklu akışkanın neden olduğu hidrodinamik kuvvetler ve sıvılaştıran zeminin neden olduğu sürüklenme kuvvetleri dikkate alınmaktadır. Yapılan modellemede ise farklı teoriye dayanan dalga kökenli hidrodinamik kuvvetlere değişen yoğunluklu bir sediment ortamının varlığı dâhil edilerek, dinamik davranışının değişiminde yoğunluk değişiminin etkisi hem hidrodinamik hem de yapısal parametrelerle ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak *değişken yoğunluklu ve lineer/non-lineer dalgalı akış ile sıvılaştıran ya da sıvılaştırmayan zemin hareketine maruz rıhtım kazıklarının hidrodinamik-yapısal modellenmesi ABAQUS yazılımıyla entegrasyonunun yapılmış olması, rıhtım kazıklarının hem eksenel yüklü hem de eksenel yük hariç durumları dikkate alınarak akışkan hız ve basınç parametreleri ile yer değiştirme ve gerilme parametreleri karşılaştırılmış olması ve derinlik, hız, basınç, yer değiştirme, gerilme parametrelerini esas alan çoklu regresyon bağıntılarıyla birinci ve ikinci mertebe teorilerine dayalı olarak hesaplanabilen silindirik çelik kazığın cidar gerilmelerinin karşılaştırılmış olması, bu çalışmanın özgün değeri olarak ifade edilebilir.*

## 5. RIHTIM KAZIKLARI

### 5.1 Kazıkların Fiziksel Özellikleri

Rıhtımların inşasında kazık ya da kazık gruplarının tercih edilmesi; ya dolgu rıhtımların uzatılmasında veya yüksek eğimli kıyı zonlarında ani derinleşmelerin olması durumunda ya da çevresel açıdan dolgu rıhtım yapımı yerine iskelelerin inşasının daha uygun olacağı durumlarda söz konusu olmaktadır. Kazık ya da kazık gruplarının kullanılmasının teknik açıdan da zorunlu olduğu durumlar da olabilir. Bu durumlar; ya zemin yüzüne yakın tabakaların istikrarlı olmadığı, gevşek olduğu veya yapı yüklerinden dolayı meydana gelecek olan zemin oturmalarının kabul edilebilir mertebelerde olmadığı durumlar olarak izah edilebilir. Diğer taşıyıcı sistemlerin taşıma kapasitelerinin uygun olmadığı böylesi durumlarda da kazıklı taşıyıcı sistemler (kazıklı rıhtımlar-iskeleler) kullanılarak yüzeysel temel yerine derin temel teknolojisi kullanılabilir [6]. Dolayısıyla kazık ya da kazık gruplarıyla tesis edilecek temellerin, üst yapıdan gelen yükleri zemine güvenli bir şekilde aktarabilecek boyutlarda olması, zemin-kazık taşıma kapasitelerinin aşılmasını ve kazıklara etkiyen üstyapı kökenli yükleri, dalga-rüzgar-deprem gibi çevresel yükleri taşıyabilecek boyutlarda olması istenir.

Rıhtım kazık ya da kazık grupları imal edildikleri malzemenin cinsine göre 4 gruba ayrılır: *Ahşap Kazıklar*; günümüzde kullanım alanı kısıtlı olarak kullanılabilir. Dış etkilere dayanımı zayıf ve bakımı zordur. *Betonarme Kazıklar*; fore kazık olarak yerinde dökme ya da prefabrik olarak imal edilirler. Hesaplamalar ek olarak imalatta karşılaşılabilecek dinamik çakma kazık formülleri dikkate alınmalıdır. *Çelik Kazıklar*; sıkça kullanılan kazık tipidir. İnşasında; su altı kaynak teknolojisine ve çaprazlı birleşimlerde bulonlamaya ihtiyaç duyulur. *Kompozit Kazıklar*; çelik boru tipi dış cidar ve I profilli çekirdek yapısına ek olarak çekirdek-dış cidarın betonla inşaa edilmesi durumunda kullanılır. Son yıllarda en çok tercih edilen yapı tipidir.

Çelik kazıkların kullanımında korozyon tehlikesi önemli bir etken olarak karşılaşılmaktadır. Bu nedenle, çelik kazıkların bakım maliyetleri yüksektir. Kazıkların örselenmiş zeminlerde ve dolgu zeminlerde gömülü olması durumunda tabii zeminlere nazaran oksijen oranları daha yüksek olduğunu durumlarda ve su

yüzeyindeki dalgalanma ile ıslanan kazık yüzeyinin olduğu ortamlarda, korozyon önleme yöntemleri kullanılarak bakım yapılmalıdır [5]. Rıhtım kazıklarında su altında kalan deniz taban zeminlerindeki korozyon için örselenmeden ziyade dalgalar korozyonda daha etkilidir.

Çelik kazıkları korozyona karşı direncini arttırmak için; kazık et kalınlığının artırılması, kazığın dalga ıslanma bölgesindeki yüzeyinin beton ile kaplanması, sözkonusu bölgede katodik boya uygulanması, korozyona neden olan zeminin ıslah edilmesi, çeliğe anti-korozit madde ilave edilmesi, kazık taşıma kapasitesine yönelik olarak çelik sınır gerilmesinin düşük seçilmesi, korozyona uğrayacak bölgeye boya ve kaynamış katran sürülmesi yoluna gidilmektedir [6, 22].

## 5.2 Kazıkların Çevresel Yükleri

Bu çalışmada kullanılan rıhtım kazıklarının boyutlarına, yüklemelerine ve taşıma kapasitelerine ilişkin kıstaslarda; Kıyı Yapıları ve Limanlar Planlama ve Tasarım Teknik Esasları - T.C.Ulaştırma Bakanlığı" yönetmeliği esas alınmıştır[23].

Kazıklı rıhtım yapılarının tasarımları [23]; kazıklı rıhtım yapılarının betonarme plaklardan (tabliyelerden) , tabliye altı ızgara biçimli ve kazık üst başlığı olarak kullanılabilen betonarme kirişlerinden ve derin temel olarak tasarlanan kazıklardan müteşekkildir. Tabliye altı kirişler ve tabliyeler, yerinde dökme betonla kompozit duruma getirilmek kaydı ile yerinde dökme teknolojisiyle imal edilirler. Tabliye ve tabliye altı ızgara kiriş sisteminin; süsaj yüklerini, dalga-rüzgâr-deprem kuvvetlerini ve gemi yanaşma yüklerini kazıklara güvenle aktarabilecek boyutlarda ve yatay düzlemde yeterli dayanıma sahip olması gerekmektedir. Genellikle düşey kazık ya da kazık grupları kullanılmakta olduğu, eğik kazıkların çakmadan kaynaklanan problemlerden dolayı sınırlı tercih edildiği görülmektedir.

Çelik boru kazıkların tabliyeye yerinde dökme imalatından dolayı monolitik bağlantıları, ıslanma bölgesi boyunca içten boru ile kompozit olarak çalışan betonarme tapalarla veya boruların dıştan düğüm noktasına kompozit olarak birleştirilmesi ile sağlanabilir. Silindirik çelik boru tipi kazıklar ile tabliye altı betonarme kirişler arasında yatay-düşey eksenlerde doğacak yük transferini

sağlayacak ve ara yüzeydeki içsel kuvvetleri (eksenel ve kesme kuvvetler ile momentleri) güvenle aktarabilecek uygun bağlayıcı elemanlar kullanılmalıdır.

Rıhtım ve iskeleler, yanaşma çizgisi boyunca uygun uzunluklu anolar halinde inşasına ve her bir anonun boyutunun belirlenmesinde de; çevresel yükler ile deprem yüklerinin statik-dinamik analiz sonuçlarına ve ısı genleşme hesaplarına bağlı olarak karar verilebilir. Anoların olabildiğince yekpare (monolitik) olmasına çalışılmalıdır. Anolar arasında boyuna doğrultudaki farklı yer değiştirmelere olabildiğince izin verecek derz boşlukları bırakılmalı, enine doğrultuda ise yatay kuvvetlerin bir anodan diğerine aktarılmasını sağlayacak dış benzeri takoz ve iç içe geçmeli elemanlar kullanılmalıdır [23].

Tabliye altı kazık başlıklarının tesis edildiği kirişlerde beton kalitesi en az C40 ve tabliyenin ise beton kalitesi en az C30 olmalıdır. Tabliye elemanları ile kazıkların kesit hesapları betonarme taşıma gücü ilkesine göre olmalıdır. Betonarme elemanlar için TS-500, çelik elemanlar için ise Çelik Yapı Yönetmeliği ya da ilgili uluslararası standartlar kullanılmalıdır.

Analizin dört unsuru olarak; kazık geometrisi ve malzemesi, dalga özellikleri, zemin özellikleri ve mühendislik hesap esasları sıralanabilir. Kazık geometrisi ve malzemesi dikkate alındığında görülecektir ki kazıkların düşey ve eğik konumda olması, kazık gruplarının biçimlendirilmesi, kazıkların malzeme cinsleri ve kazıkların çakma veya yerinde yapım tipi olması gibi faktörlerle karşılaşılmaktadır. Dalga özelliklerinde ise sinüzoidal dalga ve random dalgalar yer almaktadır. Sinüzoidal dalgalarda birçok dalga teorisi ile karşılaşılmaktadır. Zemin özelliklerinde temelde kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerle, diğer taraftan elastik, elasto-plastik ve plastik zeminlerle karşılaşılmaktadır. Mühendislik hesap esaslarında ise stabilite analizi, statik ve dinamik analiz esasları yer alır. Dinamik analiz için tek ve çok serbestlik dereceli sistemler dikkate alınmaktadır [23].

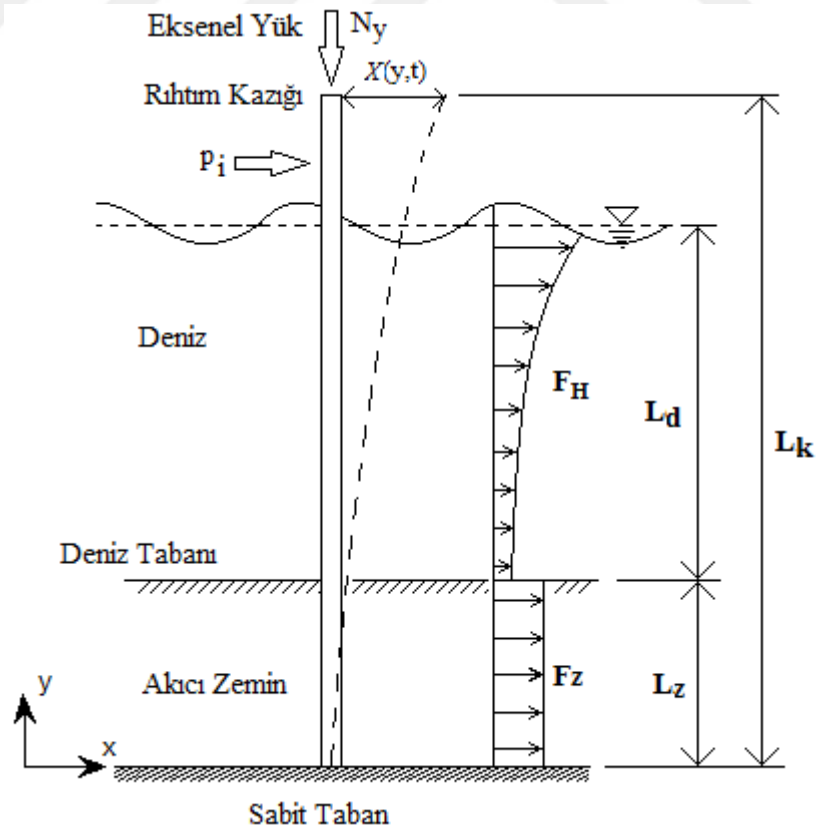
## 6. MATEMATİKSEL MODELLEME

### 6.1 Rıhtım Kazıklarının Hareketine İlişkin Matematik Model

Tekil rıhtım kazıklarının dinamik dış yükler etkisinde salınımı genelleştirilmiş kütle, sönüm, rijitlik ve dış yük denklemleri aracılığı ile hesaplanabilmektedir. Kazığa ait parametreler sabit olabildiği gibi konumla değişen de olabilmektedir. Bu durumda yapı boyunca parametrelerin konuma göre integrali alınarak denklemler genelleştirilir. Böylece salınım fonksiyonu konumla ve zamanla değişen şekliyle elde edilmiş olur. Yer değiştirme fonksiyonu konum ve zamana bağlı terimlerle ayrıştırılırsa [24-27];

$$X_D(y,t) = \psi(y)X(t) \quad (6.1)$$

bağıntısıyla izah edilir. Burada  $\psi(y)$  konumla ifade edilen biçim (shape) fonksiyonu ve  $X(t)$  ise zamanla ifade edilen titreşim fonksiyonudur (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Tekil rıhtım kazığı ve etkiyen yükler.

Genelleştirilmiş tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi [24,28];

$$m^* \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + c^* \frac{\partial X}{\partial t} + k^* X(t) = F^*(t) \quad (6.2)$$

şeklinde dinamik formda yazılabilmektedir. Elde edilen genelleştirilmiş denklemin analitik veya nümerik çözümlenmesi yapılabilmektedir. Hareket denkleminin parametreleri konuma ve zamana bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$m^* = \int_0^{L_k} m_s(y) \psi(y)^2 dy + \frac{N_y}{g} \quad (6.3)$$

$$c^* = a_1 E \int_0^{L_k} I_m(y) \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^2 dy \quad (6.4)$$

$$k^* = E \int_0^{L_k} I_m(y) \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right)^2 dy - N_y \int_0^{L_k} \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 dy \quad (6.5)$$

$$F^*(t) = \sum p_i(t) \psi_i(y) + \int_0^{L_z} F_z(y,t) \psi(y) dy + \int_0^{L_d} F_H(y,t) \psi(y) dy \quad (6.6)$$

Burada;  $m_s$  : Yapısal kütleli,

$m^*$  : Genelleştirilmiş kütleli,

$c^*$  : Genelleştirilmiş sönümü,

$k^*$  : Genelleştirilmiş rijitliği,

$X_D$  : Yer değiştirmeyi,

$a_1$  : Sönüm katsayısını,

$F^*(t)$  : Dış yükü,

$g$  : Yerçekimi ivmesini,

$\gamma_d$  : Deniz suyu birim hacim ağırlığı,

$N_y$  : Eksenel yükü,

$E$  : Elastisite modülünü,

$I_m$  : Ataleti momentini,

- $L_d$  : Su derinliğini,  
 $L_k$  : Kazık boyunu,  
 $p_i$  : x-yönünde tekil kuvveti,  
 $F_D(y,t)$ : Hidrodinamik sürüklenme kuvvetini,  
 $F_I(y,t)$ : Hidrodinamik atalet kuvvetini,

göstermektedir.

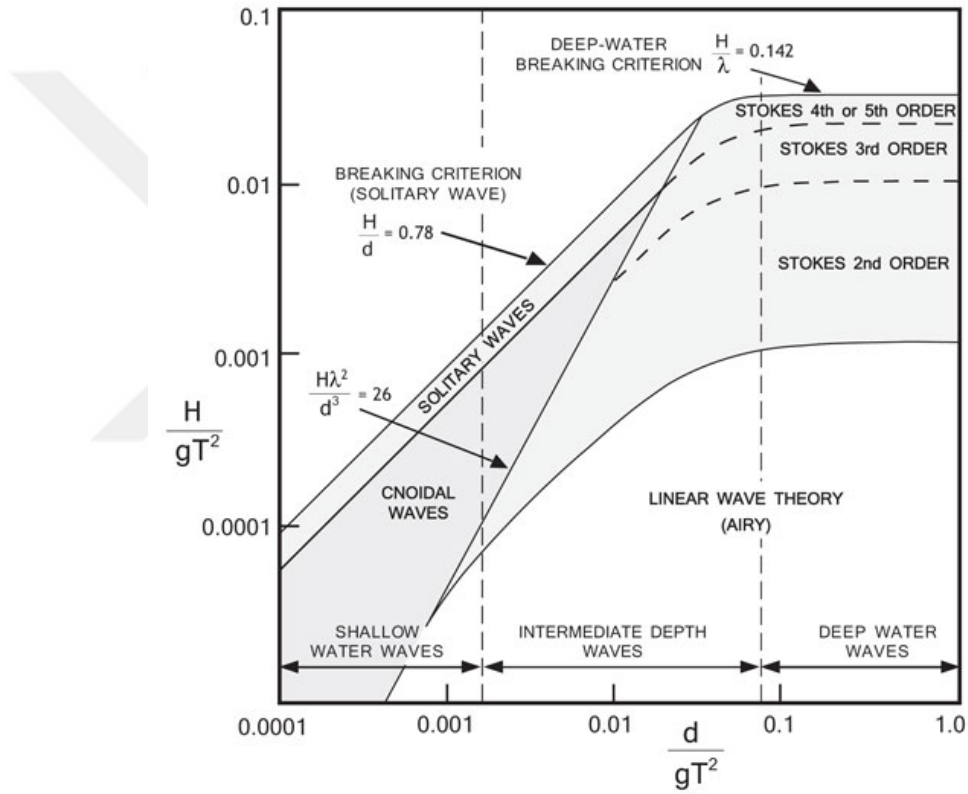
Rıhtım kazığının genel hareket denkleminde bağı olarak etken akışkan hızı doğrultusunda yapacağı yer değiştirmenin konum ve zamana göre değişimi nümerik modelleme ile ABAQUS ortamında akışkan-yapı etkileşimi sağlanarak hesaplanabilmektedir.



## 6.2 Dalga Hareketine İlişkin Matematik Model

### 6.2.1 Dalga Teorileri

Uygun dalga teorisi seçiminde, çevresel parametreler olarak tanımlanan kazığın inşaa edildiği ortamdaki su derinliği ( $d$ ), dalgaların kıyıya ilerlemeleri esnasındaki modifikasyonu sonrası kazığın inşaa edileceği derinlikteki dalga yüksekliği ( $H$ ) ve aynı derinlikteki dalga periyodu ( $T$ ) etken olarak alınmaktadır. Kıyı yapılarının tasarımında özellikle kazık analizinde herbir kazığın bulunduğu derinlikteki dalga parametreleri kullanılarak uygun dalga teorisini elde etmek mümkündür[29,30].



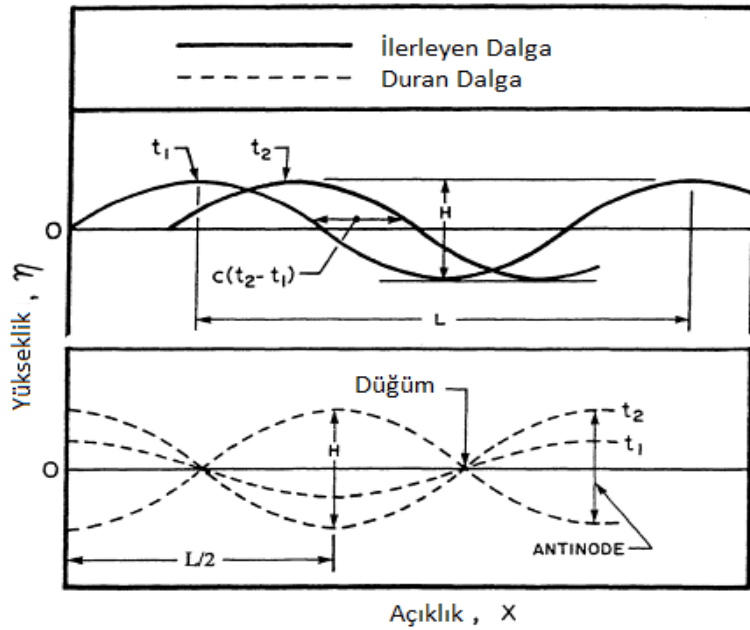
Şekil 6.2. Dalga teorilerinin geçerlilik sınırları [1].

Bütün dalga teorileri dalgaların periyodik ve üniform olduğunu kabul eder (Şekil 6.2). Periyot ( $T$ ), dalga tepesinin bir dalga uzunluğu kadar mesafeyi kat etmesi için gereken zamandır. Dalga yüksekliği ( $H$ ) ise iki dalga arası çukur ile dalga tepesi arasındaki dikey mesafedir. Dalga boyu ( $L$ ), dalganın yayılım yönünde birbirini izleyen dalgaların benzer noktaları arasında ölçülen yatay mesafedir. Periyodik bir dalga için tepe noktasının veya çukur noktasının hızı yayılım hızı olarak adlandırılır. Bu hız basit şekilde

$$c = \frac{L}{T} \quad (6.7)$$

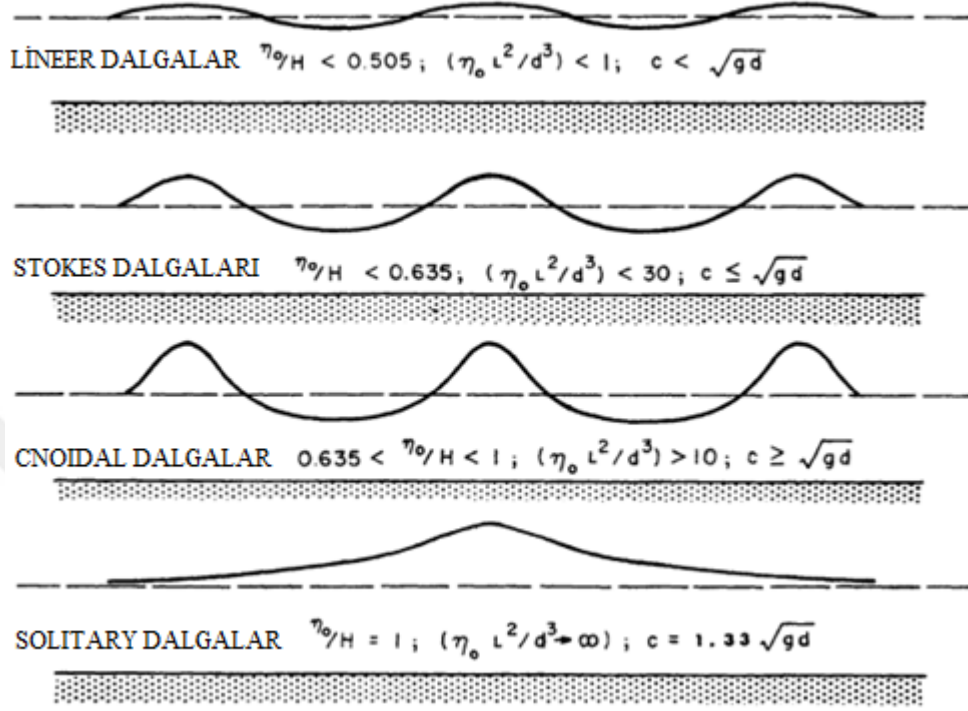
olarak verilir.

Dalgalar XY düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmiştir ve derinliği ( $d$ ) yatay olarak kabul edilir. Burada  $d$  mesafesi deniz tabanından durgun su seviyesine olan mesafedir. Dalgalar pozitif  $x$  yönünde ilerler. Bu noktada, duran bir dalga ve ilerleyen bir dalga arasındaki farkı anlamak uygun olur. Şekil 6.3'e bakarak fark anlaşılabilir. İlerleyen dalga, verilen bir hızda  $x$  ekseninde hareket eder. Dalga özellikleri aynı kalır. Diğer tarafta, duran dalgada su yüzeyi ilerleme yapmadan iki sabit nokta arasından dikey olarak dalgalanma yapar. Duran bir dalganın iki tane ilerleyen dalganın (genliği ve periyodu aynı olan) birleşiminden oluştuğu söylenebilir. Ama aynı hızda ve ters yönlerde hareket etmeleri neticesinde net hareket sıfırdır, geriye sadece dikey dalgalanma kalır. Verilen bir noktada, duran dalga  $x$  ekseninde bir döngüden diğerine aynı miktarda dalgalanma yapar. Böylece bir nokta maksimum dikey dalgalanmayı yapar ve dalganın gövdesini oluşturur. Diğer nokta düşey yer değiştirme yapmaz ve düğümü oluşturur. Duran bir dalgada birçok gövde ve düğüm oluşur. Genelde bu tip dalgalara liman haznesi, göller, laboratuvar haznesi gibi sınırlı sularda rastlanır [31].



Şekil 6.3. Açık ve kapalı sularda dalga tipleri [31].

Bir dalga hareketi genelde  $H$ ,  $T$ ,  $d$  parametreleri ile ifade edilir. Herhangi bir dalga teorisi için problem akım alanına mahsus olan hız potansiyelini bulmaktır. Şekil 6.4'de farklı dalga teorileri için su yüzü profilleri görülmektedir.



Şekil 6.4. Deniz dalgalarının su yüzeyi profili [32-34].

Sınır değer problemi iki boyutlu olarak özetlenirse;

$$\text{Diferansiyel (Laplace) denklemi: } \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (6.8)$$

$$\text{Taban sınır koşulu: } y=-d \text{ için } \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (6.9)$$

Serbest yüzey kinematik koşulu:

$$y=\eta \text{ için } \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (6.10)$$

Serbest yüzey dinamik koşulu:

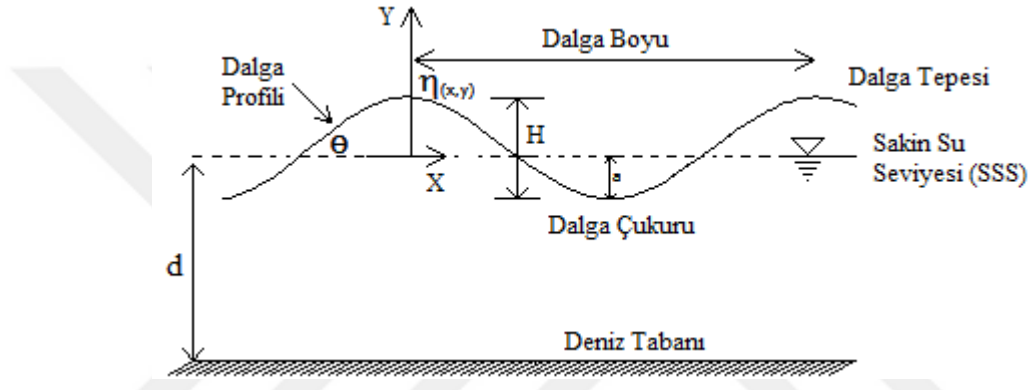
$$y=\eta \text{ için } \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 - \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad (6.11)$$

bağıntıları elde edilebilir. Burada  $\Phi$  hız potansiyelini göstermektedir.

Potansiyel fonksiyon, Laplace denklemini ve üç sınır koşulunu sağlamak zorundadır. Bu problemin çözümü zordur. Çünkü serbest yüzey sınır koşulları non-lineerdir ve sürekli olarak değişen bir yapıya sahiptir [29,35].

### 6.2.1.1 Stokes-1 Dalga Teorisi

Bütün dalga teorileri, dalgaların periyodik ve üniform olduğunu kabul eder. Dalga periyodu  $T$  ve dalga yüksekliği  $H$  için dalga formu Şekil 6.5'te görülmektedir.



Şekil 6.5. Lineer dalga parametrelerinin genel tanımı

Dalgalar  $x,y$  düzleminde iki boyutlu olarak düşünülür. Deniz tabanı örselenmemiş ve  $d$  derinliğinde yatay bir tabaka olarak kabul edilir. Burada  $d$  mesafesi deniz tabanından durgun su seviyesine olan mesafedir. Dalgalar pozitif  $x$  yönünde ilerler.

Bir dalga hareketi genelde  $H,T,d$  ile ifade edilir. Herhangi bir dalga teorisi için problem, akım alanına mahsus olan hız potansiyelini ( $\Phi$ ) veya aynı şekilde akım fonksiyonu ( $\Psi$ ) bulmaktır. Stokes-1 (Lineer) dalga teorisinin ayrıntılı hesaplamaları ve formüller Chakrabarti [37] tarafından verilmiştir [37]. Buna göre su yüzü profili ( $\eta$ ) denklem (6.12) ve dalga boyu ( $L$ ) denklem (6.13) de verildiği gibi hesaplanabilmektedir [38-40].

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta \quad \left\{ \Theta = (kx - \omega t), k = \frac{2\pi}{L}, \omega = \frac{2\pi}{T} \right. \quad (6.12)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (6.13)$$

Denklem (6.13)'de görüldüğü gibi dalga boyu  $T$  ve  $d'$  ye bağlı olarak hesaplanabilmektedir.

X ve Y yönlerindeki akışkan parçacığının hızları;

$$\text{Yatay hızı: } u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (6.14)$$

$$\text{Dikey hızı: } v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (6.15)$$

olarak ifade edilir. Burada  $s$  deniz tabanından itibaren yüksekliği göstermektedir.

Aynı şekilde parçacığının x ve y yönündeki ivmeleri [37];

$$\text{Yatay ivmesi: } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta \quad (6.16)$$

$$\text{Dikey ivmesi: } \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos \Theta \quad (6.17)$$

şeklinde ifade edilir.

Deniz tabanında oluşan hidrodinamik basınç ( $p$ ) birinci mertebeye göre denklem 6.18 de verilmektedir.

$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \cos \Theta \quad (6.18)$$

### 6.2.1.2 Stokes-2 Dalga Teorisi

Stokes ikinci mertebeye dalga teorisi için potansiyel hız aşağıdaki gibi yazılır [37].

$$\Phi = \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 \quad (6.19)$$

Burada  $\Phi_1$  ve  $\Phi_2$ 'nin çözümü  $k$  katsayısının  $2k$ ,  $\Theta$  katsayısının  $2\Theta$  olması dışında Chakrabarti, [37]'de verilen  $\Phi_1$  için yapılan çözüme benzer formda olmalıdır [37]. Serbest su yüzünde sınır şartlarının ve uygun başlangıç şartları uygulanması ile su yüzeyi profili;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh ks}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\Theta \quad (6.20)$$

Derin su dalga profili;

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \Theta + \frac{\pi H^2}{8L} \cos 2\Theta \quad (6.21)$$

X ve Y yönlerindeki akışkan parçacığının ikinci mertebeye hızları;

$$\text{Yatay; } u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\Theta \quad (6.22)$$

$$\text{Düşey; } v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin \Theta + \frac{3}{4} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\Theta \quad (6.23)$$

şeklinde ifade edilir. Su parçacığının ivmeleri basit şekilde yukarıdaki ifadelerin zamana göre türevi alınarak hesaplanabilir;

$$\text{Yatay; } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \Theta + \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\Theta \quad (6.24)$$

$$\text{Düşey; } \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sin ks}{\sinh kd} \cos \Theta - \frac{3\pi^2 H}{T^2} \left( \frac{\pi H}{L} \right) \frac{\sinh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\Theta \quad (6.25)$$

Buradan su parçacığı yer değiştirme denklemleri, Stokes İkinci Mertebe Teorisi için türetilebilir. Dinamik basınç denklemi, Bernoulli denkleminde tamamlanmasıyla  $\Phi_1$  ve  $\Phi_2$  çözümlerinden elde edilir [37].

Deniz tabanında hidrodinamik basınç denklemi sadece dalga etkileri dikkate alınarak aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} p = & \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta + \frac{3}{4} \rho g \frac{\pi H^2}{T} \frac{1}{\sinh 2kd} \\ & \times \left[ \frac{\cosh 2ks}{\sinh^2 kd} - \frac{1}{3} \right] \cos 2\Theta - \frac{1}{4} \rho g \frac{\pi H^2}{T} \frac{1}{\sinh 2kd} \\ & \times [\cosh 2ks - 1] \end{aligned} \quad (6.26)$$

Dalga hızı veya yayılma hızı ise ikinci mertebenden aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$c^2 = \left( \frac{g}{k} \tanh kd \right) \times \left( \frac{\pi H}{T} \right)^2 \times \left( \frac{9 - 8 \cosh^2 kd + 8 \cosh^4 kd}{8 \sinh^4 kd} \right) \quad (6.27)$$

### 6..2.1.3 Stokes-3 Dalga Teorisi

Stokes üçüncü mertebe dalga teorisi için potansiyel hız aşağıdaki gibi yazılır [41].

$$\Phi = \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 + \varepsilon^3 \Phi_3 \quad (6.28)$$

Burada  $\Phi_1, \Phi_2$  ve  $\Phi_3$  'ün çözümü  $k$  katsayısının  $2k$  ve  $3k$ ,  $\Theta$  katsayısının  $2\Theta$  ve  $3\Theta$  olması dışında Chakrabarti, [37]'de verilen  $\Phi_1$  için yapılan çözüme benzer formda olmalıdır [37].

Serbest su yüzünde sınır şartlarının ve uygun başlangıç şartları uygulanması ile su yüzeyi profili;

$$\begin{aligned} \eta = \frac{H}{2} & \left\{ \left( 1 + \frac{H^2}{64} k^2 \frac{1}{\sinh^4 kd} (2 \cosh^4 kd + 10 \cosh^2 kd - 9) \right) \cos \Theta \right. \\ & + \frac{H}{8} k \frac{\coth kd}{\sinh^2 kd} [2 + \cosh 2kd] \cos 2\Theta \\ & \left. + \frac{3H^2}{256} k^2 \frac{1}{\sinh^6 kd} [1 + 8 \cosh^4 kd] \cos 3\Theta \right\} \end{aligned} \quad (6.29)$$

Dalga hızı veya yayılma hızı üçüncü mertebenden;

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} \left( 1 + \frac{H^2}{64} k^2 \frac{1}{\sinh^4 kd} (8 \cosh^4 kd - 4 \cosh^2 kd + 5) \right) \quad (6.30)$$

Üçüncü mertebe su partikül hızları [41];

$$\begin{aligned} u = c & \left\{ \frac{\pi H}{L} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \Theta + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{L^2} \left( \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\Theta \right. \right. \\ \text{Yatay;} & \left. \left. + \frac{1}{3 \sinh^2 kd} \right) + \frac{3}{64} \frac{\pi^3 H^3}{L^3} (13 - 4 \cosh^2 kd) \right. \\ & \left. \times \frac{\cosh 3ks}{\sinh^7 kd} \cos 3\Theta \right\} \end{aligned} \quad (6.31)$$

$$\begin{aligned} v = c & \left\{ \frac{\pi H}{L} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin \Theta + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{L^2} \frac{\sinh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\Theta \right. \\ \text{Düşey;} & \left. + \frac{3}{64} \frac{\pi^3 H^3}{L^3} \frac{13 - 4 \cosh^2 ks}{\sinh^7 kd} \sin 3\Theta \right\} \end{aligned} \quad (6.32)$$

şeklinde ifade edilir. Su parçacığının ivmeleri basit şekilde yukarıdaki ifadelerin zamana göre türevi alınarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir;



$$\text{Yatay; } \frac{\partial u}{\partial t} = -c \left\{ \frac{2\pi^2 H \cosh ks}{LT \sinh kd} \sin \Theta + \frac{3\pi^3 H^2}{L^2 T} \left( \frac{\cosh 2ks}{\sinh^4 kd} \sin 2\Theta \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{9 \pi^4 H^3}{32 L^3 T} (13 - 4 \cosh^2 kd) \frac{\cosh 3ks}{\sinh^7 kd} \sin 3\Theta \right) \right\} \quad (6.33)$$

$$\text{Düsey; } \frac{\partial v}{\partial t} = -c \left\{ \frac{2\pi^2 H \sinh ks}{LT \sinh kd} \cos \Theta + \frac{3\pi^3 H^2}{L^2 T} \left( \frac{\sinh 2ks}{\sinh^4 kd} \cos 2\Theta \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{9 \pi^4 H^3}{32 L^3 T} \frac{(13 - 4 \cosh^2 kd)}{\sinh^7 kd} \cos 3\Theta \right) \right\} \quad (6.34)$$

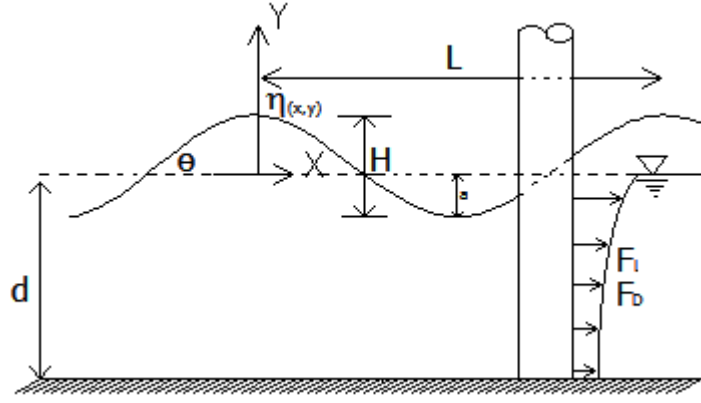
Dinamik basınç denklemi  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  ve  $\Phi_3$  çözümlerinden elde edilir ve

$$\frac{p}{\rho g d} = \frac{\tanh kd}{kd} \left[ \frac{(kH/2)^2}{4 \sinh^2 kd} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - \cosh 2ks \right) \right] \\ + \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} k(H/2) \frac{\cosh ks}{\sinh kd} - \frac{(kH/2)^3}{16} \frac{(2 \sinh^2 kd \cosh ks)}{\sinh^5 kd} \right) \\ + 3 \cosh ks \cos \Theta - \frac{(kH/2)^2}{4 \sinh^4 kd} \left[ \sinh^2 kd + \right. \\ \left. + 3 \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \sinh^2 kd \cosh 2ks \right] \cos 2\Theta + \\ + \frac{3}{64} (kH/2)^3 \frac{1}{\sinh^7 kd} \left[ 4 \sinh^2 kd \cosh ks \right. \\ \left. + \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right) (13 - 4 \cosh^2 kd) \cosh 3ks \right] \cos 3\Theta \quad (6.35)$$

olarak hidrostatik terimlerin dikkate alınmadığı şekliyle yazılır [41].

### 6.2.2 Hidrodinamik Dalga Kuvvetleri

Şekil 6.6'da, mesnetli silindirik kazığa etkiyen dalganın etkisinin belirlenmesinde kullanılacak örnek çizim gösterilmiştir. Su taneciklerinin hızları, ivmeleri, dalga akışından dolayı meydana gelen kuvvetlerin büyüklüğünü doğrudan etkiler. Düsey kazıklar için yatay akış hızı  $u$  ve ivmesi  $du/dt$  ile dalganın etkime yüzeyinin boyutları önemlidir.



Şekil 6.6. Düşey silindirik kazığa etkiyen dalga kuvvetleri

Kazık çapı ( $D$ ) ve kazığın Elastisite modülü ( $E$ ) kazık için önemli değişkenlerdir. Akışkanın önemli özellikleri için de akışkanın yoğunluğu  $\rho$  ( $\gamma/g$ ) ve kinematik viskozitesi  $\nu$  sayılabilir. Önemli bazı ölçsüz terimler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\frac{H}{gT^2} \quad \text{Birimsiz Dalga Yüksekliği} \quad (6.36.a)$$

$$\frac{d}{gT^2} \quad \text{Birimsiz Su Derinliği} \quad (6.36.b)$$

$$\frac{D}{L} \quad \text{Kazık Çapının Dalga Boyuna Oranı} \quad (6.36.c)$$

$$\frac{E}{D} \quad \text{Relatif Kazık Ötelemesi} \quad (6.36.d)$$

$$\frac{uD}{\nu} \quad \text{Reynold Sayısı} \quad (6.36.e)$$

Dalga kuvvetleri hesaplamalarında genel olarak kabul edilen oran olan, yapı birim genişliğinin ( $D$ ), dalga boyuna ( $L$ ) oranı vasıtasıyla şu şekilde sınıflama yapılabilir.

$D/L \leq 0,2$  için sürüklenme ve atalet kuvvetleri etkilidir ve Morison eşitliği kullanılacaktır,

$1,0 > D/L > 0,2$  için yansıma durumu daha etkilidir. Bu durum giderek artan bir şekilde önemli oluyorsa Difraksiyon Teorisi kullanılır.

$D/L > 1,0$  için zayıf yansıma hali daha etkilidir. Yapı deniz duvarı gibi davranır.

Bu çalışmada Morison eşitliği kullanılacak biçimde  $D/L$  oranı uygun sınırlar içerisinde belirlenmiştir. Bir akışkanın engel civarında sabit hızla yatay bir şekilde düşük hızlarda akımı esnasında yüzey sürüklenme kuvvetleri olarak adlandırılan normal gerilmeler (pratik olarak sabittirler ve teğet doğrultusundadır) ve kesme gerilmeleri oluşur. Daha yüksek hızlarda oluşan düşük basınç alanları burgaç ve çalkantıların görüldüğü engelin arka tarafı boyunca oluşur [42].

Morison [42] 'ye göre birim kazık genişliğine etki eden sürüklenme kuvveti,

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_d D u |u| \quad (6.37)$$

formülüyle ifade edilir [37]. Burada,

$C_D$  : Sürüklenme katsayısı,

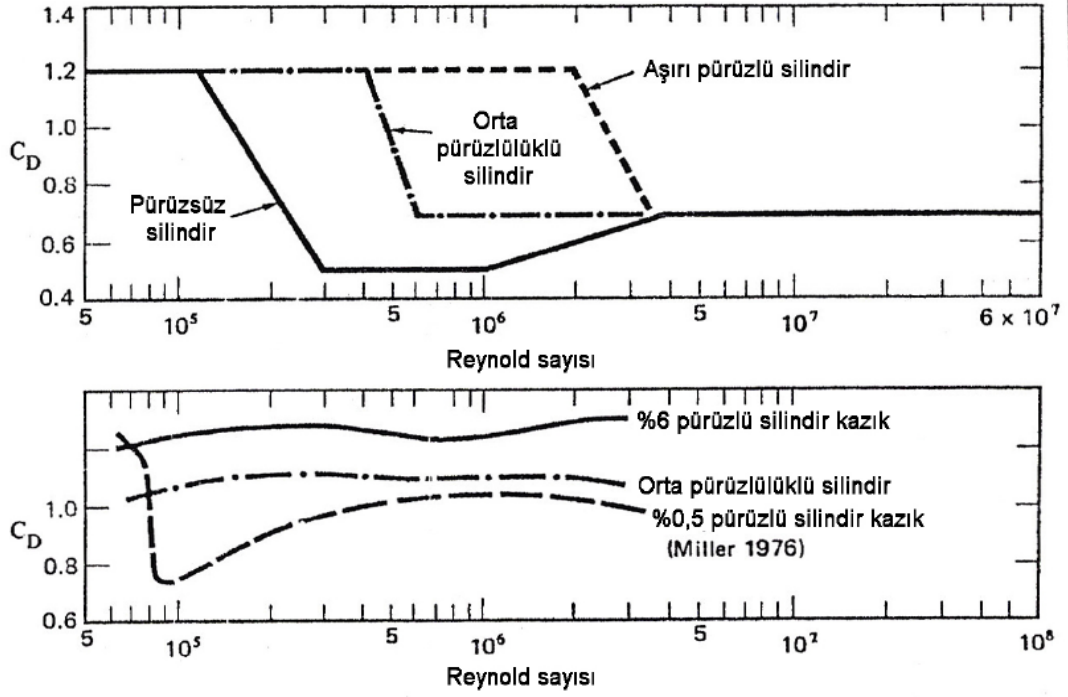
$\rho_d$  : Suyun birim hacim ağırlığı,

$D$  : Kazık çapı,

$u$  : Su taneciğinin kazık aksındaki yatay hızı

olarak tanımlanmaktadır.

Düzgün akışkanlar için  $C_D$ , kazığın şekline, boyuna, pürüzlülüğüne ve Reynold sayısına bağlıdır.  $C_D$ 'nin Reynold sayısına ve kazık çapına bağlı olarak değeri Şekil 6.7'den belirlenebilir. Şekilde verilenden daha büyük kazık çapları için, sabit hızlar için verilen  $C_D$  eğrisinden belirlenecek değerler kullanılabilir [41]. Tablo 6.1'de bazı yapısal formlar için  $C_D$  katsayıları verilmiştir.



Şekil 6.7. Reynold sayısına göre sürüklenme katsayısı [43].

Kazığa etkiyen hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesinde kullanılan Morison denkleminde; dalga hareketinin ivmesinden kaynaklanan atalet kuvveti (inertia force) ve ideal/viskoz olmayan bir akış hızından kaynaklanan sürüklenme kuvveti (drag force) etkilidir. Kazık yüzeyine teğetsel doğrultuda olan sürüklenme kuvvetlerine ilave olarak kazık üzerine bir nevi çarpma şeklinde dağılan suyun kütesinin ve ivmesinin belirlediği kuvvet olarak da tanımlanabilir [42].

Morison [42] 'ye göre birim kazık genişliğine etki eden hidrodinamik kuvvet,

$$F_I = C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6.38)$$

formülüyle ifade edilir [37]. Burada,  $C_M$ : Atalet katsayısı,  $\partial u / \partial t$ : Yatay akımın ivmesi olarak tanımlanmaktadır.

McCamy ve Fuchs [44] teorilerinde, kazık çapının dalga boyuna olan oranının küçük değerleri için,  $C_M = 2,0$  olarak bulmuşlardır [44]. Tablo 6.1'de, çeşitli araştırmacıların buldukları  $C_M$  değerleri verilmiştir. Hangi dalga teorisinin kullanılacağına belirlenmesi,  $C_D$  ve  $C_M$  katsayılarının bulunmasında en önemli

faktördür. Tablo 6.1'deki bilgiler baz alınarak,  $C_M$  için aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir.

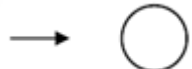
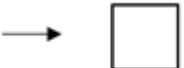

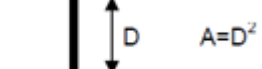
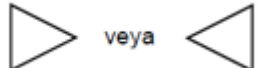

$$\text{Re} < 2,5 \times 10^5 \Rightarrow C_M = 2,0 \quad (6.39.a)$$

$$2,5 \times 10^5 < \text{Re} < 5 \times 10^5 \Rightarrow C_M = 2,5 - \frac{\text{Re}}{5 \times 10^5} \quad (6.39.b)$$

Tablo 6.1. Deneysel olarak  $C_M$  katsayısı değerlerinin belirlenmesi [43].

Yaklaşık Re Sayısı	$C_M$	Kullanılan Deneysel ve Teori Tipi
$< 3,0 \cdot 10^4$	1,50 ila 2,50	Kararsız Akış Laboratuvarı ( $A/D > 6$ )
$1,6 \times 10^5$ ile $2,3 \times 10^5$	2,26 ila 2,02	Deneysel, Tecrübe
$3,8 \times 10^5$ ile $6,0 \times 10^5$	1,74 ila 1,23	Lineer Dalga Teorisi
$5,0 \times 10^5$ büyük	1,53	Deneysel, Tecrübe, Spektrumlar
$5,0 \cdot 10^5$ büyük	$1,02 \pm 0,53$	Deneysel, Tecrübe, Stokes 3. Teorisi
$1,0 \times 10^5$ ile $2,0 \times 10^6$	1,20 ila 1,70	Deneysel, Tecrübe, Akıntı-Fonksiyon Teorisi
$5,0 \times 10^5$ büyük	$1,76 \pm 1,05$	Deneysel, Tecrübe, Nümerik/Stokes 3. Teorisi
$5,0 \times 10^5$ büyük	1,50	Deneysel, Tecrübe, Değiştir. Spektrum Analizi

Tablo 6.2. Bazı yapısal formlar için  $C_M$  ve  $C_D$  katsayısı [5].

Kesitin Şekli	$C_M$	$C_D$
	2,0	1,16
	2,5	2,05
	2,5	2,05
	1,6	1,98
	2,3	2,2
	2,2	1,55

Bu çalışmada Tablo 6.2. 'de gösterilen dairesel kesitli cisim dikkate alınarak kazık modellemesinde  $C_M$  ve  $C_D$  katsayıları sırasıyla 2,0 ve 1,16 olarak alınmıştır.

### 6.3 Sediment Hareketine İlişkin Matematik Model

Akıntı veya dalga hareketi sonucu deniz tabanında bulunan çökelmiş zemin parçacıkları hidrodinamik etkiler sonucu hareket edip yükselerek deniz suyu konsantrasyonunu değiştirmektedir. Bu konsantrasyon profili tabandan yükseldikçe üssel formda azalmaktadır. Kırca [45] 'e göre bir açık kanal akımında su hareketinin kararlı ve üniform akışından kaynaklanan ve kanal tabanındaki toplam cidar kayma gerilmesi  $\tau_0$ ,

$$\tau_0 = R \gamma_d J \quad (6.40)$$

formunda verilmektedir [45].

Burada;  $R$  : Hidrolik yarıçap ( $R=A/P$ ,  $A$ : kesit alanı,  $P$ : ıslak çevre)  
 $\gamma_d$  : Suyun özgül ağırlığını,  
 $J$  : Kanal eğimini göstermektedir.

Cidar kayma gerilmesi sürtünme hızı ( $U_f$ ) cinsinden ifade edilebilmektedir:

$$U_f = \sqrt{\tau/\rho} \quad (6.41)$$

Kanal tabanındaki kayma gerilmesi ( $\tau_b$ ) toplam cidar kayma gerilmesinden ( $\tau_0$ ) farklı olabilir. Katı madde hareketinden kaynaklanan taban kayma gerilmesi ile harekete neden olan değişkenlerin boyutsuzlaştırılmasıyla, Shields parametresi  $\theta$  elde edilmektedir [45].

$$\theta = \frac{\tau_b}{(S_k - 1)\gamma_d d_k} = \frac{U_f^2}{(S_k - 1)g d_k} \quad (6.42)$$

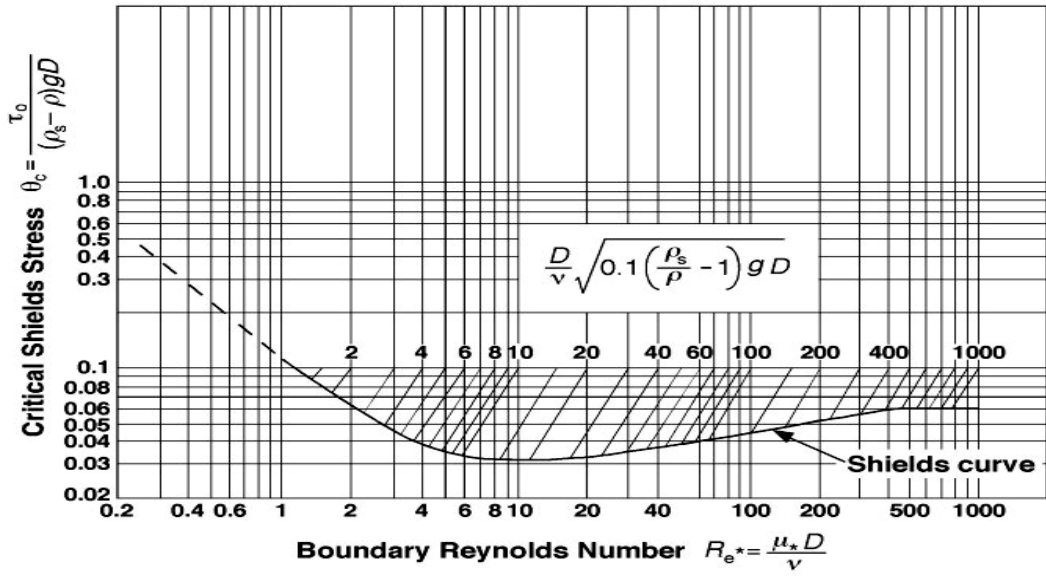
Burada;  $S_k$  : katı maddenin özgül ağırlığı, ( $S_k = \frac{\rho_s}{\rho}$ )

$g$  : yerçekimi ivmesini,

$d_k$  : katı maddenin çapını,

göstermektedir.

Tabandaki hareketin başlangıç şartı; boyutsuz kayma gerilmesi  $\theta$ 'nın kritik değere ulaşmasına bağlıdır. Bu kayma değerinin kritik değeri aşıldığında tabanda katı madde taşınım başlamaktadır. Kritik kayma gerilmesi ( $\theta_c$ ) ve Reynolds sayısının (Re) bir fonksiyonu olarak elde edilen değişimi Şekil 6.8'de verilmiştir [45-48].



Şekil 6.8. Tane Reynolds sayısı ( $Re_*$ ) ve Kritik Shields sayısı ( $\theta_c$ ) [45].

Hareket başladığı andan itibaren tabandaki yüzey şekli düz olmaktan çıkıp taban hareketinin başlamasından sonra taneler tabanda farklı boyutlarda tepeler ve çukurlar haline dönüşecektir. Taban hareketindeki sürtünmeye ek olarak, yüzey geometrisinin farklılaşmasından kaynaklanan pürüzlülük etkisiyle de akıma karşı bir direnç söz konusu olacaktır. Bu nedendir ki; taban kayma gerilmesinin ( $\tau_b$ ) iki ayrı bileşenden meydana geldikleri ileri sürülmektedir [45,49-52]:

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b \quad (6.43)$$

Burada;  $\tau'_b$  :Sürtünme direncini,

$\tau''_b$  : Şekil direncini göstermektedir.

### 6..3.1 Dalga-Sediment Etkileşimi

Deniz ortamında etkili tasarım dalgasının sığ sularda ve orta derinlikli sularda tabanda akış hızına neden olduğu bilinmektedir (Şekil 6.9). Dalganın oluşturduğu hız ( $u$ ) Stokes-1 dalga teorisi için basit formda bir sinüs fonksiyonu olarak verilebilir. Bu hız lineer dalga teorisi kullanılarak konumla ve zamanla değişen şekilde;

$$u(x,t) = \frac{H\omega}{2\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (6.44)$$

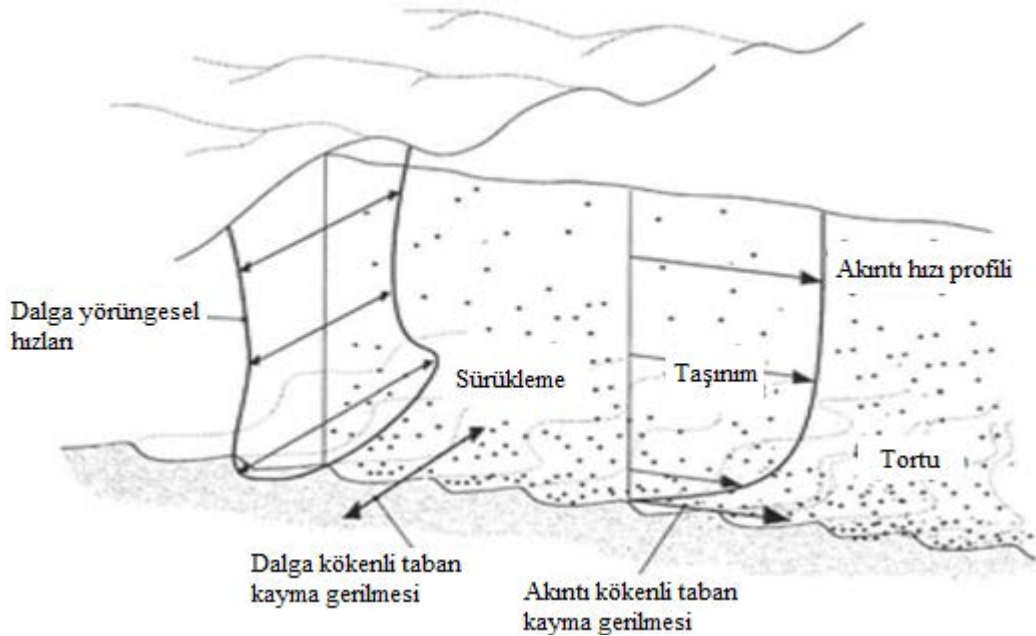
olarak ifade edilir [48-55].

Burada;

$\omega$  : Açısal hızı,

$k$  : Dalga sayısını,

göstermektedir. Diğer büyüklükler daha önce açıklandığı gibidir. Benzer şekilde diğer dalga teorileri için denklemler yazılabilir.



Şekil 6.9. Dalga ve akıntı etkisinde askıda sediment taşınımı [53-54].

Dalga etkisi altındaki sediment konsantrasyonunun derinlik boyunca değişimi genellikle üssel bir fonksiyon şeklindedir. Yapılan çalışmalarda bu fonksiyonun



tahmini için bir çok yöntem önerilmektedir [45]. Nielsen [57] 'e göre tepecikli taban rejimi üzerinde dalga etkisi altındaki sediment konsantrasyonunu hesaplayabilmek için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir [56-59]:

$$c(y) = c_0 \exp\left(-\frac{y}{L_s}\right) \quad (6.45)$$

$$L_s = \begin{cases} 0,075 \frac{a\omega}{w_s}, & \frac{a\omega}{w_s} \leq 18 \\ 1,4H_r, & \frac{a\omega}{w_s} > 18 \end{cases} \quad (6.46)$$

$$a = \frac{U_m}{\omega} \quad (6.47)$$

$$c_0 = 0,005 \theta_r^3 \quad (6.48)$$

$$\theta_r = \frac{\theta'}{\left(1 - \frac{\pi H_r}{L_r}\right)^2} \quad (6.49)$$

Burada ;

- $y$  : Tabandan itibaren yüksekliğini,
- $\theta'$  : Sürtünme direncini,
- $w_s$  : Çökelme hızını,
- $d_*$  : Boyutsuz tane çapını,
- $H_r$  : Kum tepeciği yüksekliğini,
- $L_r$  : Kum tepeciği boyunu,
- $L_s$  : Sönümlenme mesafesini,
- $\theta_r$  : Boyutsuz kayma gerilmesini,

göstermektedir [45,57]. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

### 6..3.2 Deniz Suyu Yoğunluğu- Sediment Etkileşimi

Bölgesel modeller dikey ölçek nedeniyle genellikle birkaç santimetreden küçük yüksek konsantrasyonlu tabana yakın bölgeleri çözemez. Denklemlerde kullanılacak yoğunluk dolaylı olarak bir sediment-su seyreltik karışımı olarak kabul

edilebilir. Kıyı bölgelerinde deniz suyu yoğunluğunun derinlik boyunca tuzluluk, sıcaklık ve basınç etkisindeki değişimi genellikle hesaplanabilir. Süspansiyon içindeki katı maddenin ilave etkisi aşağıdaki gibi dâhil edilebilir [60,61].

$$\rho(y) = \rho_d + c(y)(\rho_s - \rho_d) \quad (6.50)$$

Burada;

$\rho(y)$  : Sediment-Deniz suyu karışımı yoğunluğunu,

$\rho_s$  : Sediment parçacıklarının yoğunluğunu,

$\rho_d$  : Deniz suyu yoğunluğunu,

$c(y)$  : Katı madde konsantrasyonunu

göstermektedir. Bu çalışmada deniz tabanına yakın kesimlerde deniz suyunun yoğunluğunun sediment etkisiyle arttığı dikkate alınmıştır.

#### 6.4 Sıvılaştan Zemine ilişkin Matematik Modelleme

Deprem hareketine bağılı olarak ortaya çıkan sekonder (kayma) dalga yayılımı; gevşek zeminlerde devirsel kayma gerilmelerine ve suya doymun kohezyonsuz bir zeminde ise hacimsel büzülmeye neden olur. Büzülme etkisiyle sıkılaştan zemin taneleri birbirlerini iter ve bu da taneden taneye yük aktarımına neden olur. Yük transferi, boşluk suyu basıncının da artışına neden olur. Sismik sarsıntının hızlı meydana gelmesi durumunda, kohezyonsuz zemin drenajsız yüklemeye maruz kalır ve taneli zemin yapısı içinde oluşan boşluk suyu basıncının daha da artmasına neden olur. Bu yük transferinin ve basınç artışının sürmesiyle taneden taneye aktarılan temas basıncı (efektif gerilme) kaybolur ve taneli zemin hareketi; katı cisim hareketinden daha ziyade akışkan cisim hareketine dönüşür [62]. Dolayısıyla, sıvılaştan zeminde ortaya çıkan kayma gerilmeleri Denklem 6.51 ve Denklem 6.52 şartlarını meydana getirir [63]:

$$\text{Statik şartlarda ;} \quad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_s \quad (6.51)$$

$$\text{Dinamik şartlarda;} \quad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - (u_s + u_d) \quad (6.52)$$

Eğer  $(u_s + u_d) = \sigma_{v0}$  olursa  $\sigma'_{v0} = 0$  olacaktır.

Burada;

$\sigma_{v0}$  : Toplam gerilmeyi,

$\sigma'_{v0}$  : Efektif gerilmeyi,

$u_s$  : Statik durumda boşluk suyu basıncını

$u_d$  : Dinamik durumda oluşan aşırı boşluk suyu basıncını,

göstermektedir.

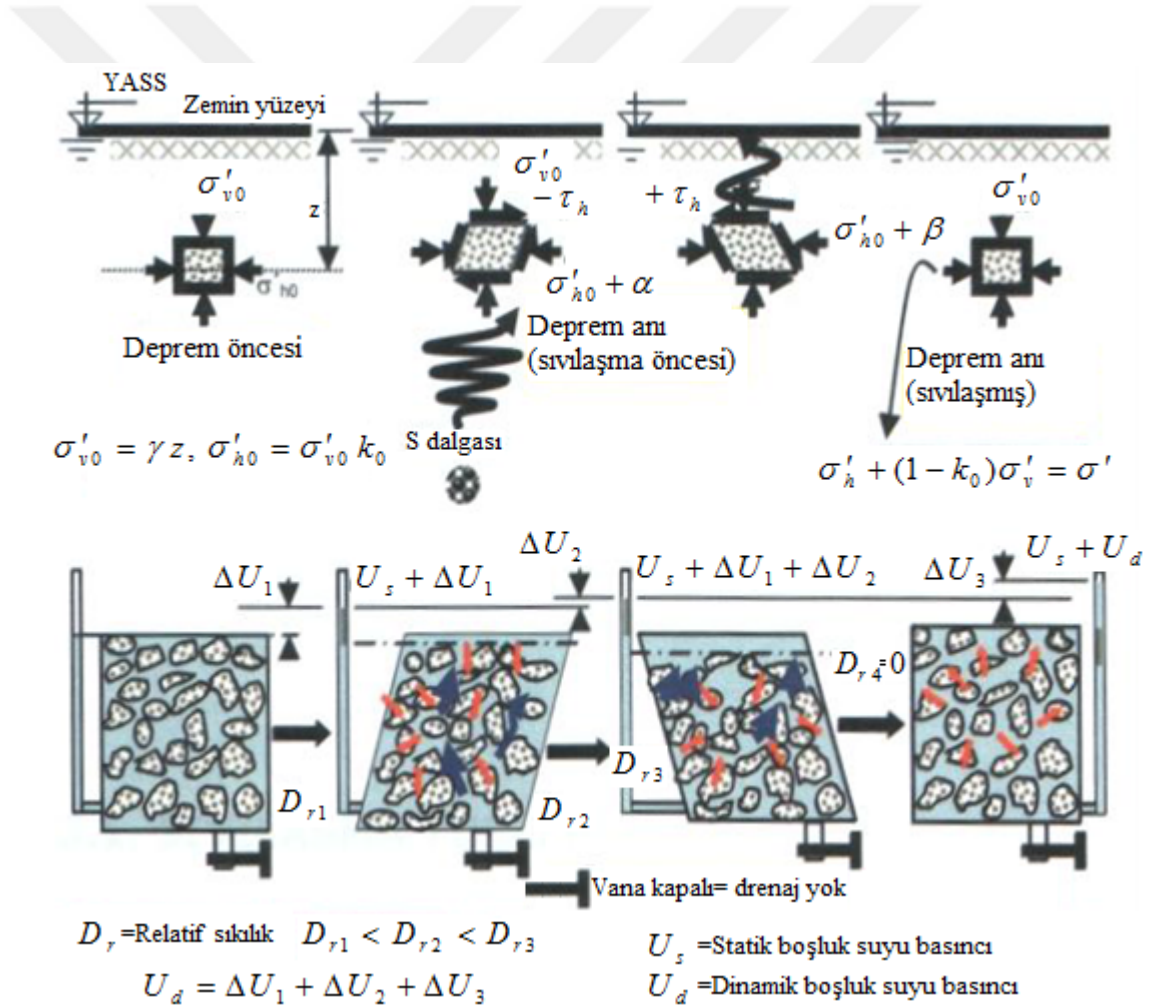
Ayrıca, sıvılaştmanın fiziksel süreci aşağıdaki şekilde şematik halde sunulmuştur (Şekil 6.10).

Zemin sıvılaştıktan sonra, aşırı boşluk suyu basıncı sönmelenmeye başlayacaktır. Zeminin sıvılaştımış halde kalma süresi iki ana faktöre bağılıdır:

- Depremden kaynaklanan sismik salınım süresine,
- Sıvılaştırılmış zeminin drenaj şartlarına.

Depremi neden olduğu tekrarlı kayma gerilmeleri yüklemesi ne kadar uzun ve güçlü ise sıvılaştırma hali o kadar kalıcı olacaktır.

Eğer sıvılaştırılmış zemin altta ve üstte kil tabakası ile sınırlanmış ise sıvılaştırılmış zeminden suyun akışı ile aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi de uzun süre alacaktır. Sıvılaştırma işleminin tamamlanmasından sonra zemin daha sıkı konumda olacaktır [62,64-67].

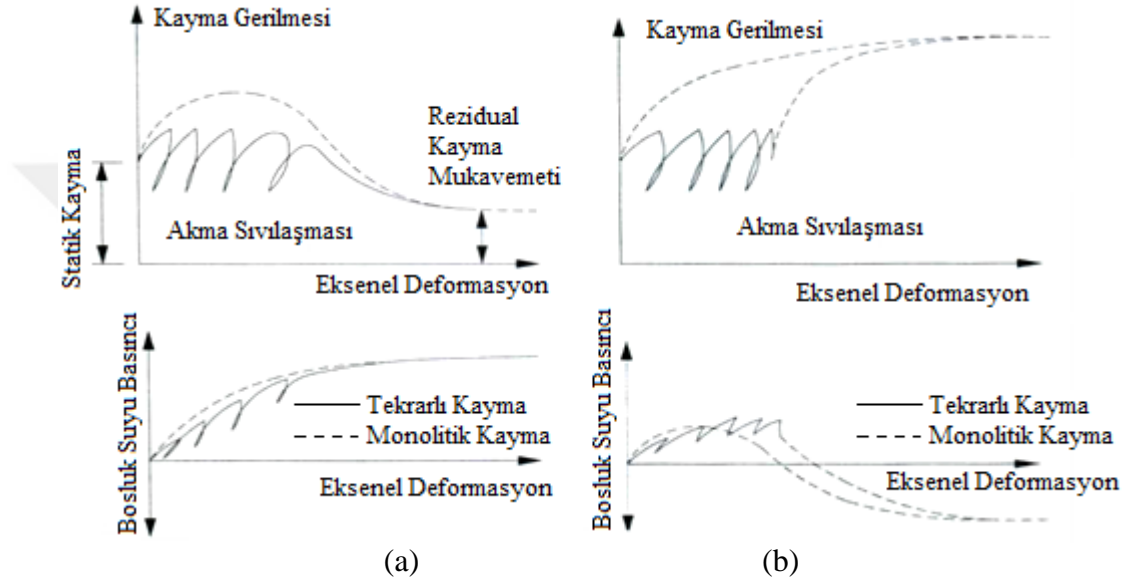


Şekil 6.10. Sıvılaştırmanın fiziksel süreci [63].

Sebebi olduğu hasarlar göz önüne alındığında iki çeşit zemin sıvılaştırmasından bahsedilebilir. Bunlar; Akma türü sıvılaştırma ve Devirsel hareketlilik (mobilité) dir.

olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada akma türü sıvılaşma üzerine modelleme yapılmıştır.

Akma türü sıvılaşma, büyük hasarların gözlemlendiği akma yenilmelerini oluşturur. Zeminin statik dengesi için gerekli kayma gerilmelerinin, sıvılaşmış zeminin dayanımından (rezidüel dayanım) büyük olduğu durumlarda oluşur (Şekil 6.11)[63].



Şekil 6.11. a) Suya doymuş gevşek zeminin drenajsız şartlarda davranışı, b) Suya doymuş sıkı zeminin drenajsız şartlarda davranışı [62].

Genellikle büyük bir zemin kütesinin metrelerce yer değiştirmesi şeklinde oluşan akma türü sıvılaşma hareket tetiklendikten sonra tamamen statik kayma gerilmeleri tarafından devam ettirilir [63]. Zemin sıvılaşmasının oluşum mekanizması göz önüne alındığında akma türü sıvılaşmada, zemin tanecikleri arasındaki temas kuvvetlerini ifade eden efektif gerilme değeri sıfıra eşitlendiği görülmektedir [63,68,69].

#### 6.4.1 Newtonyen Akışkan İçin Navier-Stokes Denklemine Dayalı Matematiksel Model

Korunum denklemleri üç boyutlu, sürekli laminer akış için Kartezyen koordinatlarda Akışkan genel süreklilik denklemi şu şekilde yazılabilir [70]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6.53)$$

Kazığa etkiyen dalga kökenli hidrodinamik kuvvet:

$$\bar{F} = \frac{1}{2} (C_{Df} + C_{Dp}) \rho D u |u| + C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6.54)$$

Sıkıştırılabilir Newtonyen akışkan için Navier-Stokes denklemi (x-bileşeni):

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \bar{F} \quad (6.55)$$

Gerilme tensörleri  $\bar{\tau}$  'nin xyz bileşenleri:

$$\bar{\tau}_x = \mu (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (6.56.a)$$

$$\bar{\tau}_y = \mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) \quad (6.56.b)$$

$$\bar{\tau}_z = \mu (\nabla \bar{w} + \nabla \bar{w}^T) \quad (6.56.c)$$

Durgun, dalgalı ve değişken yoğunluklu deniz ortamındaki sıkıştırılmaz Newtonyan akışkan için üç boyutlu Navier-Stokes denklemi:

$$\nabla(\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p_x + \nabla \bar{\tau}_x + \bar{F} \quad (6.57.a)$$

$$\nabla(\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p_y + \nabla \bar{\tau}_y + \rho g_y + N \quad (6.57.b)$$

$$\nabla(\rho \bar{w} \bar{w}) = -\nabla p_z + \nabla \bar{\tau}_z \quad (6.59.c)$$

şeklinde ifade edilir.

#### 6.4.2 Non-Newtonyen Akışkan İçin Navier-Stokes Denklemine Dayalı Matematiksel Model

Sıkıştırılmaz Non-Newtonyan akışkan için üç boyutlu birim tensör ( $I$ ) denklemi [14-70-71]:

$$I = \left(2 \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(2 \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(2 \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \quad (6.58)$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$$

Birim tensörlerinin xyz bileşenleri:

$$I_x = \left(2 \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \quad (6.59.a)$$

$$I_y = \left(2 \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \quad (6.59.b)$$

$$I_z = \left(2 \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \quad (6.59.c)$$

Viskoz gerilme tensörü:

$$\bar{\tau} = \mu \underline{\underline{\Delta}} \quad (6.60)$$

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{I}{2}\right)^{(n-1)/2} \quad (6.61)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada  $\mu$  : Kaymaya bağlı olarak non-Newtonyan akışkanın viskozitesi,

$\mu_0$  : Akışkanın kıvamı,

$n$  : Kuvvet fonksiyonu indeksi,

$\underline{\underline{\Delta}}$  : Deformasyon hız tensörü olarak tanımlanmıştır.

Kuvvet fonksiyonu indeksi:

$n < 1$ : kayma direnci zayıf ince kıvamlı akışkan

$n = 1$ : Newtonyan akışkan

$n > 1$ : kayma direnci yüksek kalın kıvamlı akışkan

olarak alınmaktadır. Bu çalışmada sıvılaştıran bir zemin için  $n > 1$  koşuluna göre ( $n \approx 2$ ) alınarak Navier-Stokes denklemler çözümlenmiştir [72-74].

Deformasyon hız tensörü üç boyutlu non-Newtonyan akışkan için:

$$\underline{\underline{\Delta}} = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2\frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6.62)$$

formunda yazılabilmektedir.

Deformasyon hız tensörünün xyz bileşenleri:

$$\Delta_x = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.63.a)$$

$$\Delta_y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.63.b)$$

$$\Delta_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2\frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (6.63.c)$$

olarak yazılabilir.

Sıkıştırılmaz Non-Newtonyan akışkan için Navier-Stokes denkleminin x-bileşeni:



$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_0 \Delta_x \left( \frac{I_x}{2} \right)^{(n-1)/2} + \vec{F}_D + \vec{F}_I \quad (6.64)$$

olarak yazılabilir.

Genel olarak sıkıştırılmaz Non-Newtonyan akışkan için üç boyutlu Kuvvet Fonksiyonlu Navier-Stokes denkleminin xyz bileşenleri:

$$\nabla(\rho \bar{u}\bar{u}) = -\nabla p_x + \mu_0 \Delta_x \left( \frac{I_x}{2} \right)^{(n-1)/2} + \vec{F} \quad (6.65.a)$$

$$\nabla(\rho \bar{v}\bar{v}) = -\nabla p_y + \mu_0 \Delta_y \left( \frac{I_y}{2} \right)^{(n-1)/2} + \rho g_y + N \quad (6.65.b)$$

$$\nabla(\rho \bar{w}\bar{w}) = -\nabla p_z + \mu_0 \Delta_z \left( \frac{I_z}{2} \right)^{(n-1)/2} \quad (6.65.c)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

## 7. NÜMERİK MODELLEME (ABAQUS YAZILIM)

### 7.1 Abaqus ile Sayısal Modelleme Esasları

Kıyı-Liman Mühendisliğine ilişkin yapıların planlama ve tasarım çalışmalarında kullanılabilecek akışkan-yapı-zemin etkileşim modelleri geliştirilmiştir. Tasarım çalışmalarında, günümüzde deneye dayalı yaklaşımların yanında etkileşim esaslı sayısal modellerin de kullanımı hızla artmaktadır [23]. Sayısal modelin;

- Akışkan-yapı-zemin etkileşim modellerinde kullanılacak modellerin daha çok dinamik simülasyon modelleri olması,
- Güvenilirlik açısından etkileşim model tabanlı sayısal yazılımların ulusal ve uluslararası uygulamalarda farklı uygulama şartları altında denenmiş olması,
- Modellemedeki kabuller gerçek ortama has olması, hesap yöntemleri nümerik analiz ilkelerine uygun olması, çözüm yaklaşımları ve doğruluk değerlerinin kanıtlı olması,
- Modellerin saha/deney ölçümlerinin var olması durumunda model parametrelerinin kalibre edilebilirliği ve kalibrasyon için saha/deney verisinin olmadığı durumlarda ise modelin kalibre edilmemiş olduğu rapor ve hesaplarda vurgulanma gerekliliği,
- Modellerin kalibre edilmeden kullanıldığı hallerde sonuçların niteliksel bir anlam taşıyabilmesi için model parametreleri bazında hassasiyet analizlerinin gerekliliği,
- Sayısal yazılımlarda kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinin özellikleri dikkate alınarak dinamik modelin hesap alanındaki zaman ve konum parametrelerine uygun olması,
- Tanımlanan hesap alanının sınır şartlarının doğru tarifi, girdilerin ve çıktılarının problemin özelliğine göre doğru belirlenmesi ve kontrol edilebilir olması,
- Çıktıların grafik/şematik gösterimler ile yorumlanabilir olması

amaçlanmaktadır.

Akışkan ve akışkan ortamındaki katı cisim parametrelerinin zamanla ve konumla değişen özelliklerinin tanımlanması amacıyla bilgisayar destekli nümerik modelleme gereği duyulmaktadır. Akışkan-Yapı Etkileşim Problemlerinin çözümünde akışkanın yapı üzerinde birtakım etkilere sahip olmasına karşın yapının da akışkan üzerinde etkileri söz konusu olmaktadır. Akışkan-yapı etkileşiminin bir arada çözümlenmesi gerekmektedir. Akışkan problemi bir ortamda, yapı problemi ise bir başka ortamda çözümlenebilir. Ancak yapısal sistemin davranışı ile akışkan hareketi bir arada değerlendirilmemiş olacaktır. Akışkan basınç değişiklikleri karşısında yapının rijitliği birbirlerini etkileyemeyecektir.

Bu amaca yönelik olarak Sonlu Elemanlar Metoduna dayalı, yüksek performanslı, tanımlanan modellere yönelik gerçekçi akışkan-yapı çözümlemesi yapabilen, güvenilir ve hassas sonuçlar üretebilen özellikle etkileşim problemlerinde aktif kullanılabilen ABAQUS programından yararlanılmıştır. Farklı malzeme seçenekleri içeren programla doğrusal olmayan analiz ve artımsal dinamik analiz yapılabilmektedir.

Paket programda ABAQUS/CAE ara yüzü ile çalışan *ABAQUS/Standard*, *ABAQUS/Explicit* ve *ABAQUS/CFD* olmak üzere üç ana çekirdek yazılımı vardır:

*ABAQUS/CAE*; interaktif bir arayüzdür. Doğrudan ve dolaylı yollarla geometri tanımlamasına, tanımlanan verilerin sadeleştirilmesine imkan sağlar. Modellemenin yanısıra çözümü takip etme, çözümü yönetme ve sonuçları inceleme işlemlerini yürütür ve tüm ön ve son işlemlerini gerçekleştirir. *ABAQUS/CAE*'de, çözüm sonuçlarının değerlendirilmesinde ya da çözümün sonlandırılmasında kolaylık vardır. *ABAQUS*'te yapılacak her tanımlama, her biri kendi içinde mantıksal alt tanımlama komutları içerecek biçimde tasarlanmış bir birim altında toplanmıştır. Bu tanımlama özelliği kullanıcıya kolaylık sağlar [75,76].

*ABAQUS/Standard* genel amaçlı kullanıma açık ve Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı bir modüldür. Bu standart; statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunlarla etkileşimli (çift-etkili) problemlerin analizlerine imkan sağlayan ve bu amaçla geliştirilmiş sayısal çözümleme yöntemlerini bünyesinde barındıran, geniş ve

gelişmiş eleman seçeneği sunan, malzeme ve temas modelleme kabiliyeti yüksek ve güvenilir Kapalı (Implicit) Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı bir çözücüdür.

*ABAQUS/Explicit* zaman esaslı akışkan/katı cisim için dinamik problemlerin modellenmesine imkân sağlayan ve sayısal çözümlenme yöntemleri içeren geliştirilmiş açık (Explicit) Sonlu Elemanlar Metodunu esas alan bir çözücüdür. Gelişmiş malzeme modelleri ve eleman kütüphanesine sahip Explicit modülü ile geniş kapsamlı monolitik malzemelerin ve karma (kompozit) malzemelerin modellenmesi mümkündür.

*ABAQUS/CFD* ileri seviyede Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsüdür. *ABAQUS/CAE* ile bütünleşik çalışmakta olup ön/son özellikleri *ABAQUS/CAE* tarafından desteklenmektedir. *ABAQUS/CFD* ile doğrusal olmayan ısı transferi ve yapı-akışkan etkileşim problemleri gibi birçok uygulamanın etkin ve gerçekçi bir şekilde modellenmesi mümkündür.

Programda yer alan modelleme, analiz ve çıktı adımları; *Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Verify, Job, Visualization ve Report* olarak sıralanabilir [75-77].

Paket programın adımlarının isimleri ve işlevleri programın yardım menüsünden veya kullanım kılavuzundan görülebileceği gibi yaygın bir yazılım olması sebebiyle daha önce yapılan çalışmalarda sıkça rastlanmaktadır. Adımlar kısaca açıklanacak olursa [77];

**Part (Parça)** kısmında geometrik parçaların oluşturulması işlemi yapılır. Üç, iki yada axisymmetric boyutlu elemanlar oluşturulabilir. Axisymmetric geometri daha çok noktasal boyutta (örneğin kum taneciğinin modellenmesinde) kullanılır. Oluşturulan geometrik parçalar deformasyona uğrayabilen, discrete rijit, analitik rijit ya da Eulerian geometri tipleri arasından seçilir. Eulerian geometri daha çok etkileşimli modellerde kullanılarak (örneğin bardaktaki suyun modellenmesi) iki çözücünün birlikte kullanılmasına gerek kalmadan modelin çözümünün daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Katı, kabuk, çizgisel ya da noktasal eleman part kısmında oluşturulabilir. Bu kısımda modele ait iki boyutlu çizim her hangi bir

çizim programındaki gibi yapılır. Daha sonra elde edilen geometriye uzatma, döndürme ve eğip-döndürme işlemleri yapılarak üçüncü boyut kazandırılır.

**Property (Özellik)** kısmında malzeme özellikleri tanımlanır. Tanımlanan malzeme özellikleri kesit oluşturularak bu kesite atanır. Malzeme atanan kesitle geometri eşleştirilerek kullanılacak malzeme geometriye atanır. Aynı geometri üzerinde farklı malzemeler tanımlanarak kompozit malzemeli modellerde oluşturulabilir. Bunun için part bölümünde geometri parçalanmalı ya da assembly bölümünde birden çok geometri birleştirilmelidir.

**Assembly (Kurma)** kısmında parçaların birbirlerine göre konumlandırılarak montajın oluşturulması işlemi gerçekleştirilir. Part kısmında oluşturulması zor olan geometriler bu bölümde birleştirilerek zor geometrik modeller oluşturulabilir. Birleştirilen elemanların istenirse birleşim bölgeleri belli olacak şekilde geometri oluşturularak tek geometriye birden çok malzeme ataması yapılabilir. Böylelikle interaction kısmında tanımlanacak temas yüzeyleri azaltılarak analiz süresi kısaltılabilir.

**Step (Adım)** kısmında analiz tipi, adımları, çıktıları, analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi tanımlanır. Bir modelde birden fazla analiz adımı tanımlanabilir ancak birbirini takip eden adımlar uyumlu olmak zorundadır. Statik analiz tipinden sonra aynı model içinde ısı transferi analizi tanımlanamaz. Bu bölümde tanımlanacak analiz tipi kullanılan çözücüyle uyumlu olmak zorundadır. Örneğin; ABAQUS/Standard çözücüsüyle Explicit analiz tipi tanımlanamamaktadır. Analizin süresi ve zaman adımları bu kısımda belirlenir. Zaman adımı içerisinde yeteri kadar iterasyon yapılamayıp çözüm elde edilemezse analiz program tarafından sonlandırılmakta ve program hata vermektedir. Çözüm sonucunda hangi çıktılarına gereksinim varsa bu bölümde istenen çıktılar belirlenir. Analizde kullanılacak çözücü ve çözüm tipi sonuçları etkilemektedir. Analiz çözücü ve çözüm tipi modellenen sisteme göre değişmektedir. Kullanılan eleman sayısı ve tipi ile uyumlu çözücü ve tipi değişmektedir.

**Interaction (Etkileşim)** kısmında Modeldeki parçalar arası temasın modellenmesi yapılır. Temas yüzeyleri master-slave olarak belirlenir. Bu yüzeyler

arasındaki sürtünme, sönüm gibi özellikler temas özellikleri kısmında tanımlanır. Modeldeki tüm geometriler temas halindeyse yüzey seçmeye gerek kalmadan tüm model seçilerek genel etkileşim tanımlanır. Akışkan ile katı cisim arasındaki temas bu kısımda tanımlanmaktadır. İki farklı model (akışkan-katı cisim) tek CAE ara yüzünde birleştirilir. Bunun için modellerden birinin başka bir CAE ara yüzünde oluşturulup içeri alınması gerekir. İki modellenli ara yüz oluşturulduktan sonra temas oluşması için Assembly kısmında her ikisinin de aynı koordinatlarda olması gerekir, aksi durumda program çalıştırıldıktan sonra hata vermektedir. Modellerde bir biriyle temas eden yüzeyler tanımlanarak Interaction kısmının Interaction Manager araç çubuğundaki Fluid-Structure Co-simulation boundary alt kısmında tanımlanan analiz tipiyle eşleştirilir. Böylelikle başka bir sınır şartına gerek kalmadan akışkanın katı cisim ile temas ettiği bölgelerdeki davranışı belirlenir.

**Load (Yük)** kısmında yükleme miktarı, tipi, başlangıç ve sınır şartları tanımlanır. Mekanik, ısıl akustik, akışkan, elektrik ve kütle aktarımı yükleme tipleridir. Step bölümünde tanımlanan analiz adımlarında bu yüklemeler yapılır. Modele farklı zamanlarda farklı yüklemeler yapılacaksa farklı analiz adımları tanımlanarak her bir adımda yapılacak yükleme modele atanır. Modelin başlangıç sınır şartları bu bölümde gerçekleştirilmektedir.

**Mesh (Ağ)** kısmında geometri üzerine istenen sayıda ve aralıkta düğüm noktası (node) atanır. Geometrinin yapısı nedeniyle bazı bölgelerde noktaları fazlaştırmak ya da azaltmak gerekebilir. Bu işlem seed edges araç çubuğunda yapılır. Noktalar birleşerek gridleri meydana getirir ve bu gridlere eleman tipi ataması yapılarak modeli oluşturan elemanlar elde edilir. Kübik, prizmatik ve kama (wedge) kullanılan eleman şekilleridir. Eleman şekli seçildikten sonra bu şekillere ve analiz tipine uygun birden çok eleman tipi program tarafından belirlenir, kullanıcı bu eleman tiplerinden probleme uygun olanı seçer. Modelde kullanılan nokta ve eleman sayısı sonuçları değiştirmektedir. Bir problem farklı nokta sayıları için çözümlenmelidir. Değişen nokta sayıları için yakınsama kontrolü yapılarak uygun nokta sayısı belirlenmelidir. Mesh kısmından Job kısmına geçmeden önce meshlerin kontrol edilmesi, problemin çözüm aşamasında meshle ilgili bir sorunla karşılaşılması için gereklidir. *Verify* mesh araç çubuğunda meshler kontrol edilerek hatalı noktalar ve hata oranları gözlemlenebilir.

**Job (İs)** kısmında çözüm yönetimi ve izleme işlemleri gerçekleşir. Bu bölümünde, görüntüleme kısmı sayesinde adım adım çözüm takip edilerek programın verdiği uyarılar ve hatalar takip edilir. Programın hata verdiği ve çözülmesi diğer hatalara göre daha zor olan hatalar, ağ (mesh) ve adım (step) hatalarıdır. Ağ hatalarından sakınmak için programın uygun gördüğü nokta aralıklarından daha büyük adımlar seçilmemelidir. Adım hatalarında ise adım aralıkları büyük tutulmamalıdır.

**Visualization (Görselleştirme)** kısmında sonuçların incelenmesi gerçekleştirilir. İstenen çıktıları ait değerler grafikler ya da renk göstergeleri kullanılarak oluşturulan görseller yardımıyla incelenir.

**Report (Rapor)** kısmında *report* araç çubuğu kullanılarak çıktılar sayısal olarak istenilen formatta kaydedilebilir.

## 7.2 Hidrolik Modelleme-ABAQUS

Akışkan karakteristiklerinin hesaplanmasında Abaqus/CFD sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır [75]. Kütle korunumu;

$$\nabla V = 0 \quad (7.1)$$

momentumun korunumu;

$$\left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \times \nabla V \right) = \nabla \sigma + \rho g \quad (7.2)$$

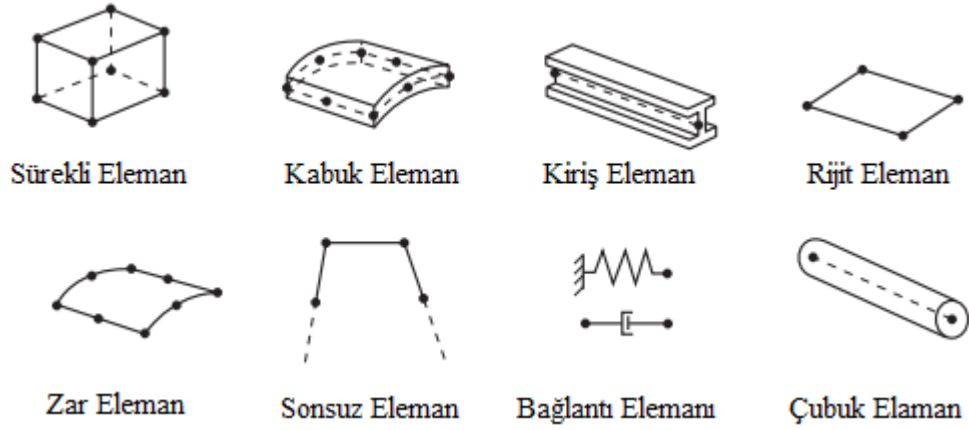
enerjinin korunumu;

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla(V(E_t + P)) = 0 \quad (7.3)$$

denklemlerinin sınır şartlarına göre sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü kullanılan yazılım ile gerçekleştirilmiştir. Denklemlerde,  $V$ : hız vektörü,  $P$ : basınç,  $E_t$ : toplam

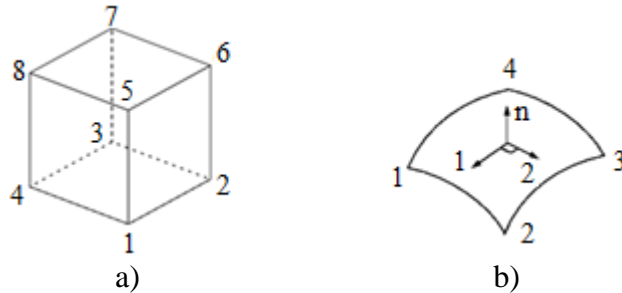
enerji,  $g$ : yer çekimi ivmesi,  $t$ : zaman,  $\sigma$ : yüzeysel gerilme,  $\rho$  ise akışkan yoğunluğudur [76-78].

Gerilme analizinde en çok kullanılan element aileleri Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Akışkan analizlerinde sürekli, 3-boyutlu (continuum-3D) elemanlar kullanılır. Eleman türleri arasındaki en büyük fark her ailenin varsaydığı geometri türüdür.



Şekil 7.1. Nümerik modellemede kullanılan eleman türleri [77].

Akışkan modellerinde kullanılan eleman geometrisi hexahedron (6 yüzlü) dür. Şekil 7.2.a'da görülen akışkan modellerinde kullanılan eleman tipi FC3D8'dir. Rıhtım kazığı modelinde kullanılan eleman geometrisi ise 4 düğümlü çift eğimli ince veya kalın kabuk (2 yüzlü) dür. Katı cisim modellerinde değişik eleman tipleri kullanılabilir. Aşağıda Şekil 7.2.b'de görülen eleman tipi belirli bir et kalınlığına sahip boru kesitli katı cisim modellerinde de kullanılan SR4'dür.



Şekil 7.2. a) FC3D8 Eleman geometrisi, b) S4R eleman geometrisi



Akışkan modellemesinde uygun olan bu elemanın adının açılımı; akışkan (F), sürekli (C, continuum) üç boyutlu (3D) ve 8 düğüm noktalı (8) şeklindedir. Temas problemleri için geliştirilmiş şekildedir. Belirli bir et kalınlığına sahip boru kesitli katı cisim modellemesinde uygun olan bu elemanın adının açılımı ise; kabuk (S), 4 düğüm noktalı (4) ve azaltılmış integrasyon (R) şeklindedir.

### 7.3 Hidrodinamik Modelleme-ABAQUS

Dalga etkisiyle oluşan akımın çizgileri boru cidarında sürtünmeye ve sınır tabakası oluşumuna, akış hızının yüksek olmasıyla da vortekse neden olmaktadır. Sürtünme etkisiyle akış yönünde sürüklenme kuvveti, ivmeli hareket nedeniyle atalet kuvveti (eklenik kütle ile birlikte), yapının etrafındaki basınç alanlarının akış diki yönlerindeki asimetrisinden hidrodinamik kaldırma kuvveti ve borunun mansabındaki vorteks asimetrisinden de vorteks öteleme kuvveti doğmaktadır. Bu kuvvetlerin doğru ve hassas saptanmasında, doğru dalga teorisine dayanan dalga hız ve ivme değerlerinin, bu teorileri doğrulayan deneysel çalışmalarda hidrodinamik kuvvet katsayılarının ve boru hareketlenmesinden kaynaklanan borunun hareket hız ve ivmelerinin doğru ve hassas tanımlanmasının önemi ve payı büyüktür.

### 7.4 Akışkan-Yapı Etkileşiminin Modellenmesi

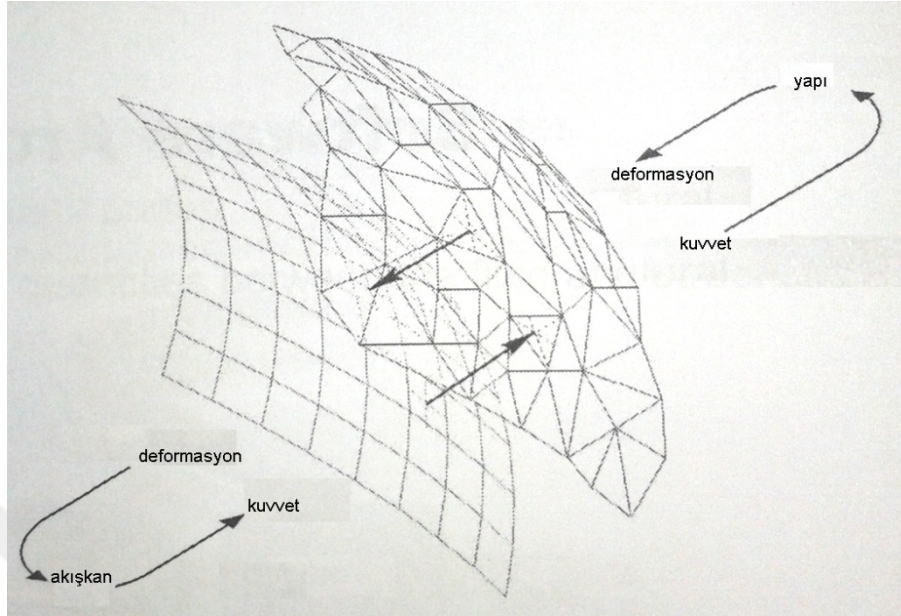
Akışkan ve yapı modellerinde temas yüzeyleri belirlenerek iki modelin birlikte çözümünde akışkandan yapıya aktarılacak kuvvetlerin ve yapıdan akışkana aktarılacak deformasyonların etki yüzeyleri belirlenmiş olur [75]. Sonlu elemanlar programı akışkan çözücüsü için aşağıdaki denklem kullanır. Denklemde “  $f$  ” alt indisi akışkanı temsil etmektedir.

$$k_f u_f = F_f(t) \quad (7.4)$$

Yukarıdaki denklemin çözümü ile yapıya aktarılacak akış kuvvetleri hesaplanır. Aşağıdaki denklem ile  $u_f$ ,

$$u_f = \{p \dot{u}_x \dot{u}_y \dot{u}_z T_a\}^t \quad (7.5)$$

şeklinde tanımlanır. Basınç ( $p$ ), hız bileşenleri ( $\dot{u}_x, \dot{u}_y, \dot{u}_z$ ), sıcaklık ( $T_a$ ) ve zamana ( $t$ ) bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 7.3. Yapı ve akışkan çözücüsünün etkileşimi [78].

Yapı çözücüsü ise akışkan çözücüde elde edilen kuvvet ile yukarıda belirtilen denklem 7.4 'e benzer şekilde; [76].

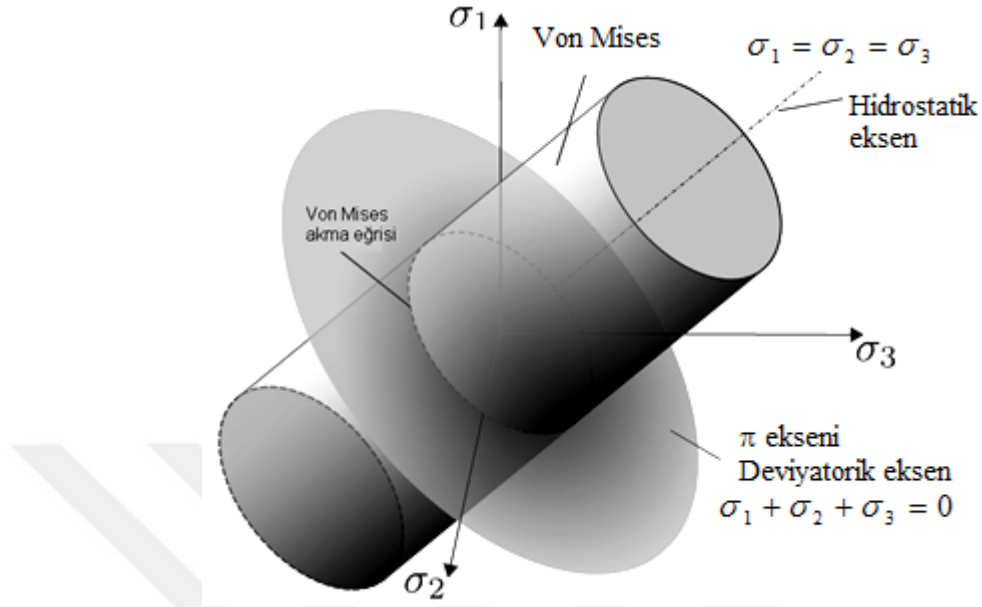
$$m_s \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_s \frac{\partial u}{\partial t} + k_s u = F_{FS}(t) \quad (7.6)$$

denklemini kullanılarak yapının yer değiştirmesini elde eder. İki çözücünden elde edilen değerler birbirine aktarılarak etkileşim sağlanır.  $F_{FS}(t)$  ise katı cisim üzerindeki zamanla değişen hidrodinamik kuvveti temsil eder. Yapıyı “ s ” alt indisi temsil etmektedir. İki çözücünün etkileşimi Şekil 7.3’de görülmektedir. Diğer büyüklükler daha önce tanımlandığı gibidir.

### 7.5 Akışkan-Yapı Etkileşiminde Kazık Üzerindeki Von-Mises Gerilmeleri

Bu gerilme hipotezine göre; Kopma, üç eksenli gerilme halinde birim hacme düşen maksimum şekil değiştirme enerjisinin belirli bir değeri aşması halinde meydana gelir. Sünek malzemeler için kullanılan bu hipotez maksimum şekil

değiştirme enerjisi hipotezi olarak adlandırılır ve Şekil 7.4'te görüldüğü gibi açıklanır.



Şekil 7.4. Von Mises gerilmeleri [79].

Herhangi bir gerilme ( $\sigma$ ) tensörünün hidrostatik ve deviyatorik bileşenlerden oluştuğu bilinmektedir [80,81].

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} + \sigma'_{ij} \quad (7.7)$$

Denklemden  $\delta$ : yer değiştirme,  $\sigma'$  deviyatorik bileşen diğer ifade ise hidrostatik bileşendir. Benzer ifadeler birim şekil değiştirme için aşağıdaki gibi yazılır.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + \varepsilon'_{ij} \quad (7.8)$$

Hooke Kanunu'na göre birim şekil değiştirme ( $\varepsilon$ ) aşağıdaki gibi yazılır,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[ (1+\nu) \sigma_{ij} - \nu \delta_{ij} \sigma_{kk} \right] \quad (7.9)$$

Burada E: Elastisite modülü,  $\nu$  : Poisson oranını göstermektedir. Denklem matris formunda yazılırsa aşağıdaki hale gelir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \left\{ (1+\nu) \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} - 3\nu \begin{bmatrix} \sigma_{hyd} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{hyd} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{hyd} \end{bmatrix} \right\} \quad (7.10)$$

Matris formundan ise aşağıdaki denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] / E \\ \varepsilon_{yy} &= [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] / E \\ \varepsilon_{zz} &= [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] / E \end{aligned} \quad (7.11)$$

Eksenlerdeki yer değiştirme miktarları ise:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xy} \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{yz} \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xz} \quad (7.12)$$

olarak bulunur. Kesme terimleri ise:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \quad \gamma_{yz} = \tau_{yz} / G \quad \gamma_{xz} = \tau_{xz} / G \quad (7.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada G: Kayma modülünü göstermektedir. Kesme terimleri yer değiştirmeler cinsinden ifade edilirse denklemler,

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} \quad \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} \quad \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} \quad G = E/2(1+\nu) \quad (7.14)$$

halini alır. Denklemler  $\delta_{ij}$  ile çarpılarak,

$$\varepsilon_{kk} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{kk} \quad (7.15)$$

elde edilir. Sonuç olarak denklem aşağıdaki halini alır.

$$\frac{1}{3} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} = \frac{1-2\nu}{3E} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (7.16)$$

Denklemdaki deviyatorik ifadeler aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\varepsilon'_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma'_{ij} \quad (7.17)$$

Denklemlerdeki deviyatorik gerilme ve şekil değiştirme ifadeleri birbiri cinsinden ifade edilmiş olur [78].

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu ( $W$ ) boyut olarak (Enerji/Hacim) olarak ifade edilir ve aşağıda verilmiştir.

$$W = \int \sigma : d\varepsilon \quad (7.18)$$

Lineer elastik malzemeler için yukarıdaki enerji denklemi:

$$W = \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon \quad (7.19)$$

şeklinde ifade edilir. Enerji denkleminde deviyatorik ve hidrostatik bileşenler yazılırsa:

$$W = \frac{1}{2} \sigma : \varepsilon = \frac{1}{2} \sigma_{hyd} : \varepsilon_{hyd} + \frac{1}{2} \sigma' : \varepsilon' \quad (7.20)$$

denklemi elde edilir. Burada enerji denkleminin de hidrostatik deviyatorik bileşenlerinin olduğu hali görülmektedir.

*Von Mises Gerilmeleri:* Von mises gerilmeleri doğrudan enerji denklemindeki deviyatorik bileşenler ile bağlantılıdır.

$$W = \frac{1}{2} \sigma' : \varepsilon' \quad (7.21)$$

Hooke Kanununda bilinen aşağıdaki ifade denklemde yazılarak,

$$\varepsilon' = \frac{1}{2G} \sigma' \quad (7.22)$$

enerji denklemi yer değiştirmelerden bağımsızlaştırılır. Gerilmeler cinsinden enerji denklemi yazılarak Von Mises Gerilme denklemi elde edilir [80,81].

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma' : \sigma'} \quad (7.23)$$

Von Mises Gerilmeleri farklı formlarda yazılabilir. ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı;

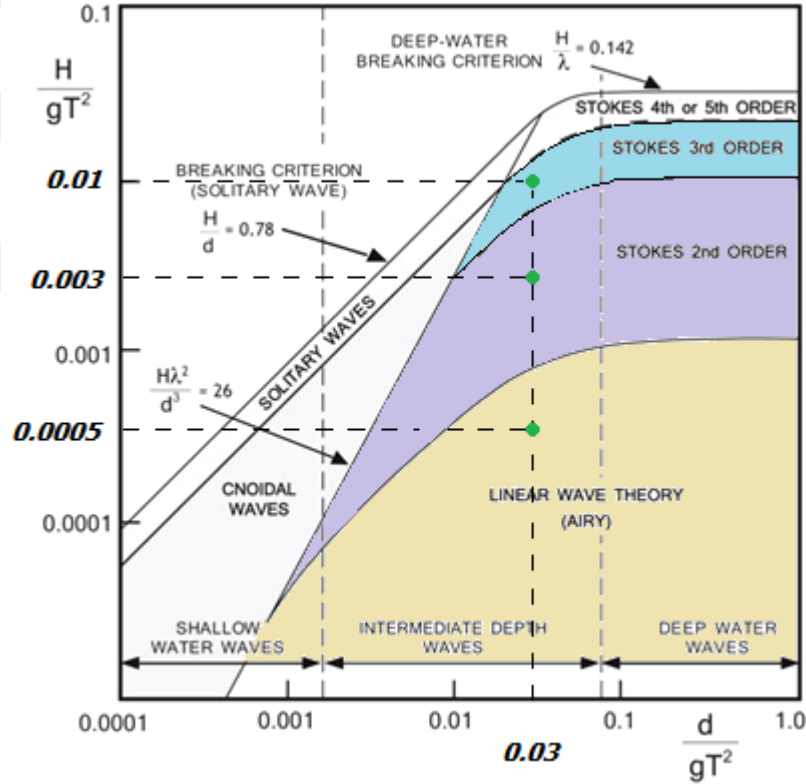
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{1}{2} (\sigma_{kk})^2} \quad \sigma_{VM} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} \quad (7.24)$$

denklemlerini kullanarak Von Mises gerilmelerini elde eder.

## 8. RIHTIM KAZIKLARINA İLİŞKİN UYGULAMA

### 8.1 Akışkan-Yapı Etkileşim Modelinin Tanıtımı

Modellemede kullanılacak parametreler dalga teorilerine, sediment hareketine ve zemin sıvılaşmasına bağlı olarak değişim göstermektedir. Dalga teorilerinin geçerlilik bölgelerini belirleyen Le Mehaute diyagramında (Şekil 8.1), bir inşa derinliğindeki kazıkların istatistiksel analizleri göz önüne alındığında kazığın faydalı ömrü içerisinde birden farklı dalga teorisinin etkisinde kalacağı  $d/gT^2$  ve  $H/gT^2$  oranlarına bağlı olarak belirlenebilmektedir. Aynı derinlikte karşılaşılabilecek farklı tasarım parametreleri farklı teorileri geçerli kılacak bu da farklı dalga parçacık hız ve ivmelerinin kazık boyunca değişen hidrodinamik kuvvetlerini ortaya çıkaracaktır.



Şekil 8.1. Tasarım dalgalarının belirlenmesi [1].

Bu çalışmada incelenecek olan Stokes-1(Linear, Airy) dalga teorisinin geçerli olması için  $d/(gT^2)=0.03$ ,  $H/(gT^2)=0.0005$ , Stokes-2 dalga teorisinin geçerli olması için  $d/(gT^2)=0.03$ ,  $H/(gT^2)=0.003$  ve Stokes-3 dalga teorisinin geçerli olması için  $d/(gT^2)=0.03$ ,  $H/(gT^2)=0.01$  olması gerektiği Şekil 8.1'de görülmektedir.

Rıhtım kazıklarının modellenmesine iki ana model vardır: *Eksenel Yüklü Kazık Modeli (Model A)*; bu modelde rıhtım sürsaj yükleri kazık üzerine tekil olarak yüklenmiş ve ikinci mertebe teorisine (eksenel basınç ve yanal dalga-zemin yükü etkisindeki kazık hali) göre gerilme analizi dikkate alınmıştır. *Eksenel Yük Hariç Kazık Modeli (Model B)*; bu modelde sadece yanal dalga-zemin yükü etkisinde birinci mertebe teorisine (yalnız eğilme yüküne maruz kazık hali) göre gerilme analizi yapılmıştır (Tablo 8.1).

Tablo 8.1. Analiz çeşitleri ve kodlanması

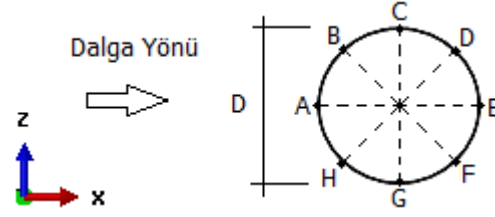
Model A	Model B	Model Kodu	Dalga Tipi	Deniz Suyu Yoğunluğu	Zemin Sıvılaşması	Sınır Şartı
Model I-A	Model IB	S1-RS-ZS	Stokes-1	Sabit Yoğunluklu	Sabit Zemin	1
		S2-RS-ZS	Stokes-2			
		S3-RD-ZS	Stokes-3			
Model II-A	Model IIB	S1-RD-ZS	Stokes-1	Değişken Yoğunluklu	Sabit Zemin	1
		S2-RD-ZS	Stokes-2			
		S3-RD-ZS	Stokes-3			
Model IIIA	Model IIIB	S0-RS-ZA	Durgun Su	Sabit Yoğunluklu	Akıcı Zemin	2
Model IVA	Model IVB	S1-RS-ZA	Stokes-1	Sabit Yoğunluklu	Akıcı Zemin	3
		S2-RS-ZA	Stokes-2			
		S3-RS-ZA	Stokes-3			
Model VA	Model VB	S1-RD-ZA	Stokes-1	Değişken Yoğunluklu	Akıcı Zemin	3
		S2-RD-ZA	Stokes-2			
		S3-RD-ZA	Stokes-3			

Hem Model A hem Model B için beş alt model dikkate alınmıştır. Bu alt modellerde; *sabit ve derinlikle değişen yoğunluklu deniz ortamında Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorileri ve belirli bir kalınlığa sahip deniz tabanındaki tabakanın sıvılaşma akışa geçmesi durumlarında* rıhtım kazıkları ile etkileşimini içeren hem A Model tipi hem de B Model tipi için 13'er adet alt model analiz edilmiştir.

## 8.2 Modelleme

Sonlu elemanlar modelinde deniz suyu ve sıvılaşan zemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Abaqus/CFD) çözücüsü ile rıhtım kazığı ise Dinamik Sonlu Elemanlar (Abaqus/Explicit) çözücüsü ile modellenmiştir.





Şekil 8.2. Kazık yüzeyi inceleme noktaları.

Uygulama kapsamında belirlenen modeller için D çaplı silindirik rıhtım kazığı üzerinde inceleme noktaları belirlenerek hidrodinamik basınç, akış hızı, hidrodinamik kuvvetler etkisinde rıhtım kazıklarının yer değiştirmesi ve kazıklar üzerindeki gerilme değerleri incelenecektir (Şekil 8.2).

### 8.3 Malzeme Kesit ve Özellikleri

Kazık elemanın malzeme parametreleri Tablo 8.2'de verilmiştir. Deniz suyu ve akıcı sıvılaştırılmış zemin için Tablo 8.3'de belirlenen özellikler kullanılmıştır (Gücüyen, 2013). Uygulama kapsamında incelenecek dalga teorileri ve dalga parametreleri ise Tablo 8.4'de verilmiştir.

Tablo 8.2. Kazık parametreleri [5].

	$\rho_k$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	$D$ , (m)	$s$ , (m)	$E$ , (kN/m <sup>2</sup> )	$N_y$ , (kN)	$\nu$
Çelik Kazık	7.834	76.85	1.00	0.014	2.1x10 <sup>8</sup>	700.0	0.3

Tablo 8.3. Akışkan parametreleri [78,82-84].

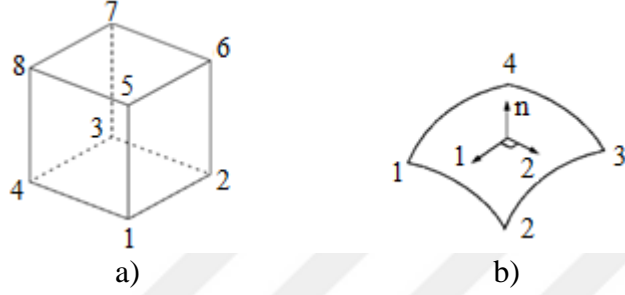
	$C_0$ (m/s)	$\kappa$	$\Gamma_0$	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )
Deniz Suyu	1450	0	0	1.029	10.09	1.002x10 <sup>-3</sup>
Akışkan Zemin	1300	0	0	1.922	18.85	0.70

Tablo 8.4. Dalga parametreleri.

Dalga Tipi	$H$ (m)	$T$ (sn)	$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$d$ (m)	Sediment hareketi olması durumunda	
						$w_s$ (m/sn)	$\theta'$
Stokes-1	0.4	9	1.029	10.09	25.0	0.011	1.0
Stokes-2	2.4	9	1.029	10.09	25.0	0.028	0.9
Stokes-3	8.0	9	1.029	10.09	25.0	0.085	0.8

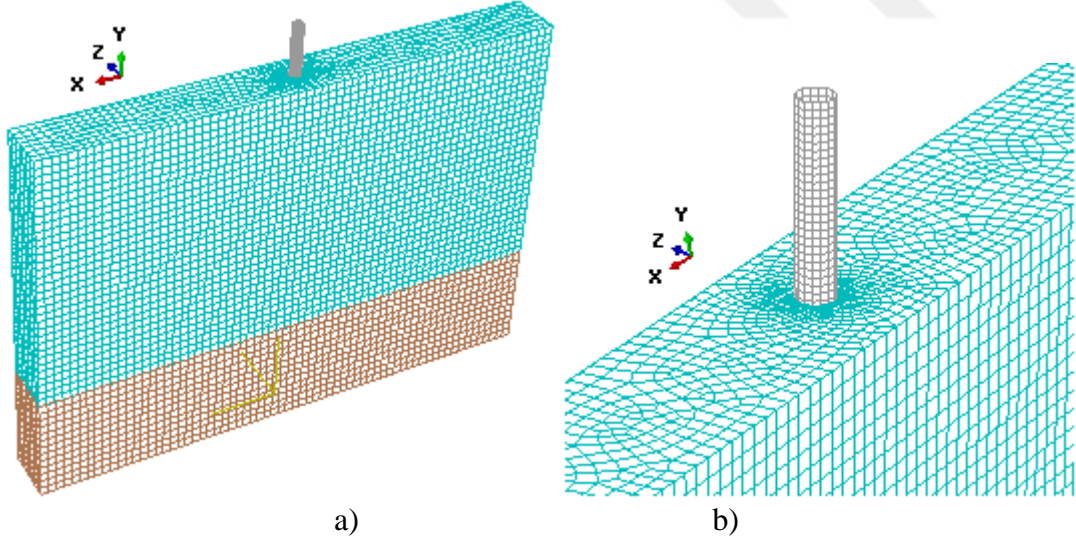
#### 8.4 Ağ Tasarımı

Aşağıda görülen şekil akışkan modellerinde kullanılan eleman geometrisi hexahedron (6 yüzlü) FC3D8'dir (Şekil 8.3.a). Rıhtım kazığının sonlu elemanlara ayrılmasında kullanılan eleman geometrisi ise 4 düğümlü çift eğimli ince veya kalın kabuk (2 yüzlü) S4R'dir. Aşağıda Şekil 8.3.b 'de görülen eleman belirli bir et kalınlığına sahip boru kesitli katı cisim modellerinde de kullanılan eleman tipidir.



Şekil 8.3. a) FC3D8 eleman geometrisi, b) S4R eleman geometrisi

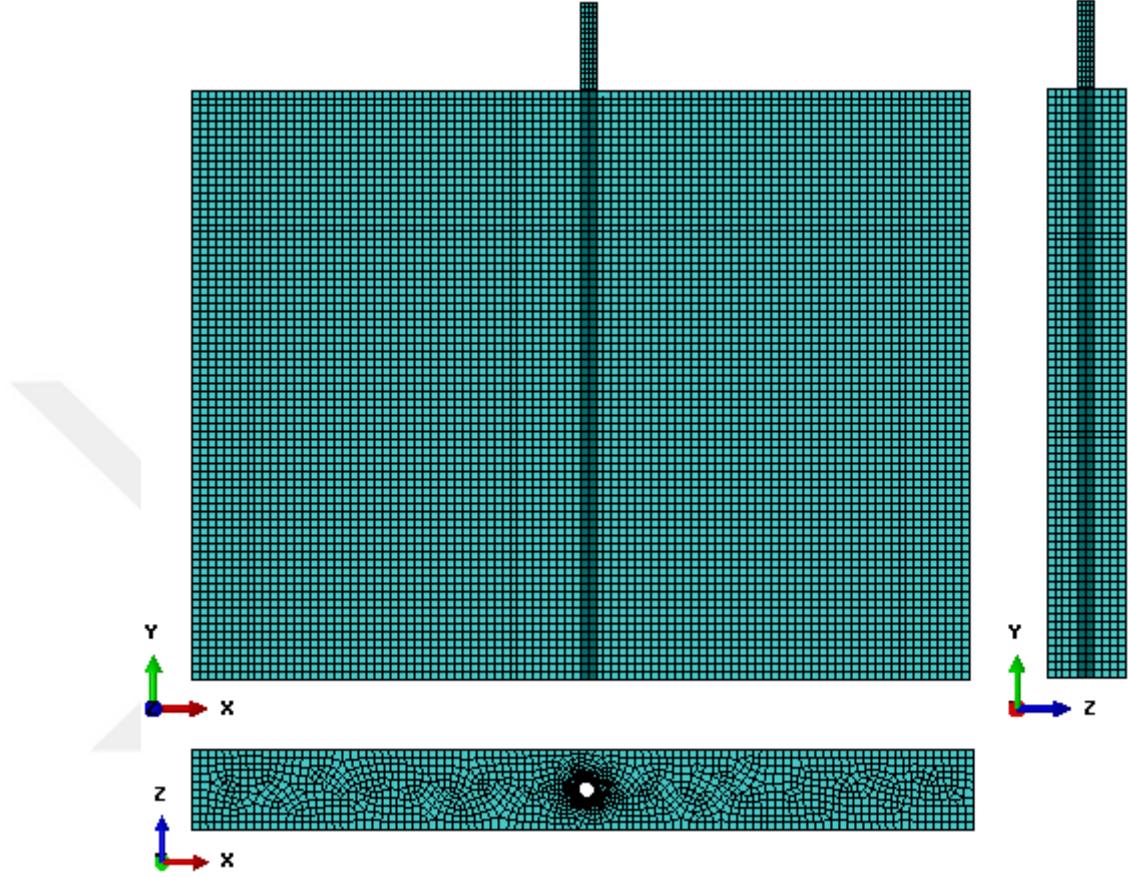
Modellemelerde akışkan ve katı cisim temas yüzeyinde etkileşimin daha iyi sağlanması için ağ (mesh) aralığının normalden daha küçük tutularak sıklaştırma yapılması gerekmektedir (Şekil 8.4.b).



Şekil 8.4. a) Modelin ağ yapısı, b) Sıklaştırma bölgesi ayrıntısı

Sıvılaşmış zemin ve deniz ortamının sonlu elemanlara ayrılmasında kullanılan eleman geometrisi hexahedron (6 yüzlü) dur (FC3D8). Şekil 8.4 ve Şekil 8.5' de görülen bu nokta ve elemanların oluşturulmasında genel ağ aralığı 0.5 m, kazık yüzeyine yakın bölgelerde daha hassas sonuçlar alınması için ağ aralığı 0.10

m'dir. Sıvılaşmış zemin ve deniz modelinde 115659 adet nokta ve 105210 eleman, çelik rıhtım kazığı için ise 12276 adet nokta ve 12245 eleman kullanılmıştır. Bu aralıklar Analiz Sonuçları kısmında ayrıntılı gösterileceği şekilde yapılan "Yakınsama Analizi" ile belirlenmiştir.



Şekil 8.5. Modelin ağ yapısı

### 8.5 Sınır Şartları

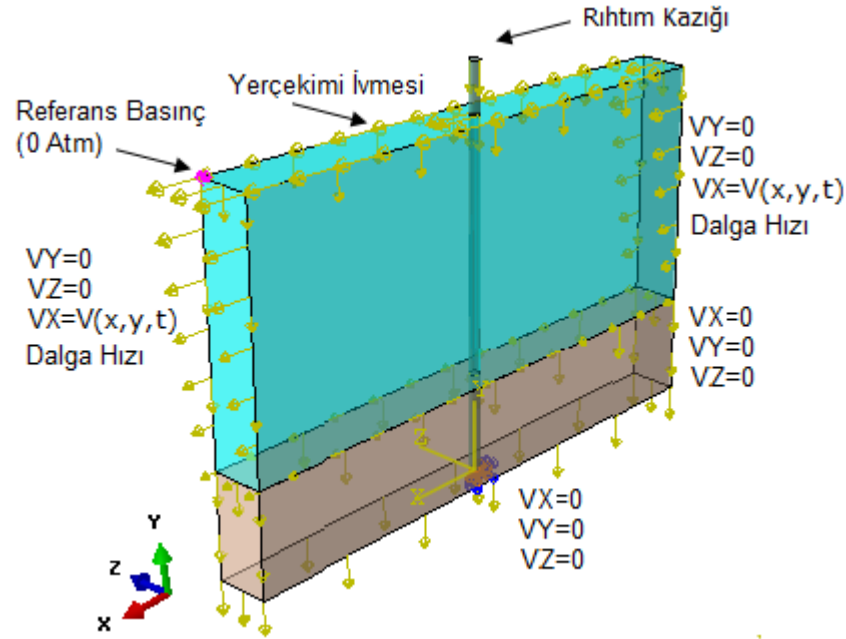
Tez çalışması kapsamında yapılan modellemelerde 3 farklı tip sınır şartı uygulanmıştır. Kodlama tablosunda yapılan modellemelere hangi tip sınır şartlarının verildiği belirtilmiştir (Tablo 8.1). Analizlerde kullanılan ortak sınır şartları aşağıda verilmiştir. Farklı olan sınır şartları ise Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 olarak ayrıca belirtilmiştir.

- y doğrultusunda akışa izin verilmemiştir ( $VY=0$  Sınır Şartı).
- z doğrultusunda yanal yüzeyler sınır şartı için akışa izin verilmemiştir ( $VZ=0$  Sınır Şartı).
- Düşey y doğrultusunda yerçekimi ivmesi etkilmiştir ( $g_Y=-9,81 \text{ m/sn}^2$ ).

- Kesit alt yüzeyinde sabit mesnet şartı verilmiştir ( $UX=UY=UZ=0$  Sınır şartı).
- Sakin su seviyesinde referans basınç  $P_{ref}=0$  kN/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir.
- Kazık üst ucu serbest, alt ucu deniz tabanına ankastre mesnetli olarak sabitlenmiştir. ( $UX=UY=UZ=0$  ,  $RX=RY=RZ=0$  Sınır şartı).

**Tip-1;** Sabit zemin ve dalgalı deniz ortamında  $x$  doğrultusunda dalga hareketine izin verilecek şekilde aşağıdaki sınır şartları verilmiştir (Şekil 8.6).

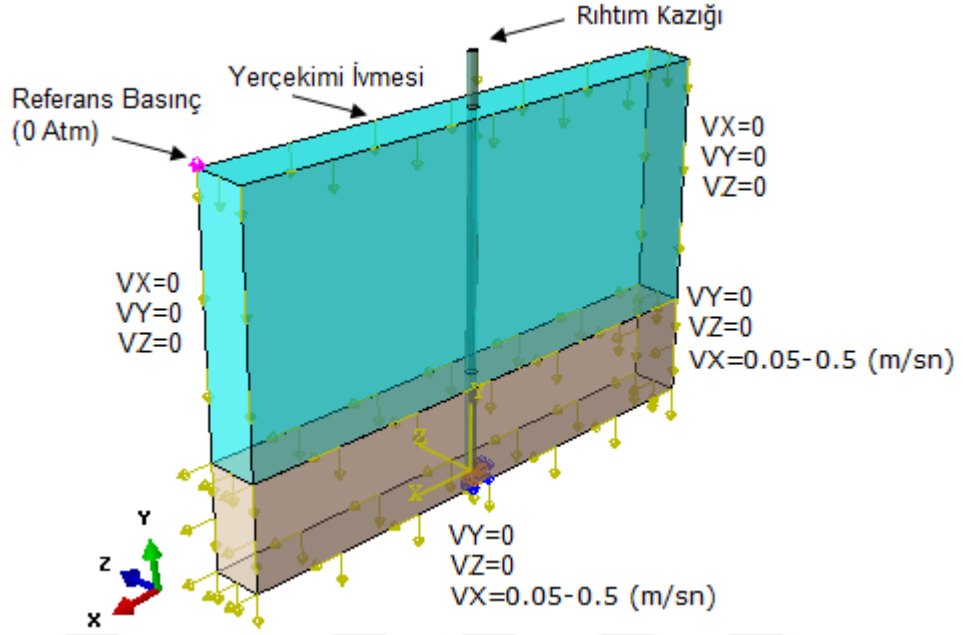
- $x$  doğrultusunda dalga hızı olarak çeşitli teoriler için değiştirilmek üzere konumla ve zamanla değişen  $V(x,t)$  (m/sn) değerleri için ayarlanmıştır ( $VX=V(x,t)$  Sınır Şartı).
- Zemin akış hızı, sabit zemin durumu için  $V(x)=0$  (m/sn) ayarlanmıştır ( $VX=0$  Sınır Şartı).



Şekil 8.6. Tip-1 modellemesi sınır şartları.

**Tip-2;** Durgun deniz suyu ve sıvılaştan zemin akış hareketine  $x$  doğrultusunda izin verilecek şekilde aşağıdaki sınır şartları verilmiştir (Şekil 8.7).

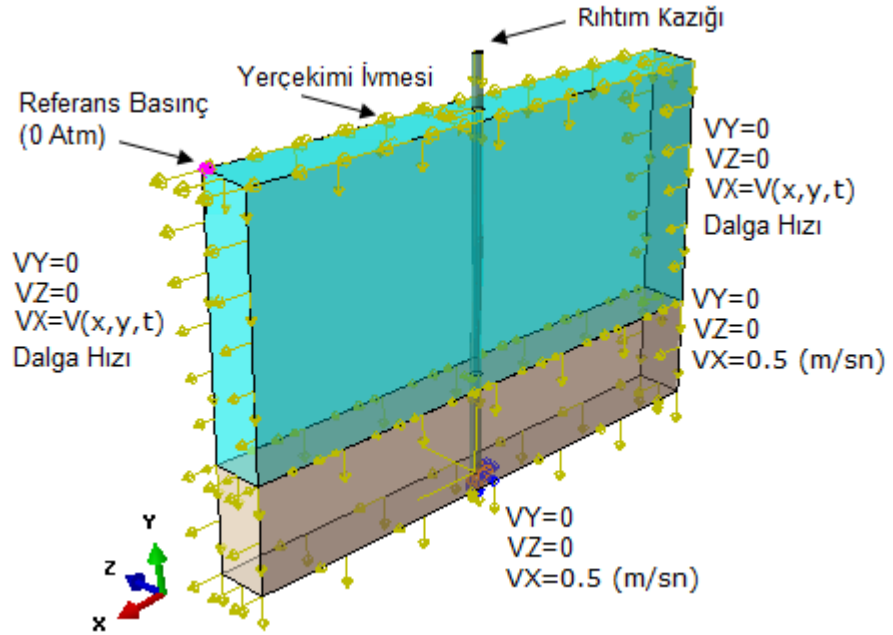
- $x$  doğrultusunda durgun deniz ortamı için hız  $V(x,t)=0$  (m/sn) olarak ayarlanmıştır ( $VX=0$  Sınır Şartı).
- $x$  doğrultusunda sıvılaştan zemin akış hızı  $V(x)$  (m/sn) çeşitli değerler için ayarlanmıştır ( $VX=0.05-0.5$  m/sn, Sınır Şartı).



Şekil 8.7. Tip-2 modellemesi sınır şartları

**Tip-3;** Sıvılaştırılmış zemin ve dalgalı deniz ortamı modellemesinde x doğrultusunda dalga hareketine ve zemin akışına izin verilecek şekilde aşağıdaki sınır şartları verilmiştir (Şekil 8.8).

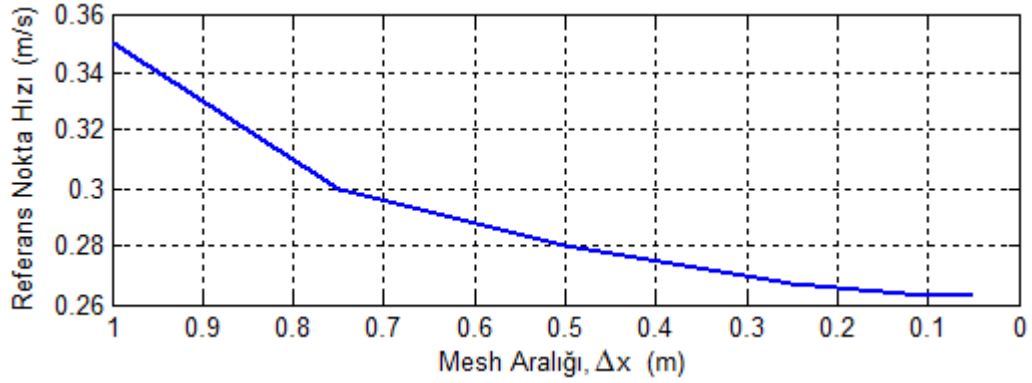
- x doğrultusunda dalga hızı olarak çeşitli teoriler için değiştirilmek üzere konumla ve zamanla değişen  $V_x=V(x,t)$  (m/sn) değerleri için ayarlanmıştır.
- x doğrultusunda sıvılaştırılmış zemin akış hızı  $V(x)$  (m/sn) çeşitli değerler için ayarlanmıştır ( $VX=0.05-0.5$  m/sn, Sınır Şartı).



Şekil 8.8. Tip-3 modellemesi sınır şartları.

## 8.6 Yakınsama Analizi

ABAQUS programı ile modellenecek Sonlu Eleman Modelinin oluşturulmasında konum ( $\Delta x$ ) ve zaman ( $\Delta t$ ) artım değerleri gerekmektedir. Bu değerler yakınsama analizi ile değişik ağ (mesh) mesafelerinde çözümlenerek elde edilmiştir. Referans değer (aynı noktadaki hız veya basınç vs.) mesh aralığı küçültülmesine rağmen değişim gözlenmiyor veya ihmal edilecek oranda değişiyorsa sistemin mesh aralığı belirlenmiş olur. Bu değerlerin çok daha küçük kabul edilerek daha net sonuçlara ulaşılabacağı bilinmektedir ancak bu kabulün analiz süresini uzatması kaçınılmazdır. Aşağıdaki şekilde model için yapılan yakınsama analizi gösterilmiştir (Şekil 8.9).



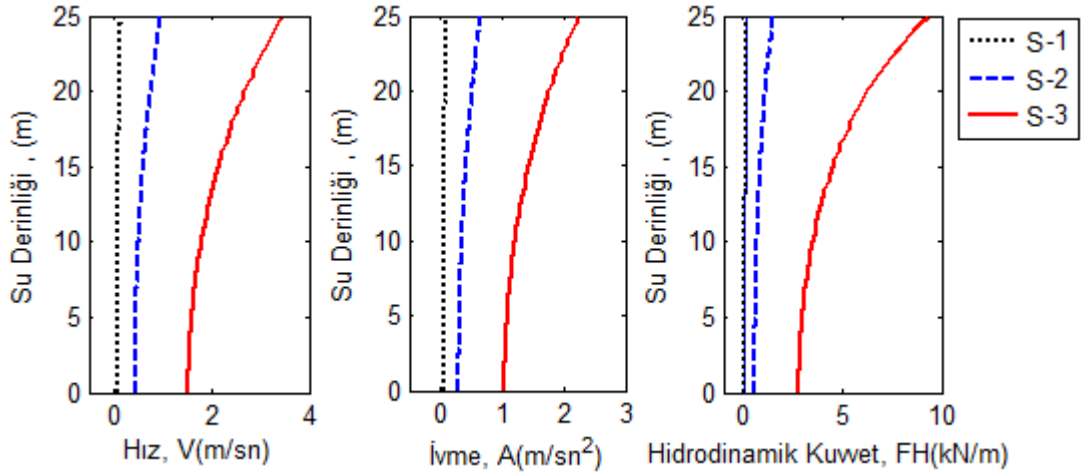
Şekil 8.9. Yakınsama analizi

Şekil 8.9'da görüldüğü gibi ağ aralığı 0.10 m' den daha küçük alınsa dahi referans nokta hızı ihmal edilecek düzeyde (%0.5) değişmiştir. Tez çalışmasında ayrıntılı incelenmesi gereken bölgelerde daha küçük mesh aralığı  $\Delta x=0.05-0.10$  m kullanılmıştır. Ayrıntılı inceleme gerekmeyen bölgelerde analiz süresini kısaltmak için genel mesh aralığı  $\Delta x=0.50$  m kullanılması uygun görülmüştür. Zaman artımı olarak  $\Delta t=0.1$  sn aralıklarla dinamik analizler yapılmıştır.

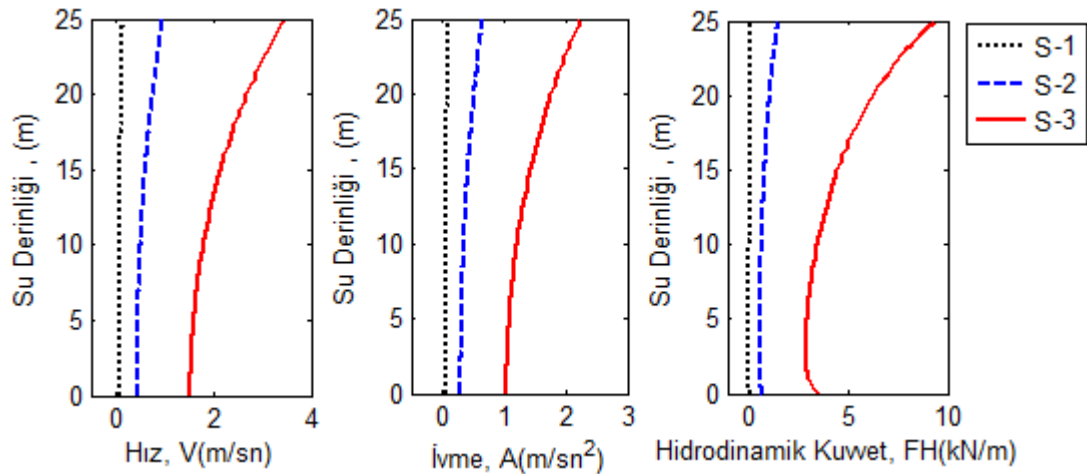
## 9. NÜMERİK ANALİZ BULGULARI

### 9.1 Dalga Parametreleri

Stokes-1-2-3 dalga teorilerine ait derinlikle değişen dalga hızı, dalga ivmesi ve hidrodinamik dalga kuvvetleri sabit deniz yoğunluğu için Şekil 9.1'de gösterilmiştir. Değişken yoğunluklu deniz ortamı için ise Şekil 9.2'de gösterilmiştir. Deniz tabanındaki sediment hareketinin neden olduğu yoğunluk değişimi normalden daha yüksek hidrodinamik kuvvetler oluşturduğu görülmüştür.

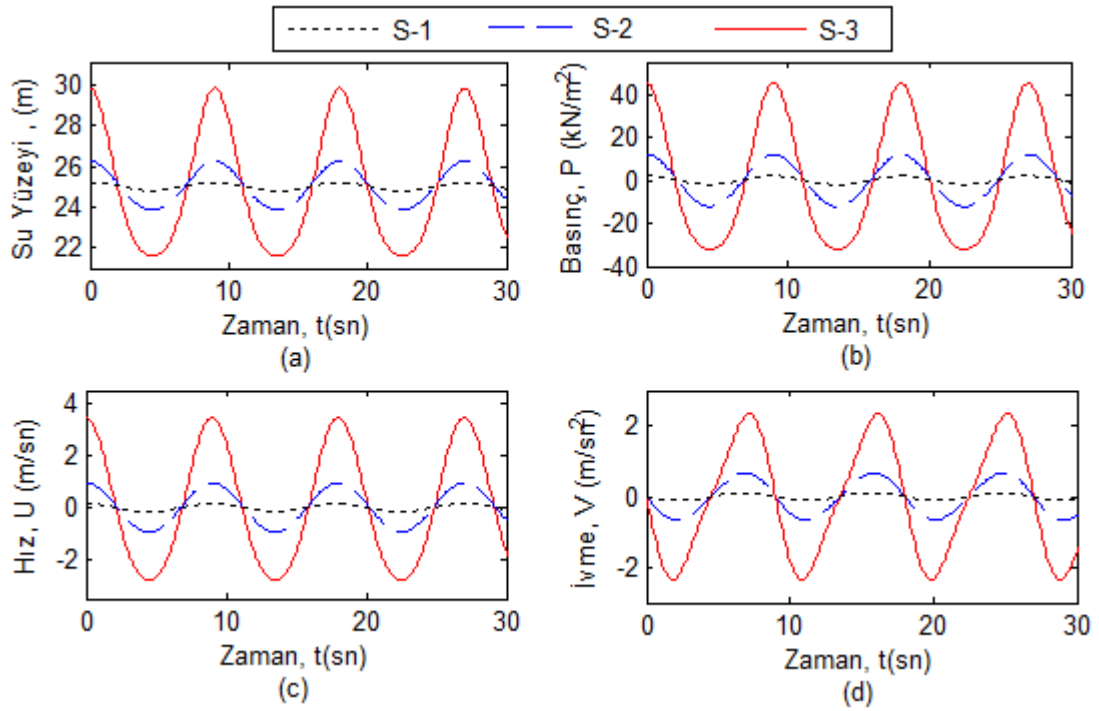


Şekil 9.1. Sabit yoğ. deniz ortamında Stokes-1 (S1), Stokes-2 (S2) ve Stokes-3 (S3) dalga hızı, ivmesi ve hidrodinamik kuvveti derinlikle değişimi ( $t=3T/4$ ).

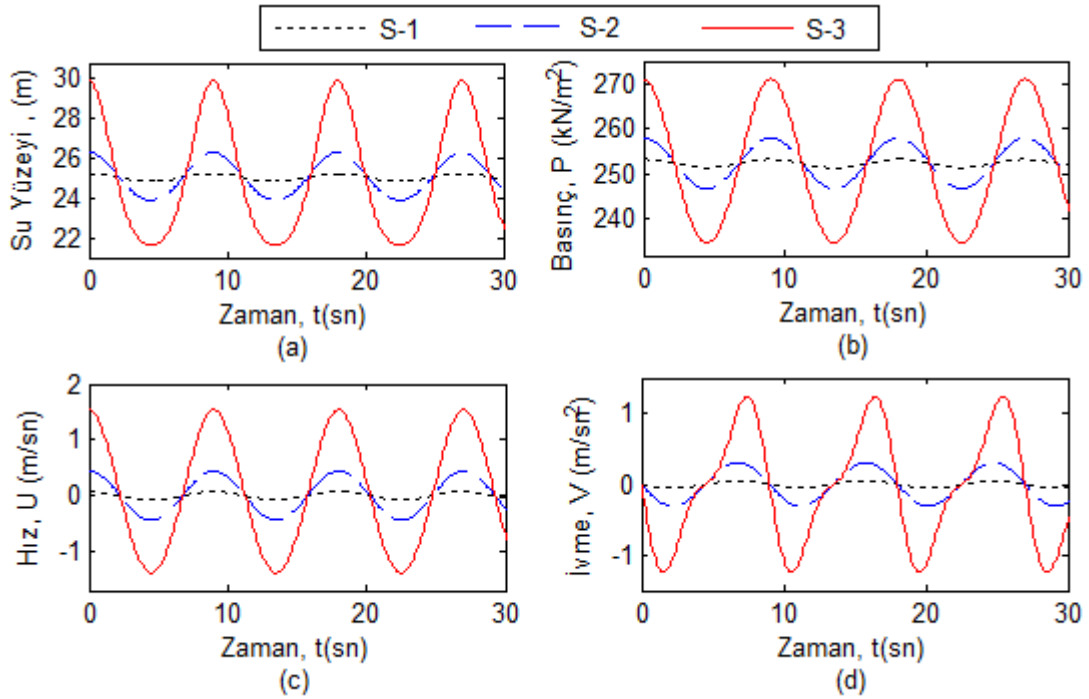


Şekil 9.2. Değişken yoğ. deniz ortamında Stokes-1 (S1), Stokes-2 (S2) ve Stokes-3 (S3) dalga hızı, ivmesi ve hidrodinamik kuvveti derinlikle değişimi ( $t=3T/4$ ).

Stokes-1-2-3 dalga teorilerine ait su yüzeyi profili, basınç, hız ve ivme değerlerinin zamanla değişimi su yüzeyi için Şekil 9.3'de deniz tabanı için Şekil 9.4'de gösterilmiştir.



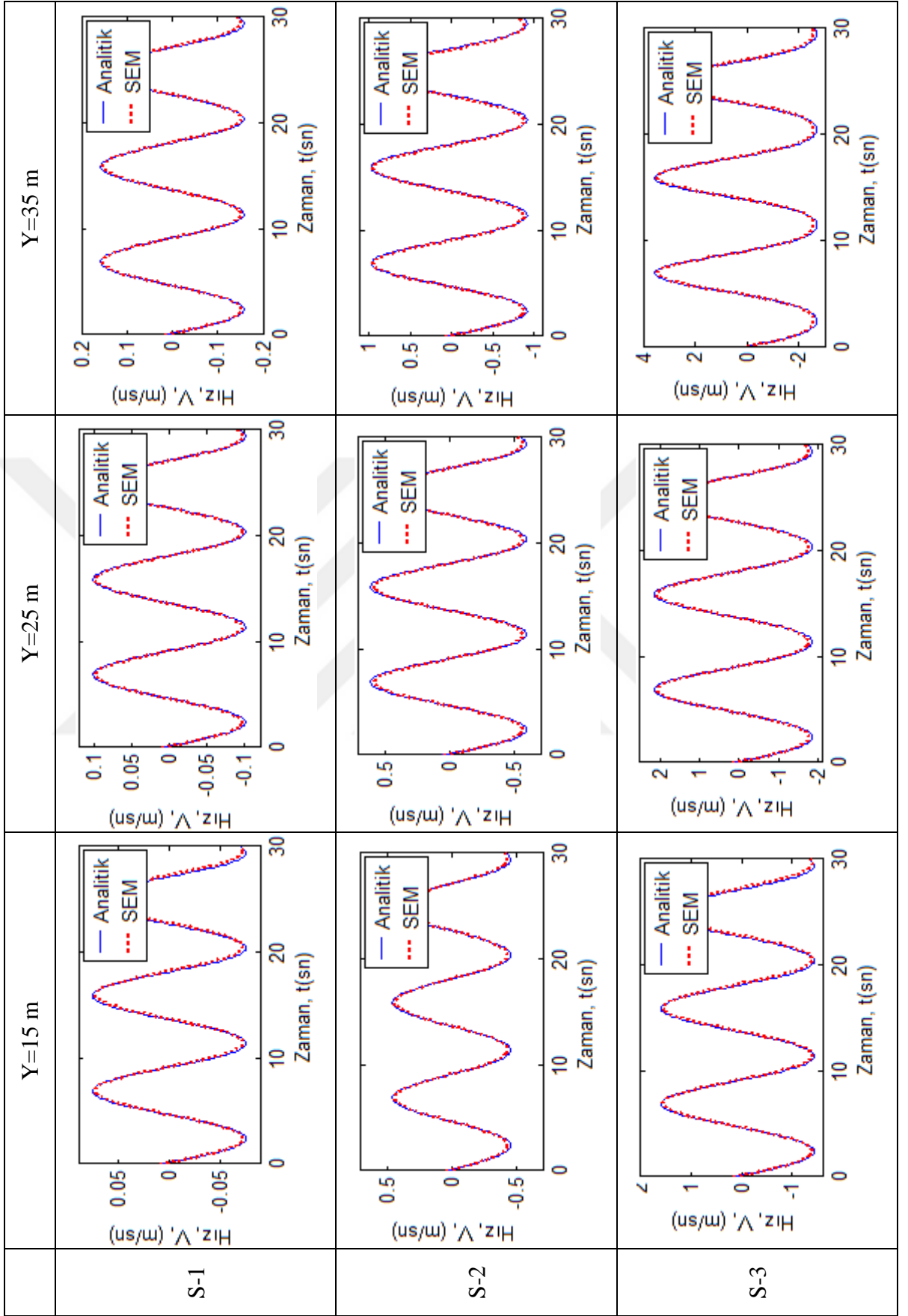
Şekil 9.3. Su yüzeyinde Stokes-1-2-3 dalgalarının a) Su Yüzü profili, b) basınç - zaman grafiği, c) dalga hızı - zaman grafiği, d) ivme - zaman grafiği.



Şekil 9.4. Deniz tabanında Stokes-1-2-3 dalgalarının a) Su Yüzü profili, b) basınç - zaman grafiği, c) dalga hızı - zaman grafiği, d) ivme - zaman grafiği.

Rıhtım kazığına etkiyen dalgalarının analitik ve nümerik (SEM) analizde kullanılan hız değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 9.5'de verilmiştir. Burada analitik değerler ile modelin kullandığı değerler oldukça yakındır.





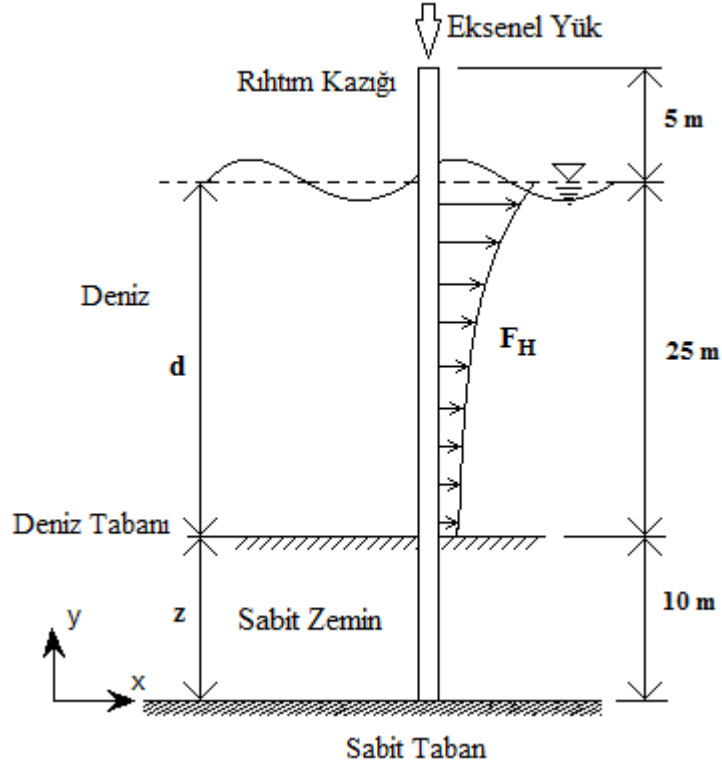
Şekil 9.5. Stokes-1-2-3 dalgalarının analitik ve nümerik karşılaştırması

## 9.2 Eksenel Yüklü Kazıkların Modellenmesi

Modeller: IA, IIA, IIIA, IVA ve VA kodlamasıyla yapılmıştır. Herbir kodda yeralan "A" harfi "Eksenel Yük Dahil" anlamına gelmektedir. Herbir *Model Nümerik Analizi* kısmında (Örneğin: *Model IA için Nümerik Analiz* kısmında S1-RS-ZS, S2-RS-ZS, S3-RS-ZS Modellerine yönelik uygulama yapılmıştır) *kazık kesidi etrafındaki basınç ve hız dağılımları, kazık kesidinin A-C-E-G noktalarındaki hız-zaman ve basınç-zaman grafikleri, kazık boyunca yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri* ayrı ayrı verilmektedir. *Model Değerlendirme* (örneğin Model IA için) kısmında ise *akışkan-yapı etkileşimi tablosu ile kazık boyunca yer değiştirme ve gerilme dağılımları* verilmektedir. Bir Model için yapılan işlemler farklı modeller için de benzer biçimde yapılmıştır.

### 9.2.1 Model IA İçin Nümerik Analiz

Bu bölümde Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorilerinin sabit yoğunluklu deniz ortamında silindirik rıhtım kazığı etrafında oluşturacağı akış hızı ve basınç dağılımının tespiti için bir model belirlenmiştir. Hidrodinamik kuvvetler etkisindeki rıhtım kazığının yaptığı yer değiştirme ve gerilme değerleri hesaplanmıştır.

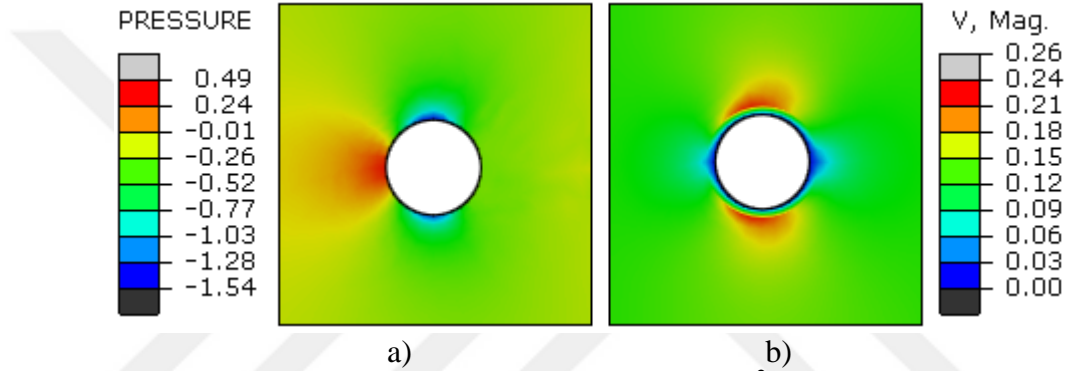


Şekil 9.6. Sabit yoğunluklu deniz ortamında dalga etkisindeki rıhtım kazığı.

Dikdörtgen kesitli boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan sabit yoğunluklu dalgalı deniz ve boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 10 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan sabit zemin ortamına dairesel kesitli çapı;  $D=1.0 \text{ m}$  yüksekliği;  $L=40.0 \text{ m}$  olan ankastre mesnetli rıhtım kazığı yerleştirilmiştir (Şekil 9.6).

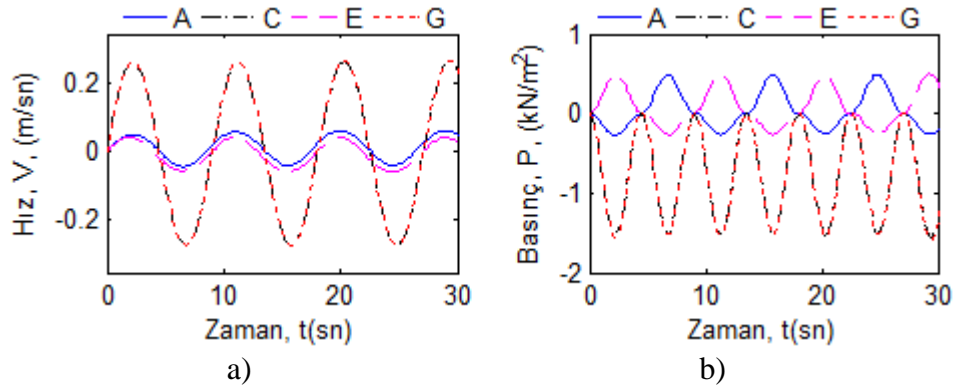
### 9.2.1.1 S1-RS-ZS Modeli

Stokes-1 dalga teorisinin etkisinde; su yüzeyi profili, basınç, hız ve ivme değerlerinin zamanla değişimi daha önce su yüzeyi için Şekil 9.3'de deniz tabanı için Şekil 9.4'de gösterilmiştir.



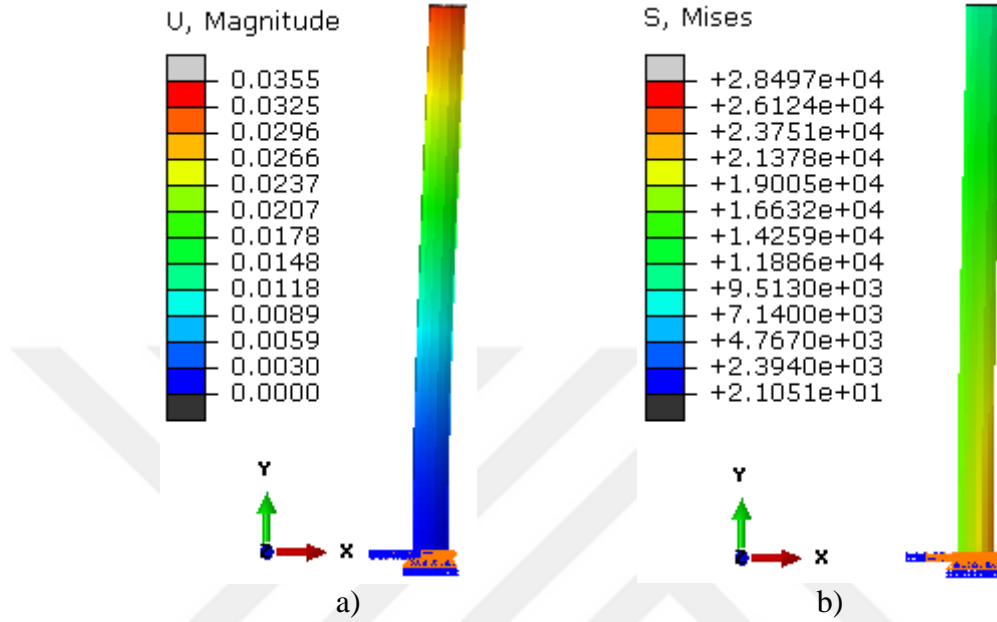
Şekil 9.7. Kazık etrafında akışkan a) basınç  $P$  ( $\text{kN/m}^2$ ) b) hız  $U$  ( $\text{m/sn}$ ) dağılımı.

Şekil 9.7-a'da görüldüğü üzere memba yönünde Şekil 8.2'de konumu belirtilen A noktasında en büyük basınç değeri görülmüştür. C ve G noktalarında en küçük basınç değerleri vakum şeklinde oluşmuştur. Mansap yönündeki E noktasında da vakum gözlemlenmiştir. Benzer şekilde A noktasından  $D/10$  mesafesinde akış hızında düşüş olduğu kazık yan yüzeylerde ise yaklaşık  $\approx 1,7$  kat artış olmuştur. E noktasında ise akışın düşük değerlerde olduğu görülmüştür (Şekil 9.7-b).



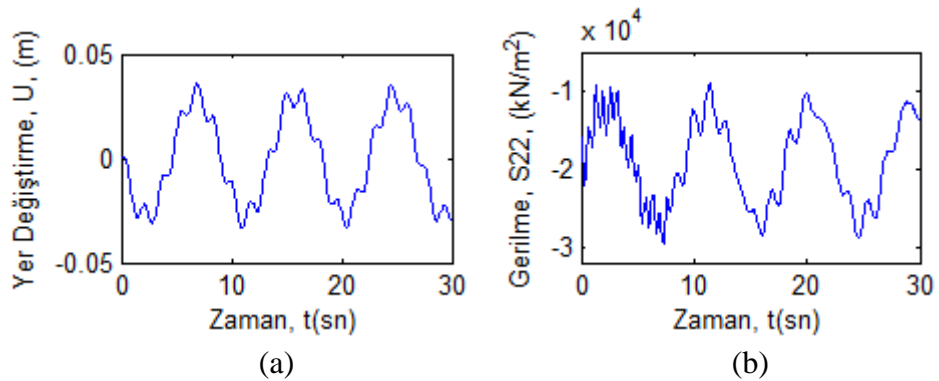
Şekil 9.8. Kazık etrafında akışkan a) basınç-zaman grafiği, b) hız - zaman grafiği ( $Y=35.0 \text{ m}$ ,  $D=1.0 \text{ m}$ ,  $P_{\text{ref}}=0.0 \text{ kN/m}^2$ )

Tekil kazık etrafında tespit edilen basınç ve hız değerlerinin zamanla değişim grafiği Şekil 9.8'de gösterilmiştir. Dinamik analizde belirtilen noktalardaki basınç ve hız değerlerinin zamanla değişimi ilk 10 sn süresi sonunda kararlı biçimine ulaşmıştır.

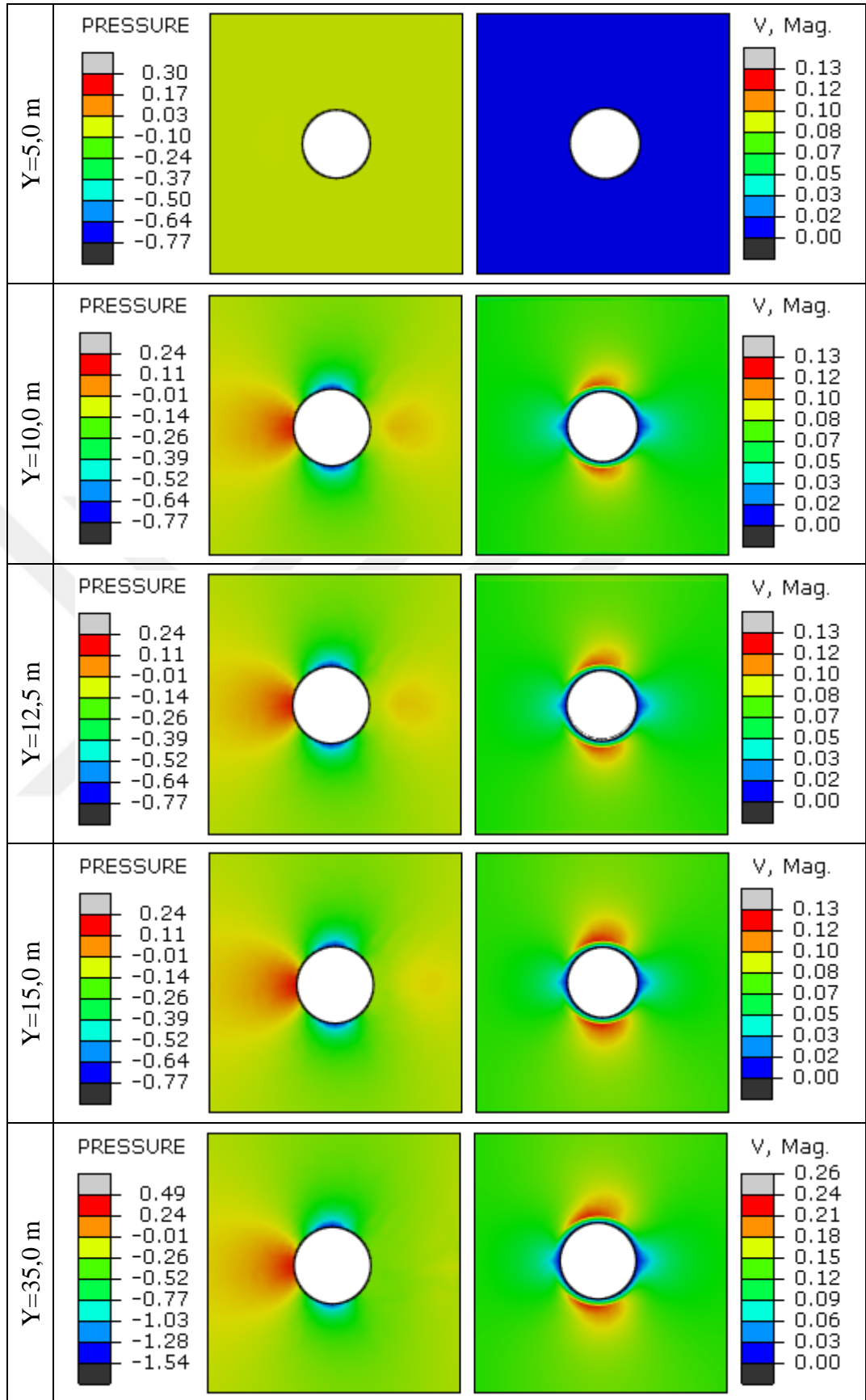


Şekil 9.9. a) Rıhtım kazığı üzerinde yer değiştirme U(m) dağılımları, b) gerilme S(kN/m<sup>2</sup>) dağılımları

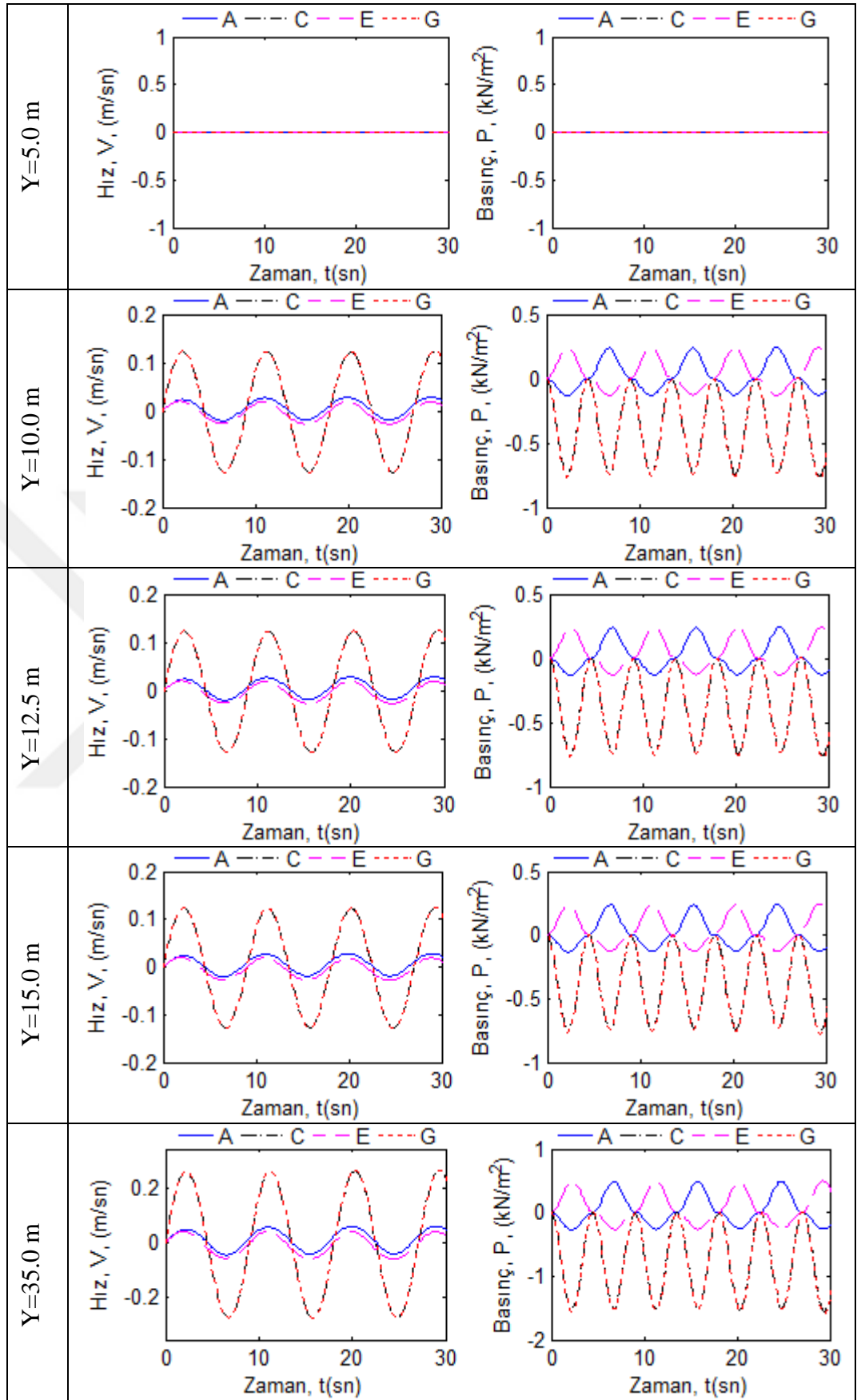
Yapıya etkiyen hidrodinamik kuvvetler sonucunda t=14mm et kalınlığındaki çelik kazığın tepe noktasında 0.0355 m yer değiştirme (Şekil 9.9.a) ve kazık tabanında 28497.12 kN/m<sup>2</sup> büyüklüğünde Mises gerilmesi hesaplanmıştır (Şekil 9.9.b). Elde edilen bu yer değiştirme ve gerilme değerlerinin zamanla değişimi Şekil 9.10.a-b'de gösterilmiştir.



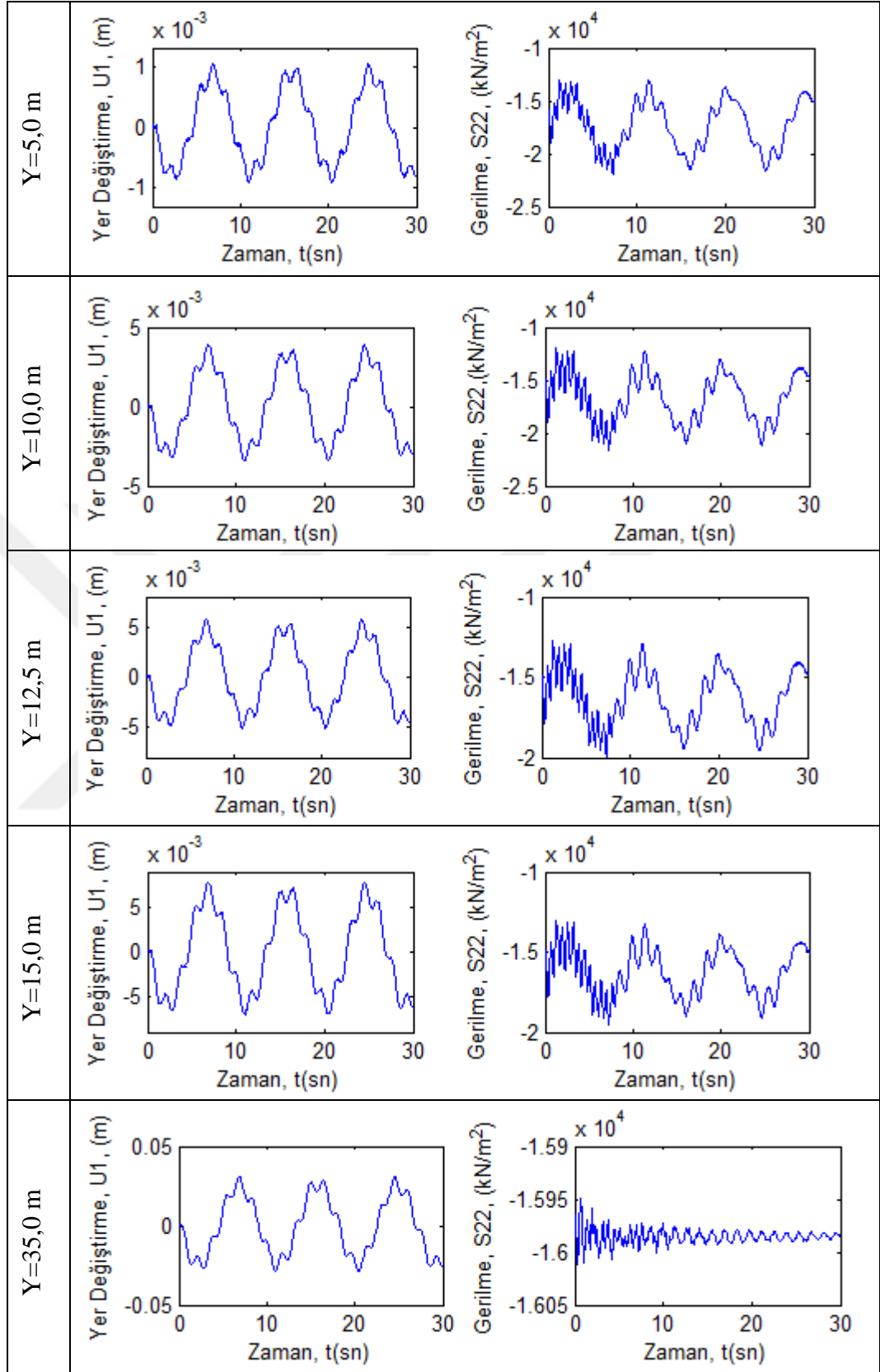
Şekil 9.10. Rıhtım kazığı üzerinde a) yer değiştirme - zaman grafiği, b) gerilme - zaman grafiği.



Şekil 9.11. S1-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

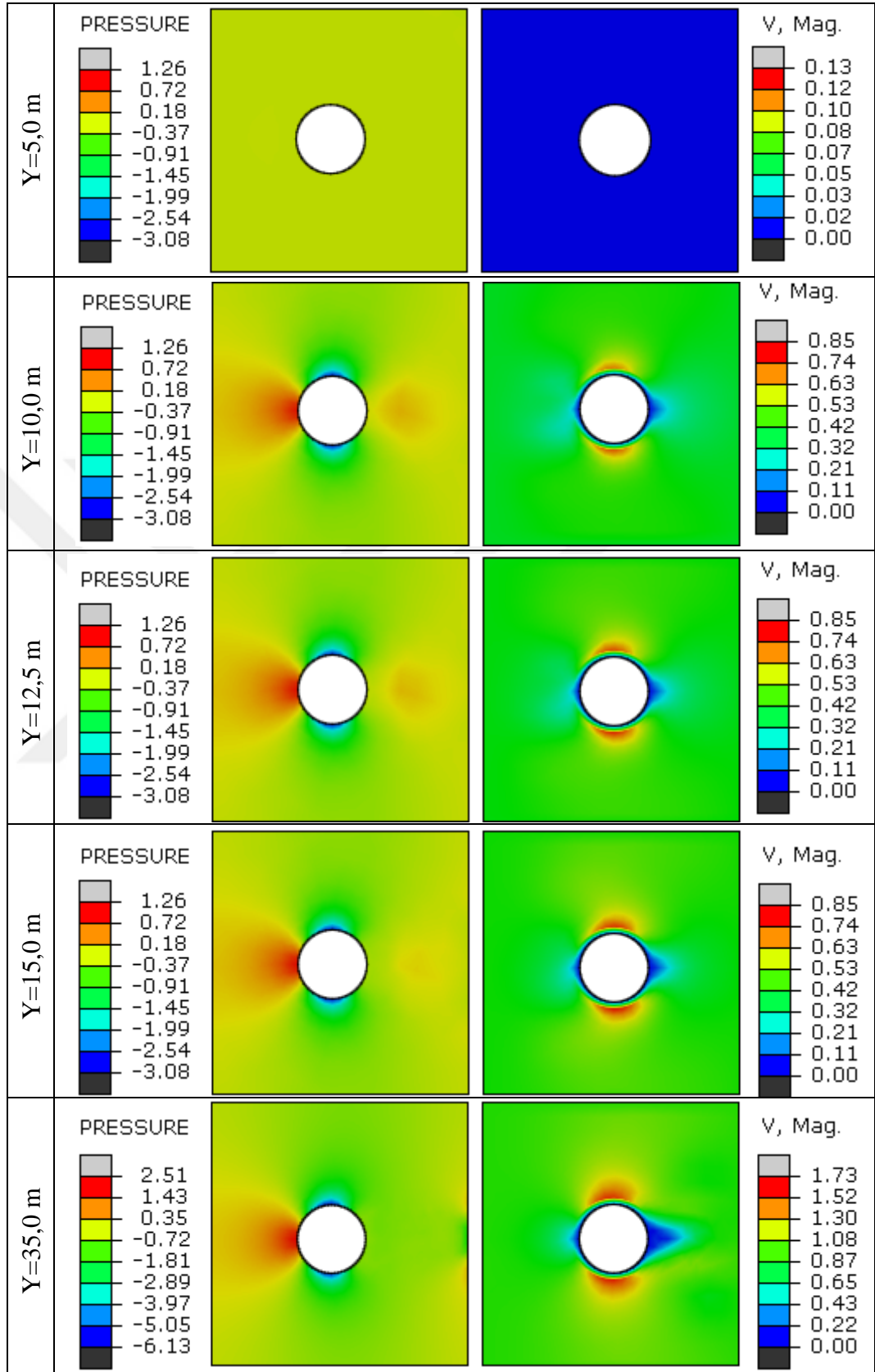


Şekil 9.12. S1-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



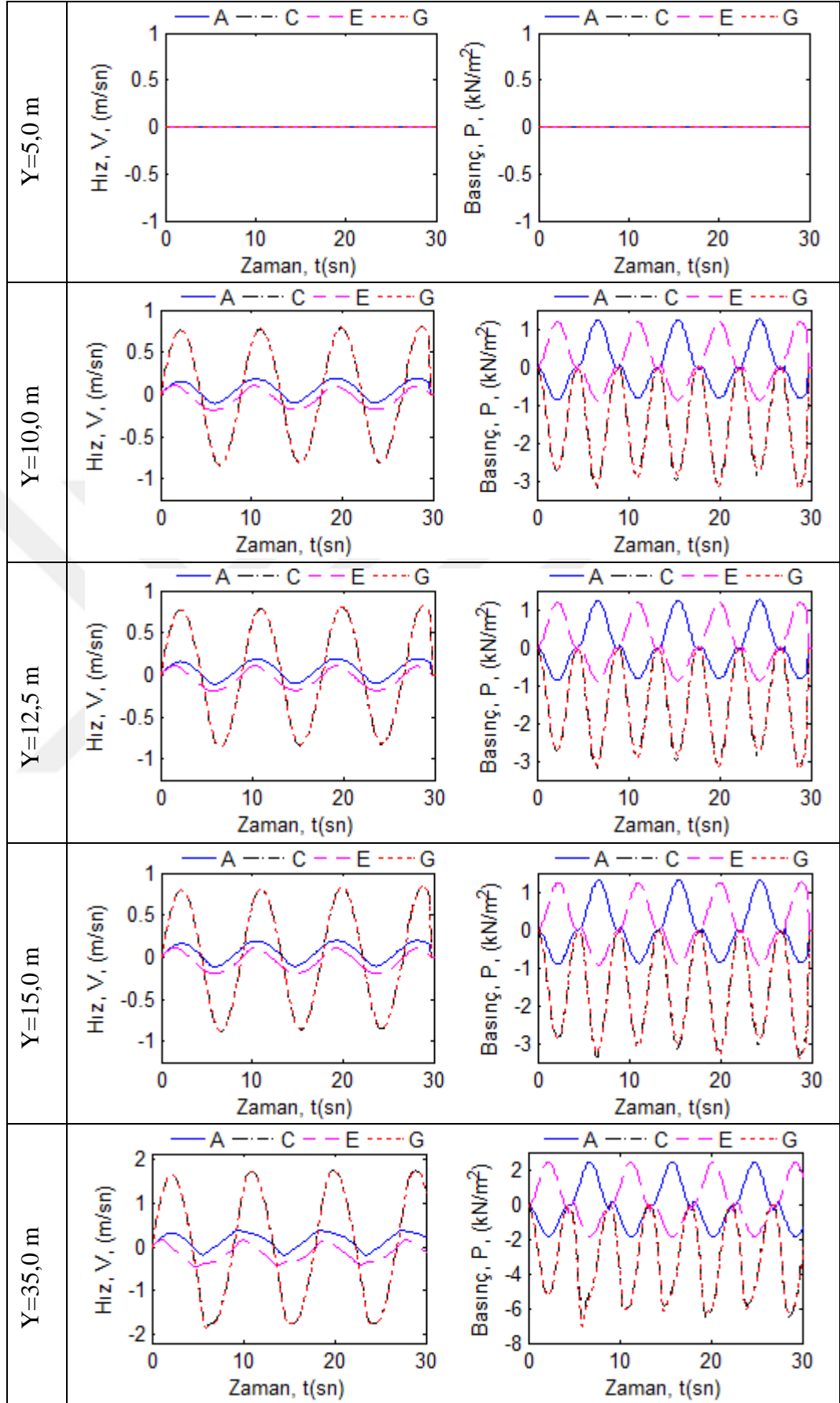
Şekil 9.13. S1-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.2.1.2 S2-RS-ZS Modeli

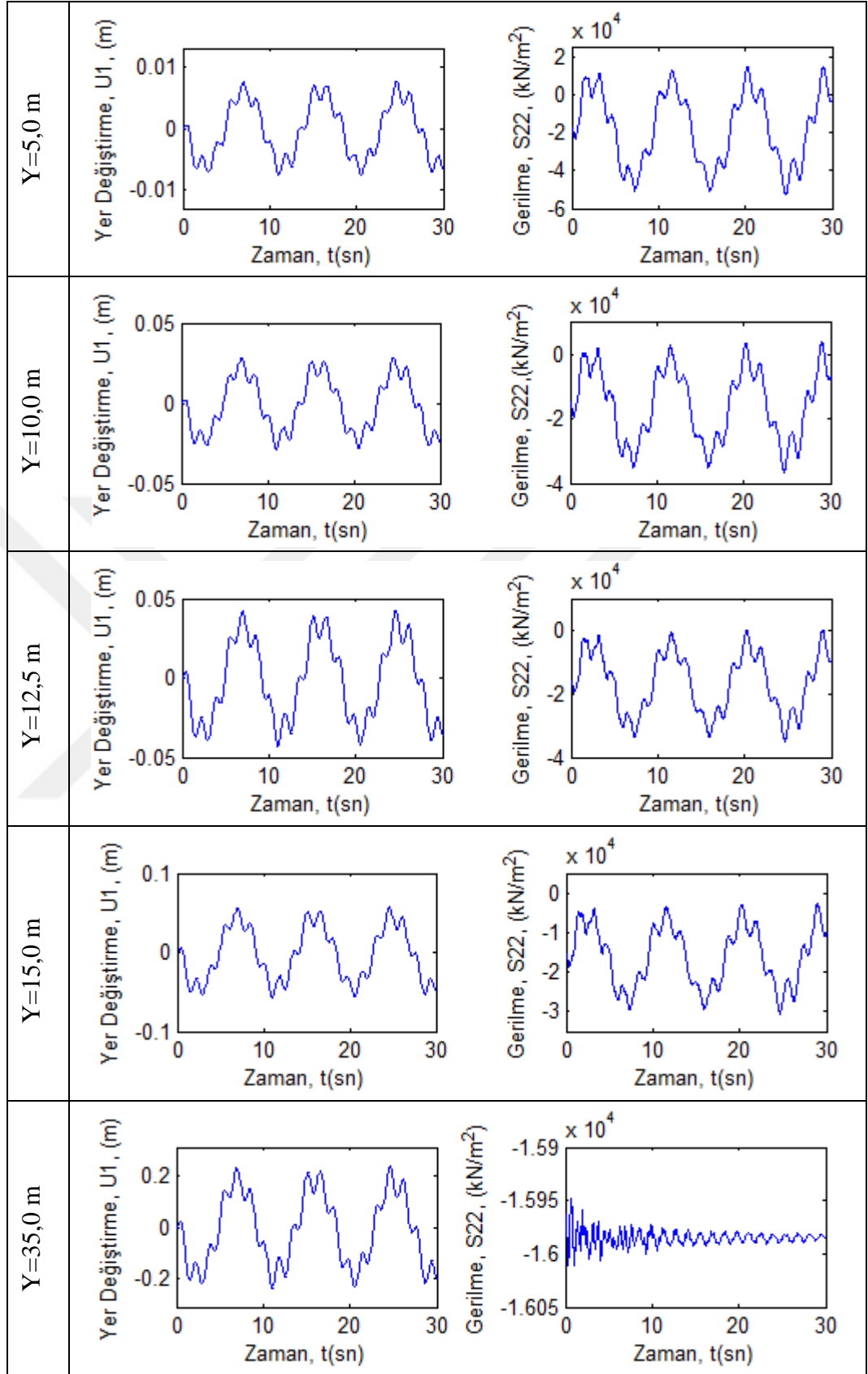


Şekil 9.14. S2-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))



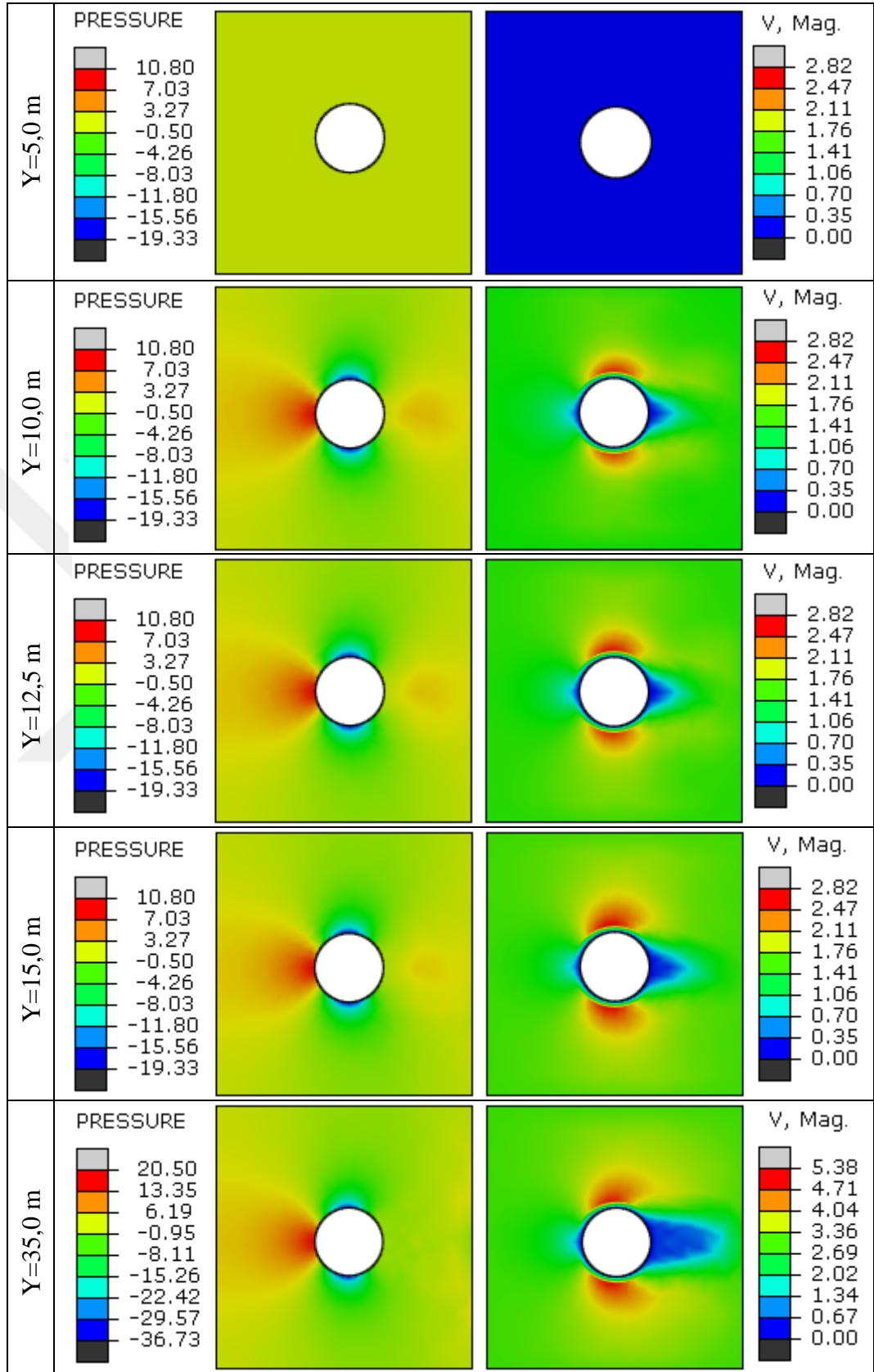


Şekil 9.15. S2-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri

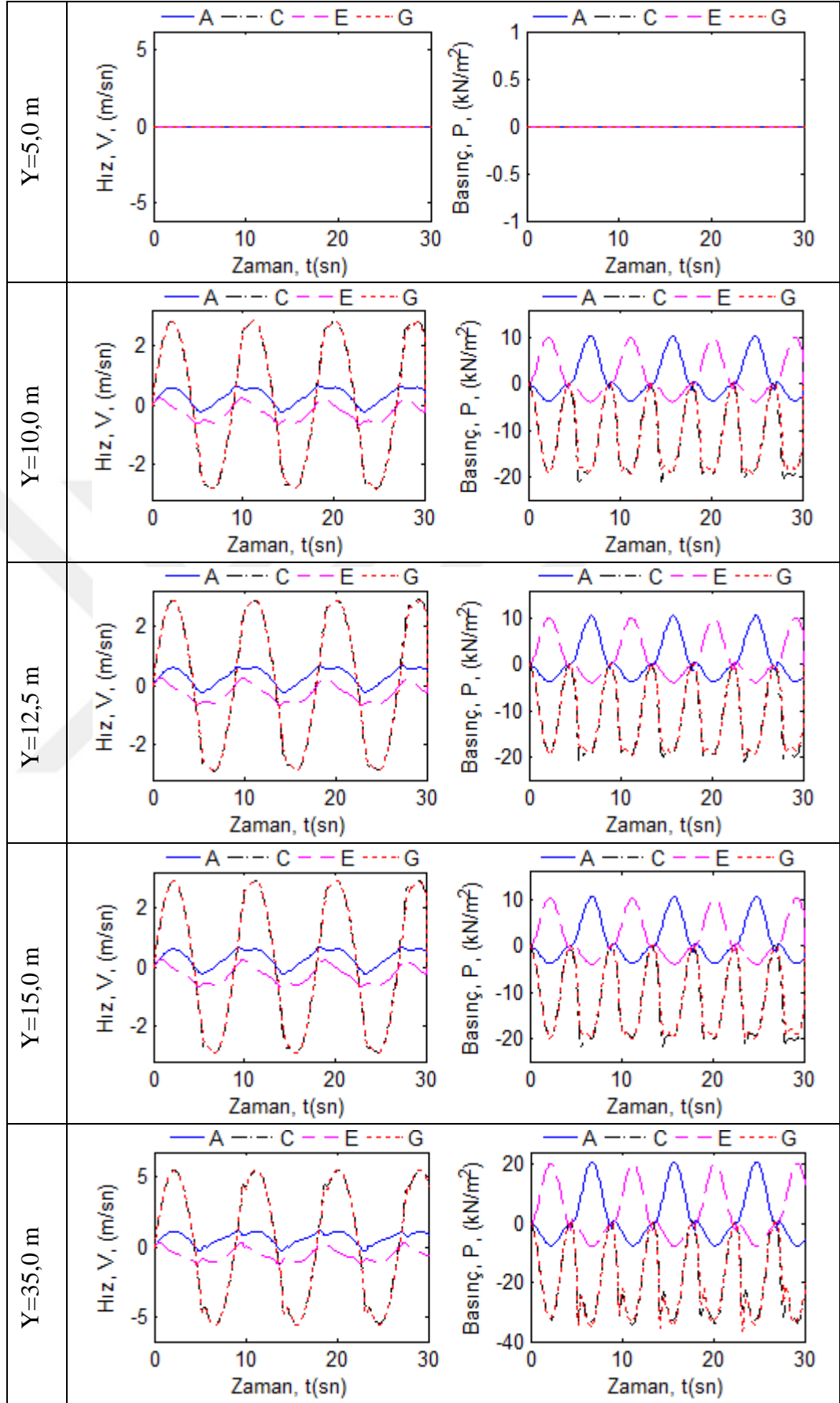


Şekil 9.16. S2-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

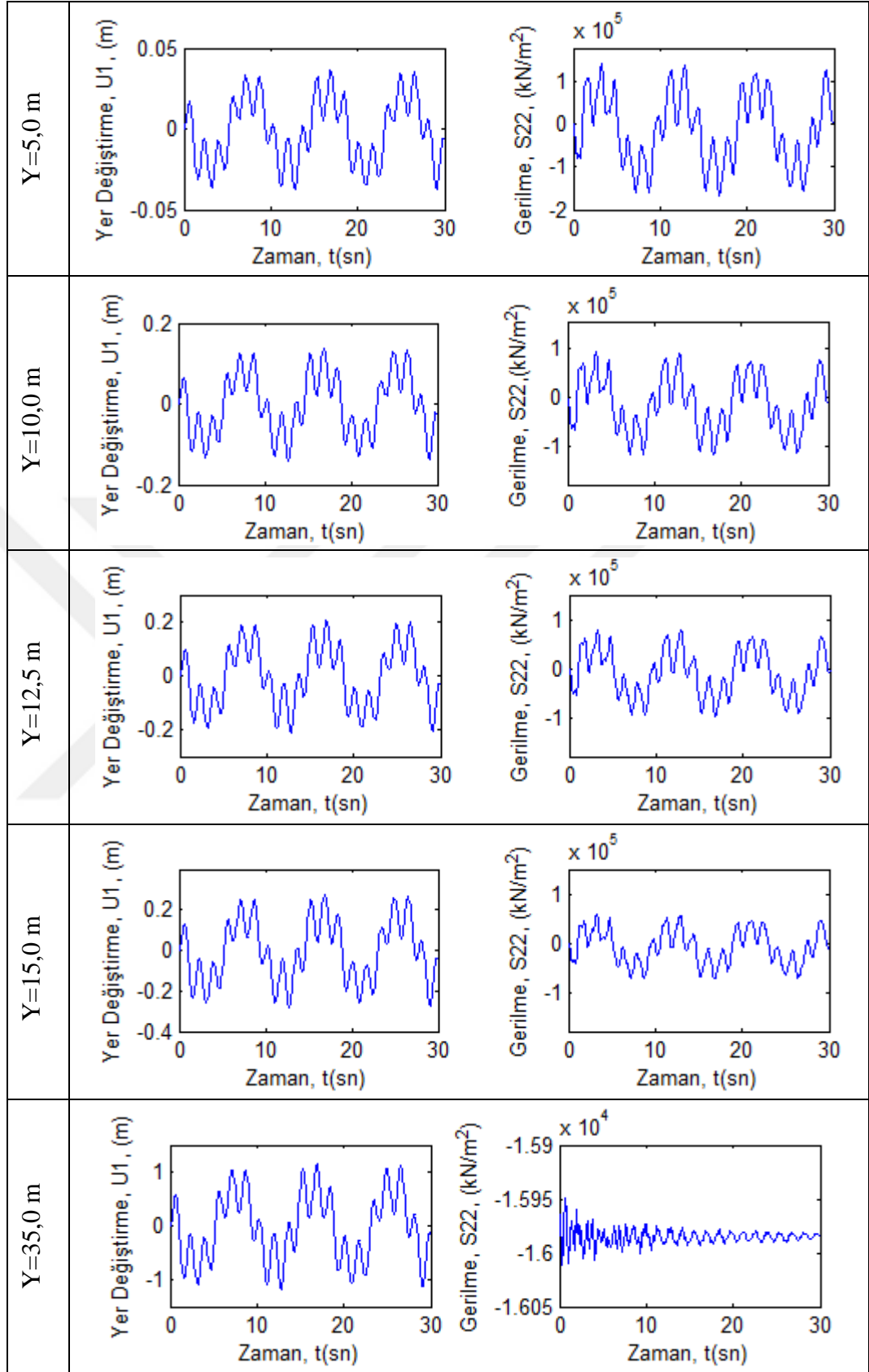
### 9.2.1.3 S3-RS-ZS Modeli



Şekil 9.17. S3-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))



Şekil 9.18. S3-RS-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



Şekil 9.19. S3-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

#### 9.2.1.4 Model IA İçin Değerlendirme

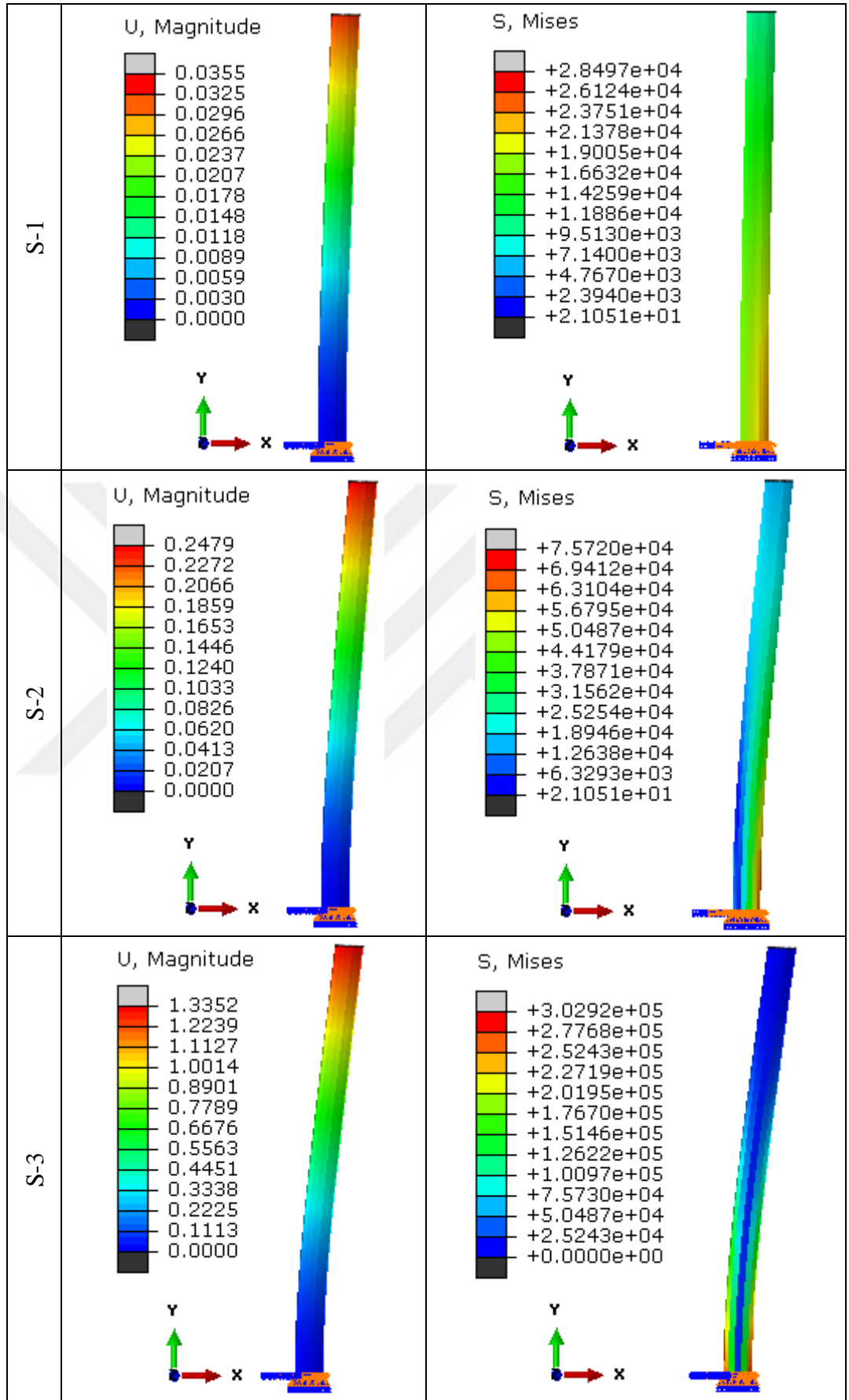
Sabit yoğunluklu ve sabit zemin ortamında yapılan analizler sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 9.1). Buna göre;

- Stokes -1 dalgası su yüzeyi seviyesinde  $U=0,1577$  m/s iken kazık etrafında C ve G noktalarında yaklaşık 1,66 kat artış görülmüştür.
- Bu artış Stokes-2 dalgasında 1,83 kat ve Stokes-3 dalgası için 1,55 kat olduğu görülmüştür.
- Basınç farkı; Stokes -1 dalgası için kazık etrafında yaklaşık 3 kat iken, Stokes -2 için 2,4 kat ve Stokes 3 için 1,8 kat olduğu görülmüştür.

Stokes 1-2-3 dalga teorileri etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.20'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.1. Model IA için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Etrafında			Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Max. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=35,0m)	Min. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=35,0m)	Max. Akışkan Hızı (m/s) (y=35,0m)	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0.498	-1.543	0.263	0.0355	28497.12
Stokes-2	2.517	-6.139	1.732	0.2479	75720,32
Stokes-3	20.517	-36.734	5.383	1.3352	302920.78

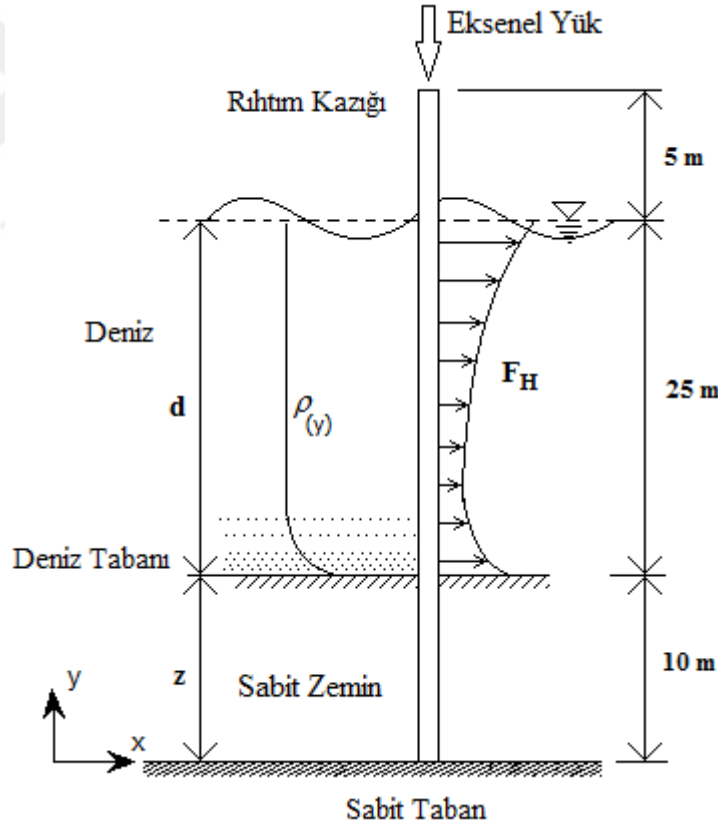


Şekil 9.20. Model IA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı ( U(m/sn), S(kN/m<sup>2</sup>))

### 9.2.2 Model IIA İçin Nümerik Analiz

Deniz tabanında askıda katı madde olması durumunda derinlikle değişen deniz suyu yoğunluğu söz konusu olmaktadır. Bu kısımda derinlikle değişen deniz ortamında Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorilerinin silindirik rıhtım kazığı etrafında oluşturacağı akış hızı ve basınç dağılımının tespiti, rıhtım kazığının yaptığı yer değiştirme ve gerilme değerleri hesaplanması için bir model belirlenmiştir.

Dikdörtgen kesitli boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan derinlikle değişen yoğunluklu dalgalı deniz ve boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 10 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan sabit zemin ortamında dairesel kesitli çapı;  $D=1.0 \text{ m}$  yüksekliği;  $L=40.0 \text{ m}$  olan ankastre mesnetli rıhtım kazığı yerleştirilmiştir (Şekil 9.21).



Şekil 9.21. Derinlikle değişen yoğunluklu deniz ortamı

Deniz tabanında dalga veya akıntı kökenli hareket neticesinde oluşan çalkantı bölgesindeki sedimentlerin belirli bir yükseklikte üniform veya değişken konsantrasyonda askıda kalması durumunda deniz suyu yoğunluğunda tabandan su

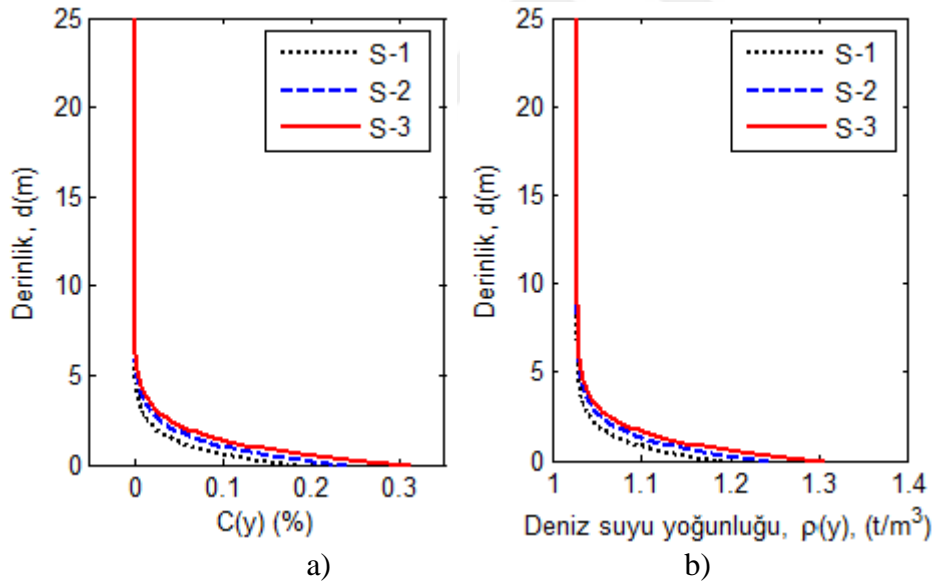


yüzeyine doğru eksponansiyel azalan bir form oluşur. Bu konsantrasyon değişimi deniz tabanından su yüzeyine kadar belirlenerek deniz suyu yoğunluğuna etkisi hesaplanabilir. Sediment düşey konsantrasyon profili, Denklem (6.45-6.49) yardımıyla Tablo 8.2-Tablo 8.4'deki veriler kullanılarak her üç farklı dalga teorisi için ayrı ayrı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 9.2. Derinlikle değişen konsantrasyon ve yoğunluk denklemleri

Dalga Tipi	Sediment Konsantrasyonu (%)	Değişken Deniz Suyu Yoğunluğu (t/m <sup>3</sup> )
S1	$c(y) = 0.1831 \exp(-y/0.9856)$	$\rho(y) = 1.029 + 0.1635 \exp(-y/0.9856)$
S2	$c(y) = 0.2402 \exp(-y/1.1732)$	$\rho(y) = 1.029 + 0.2145 \exp(-y/0.9856)$
S3	$c(y) = 0.3117 \exp(-y/1.3421)$	$\rho(y) = 1.029 + 0.2783 \exp(-y/0.9856)$

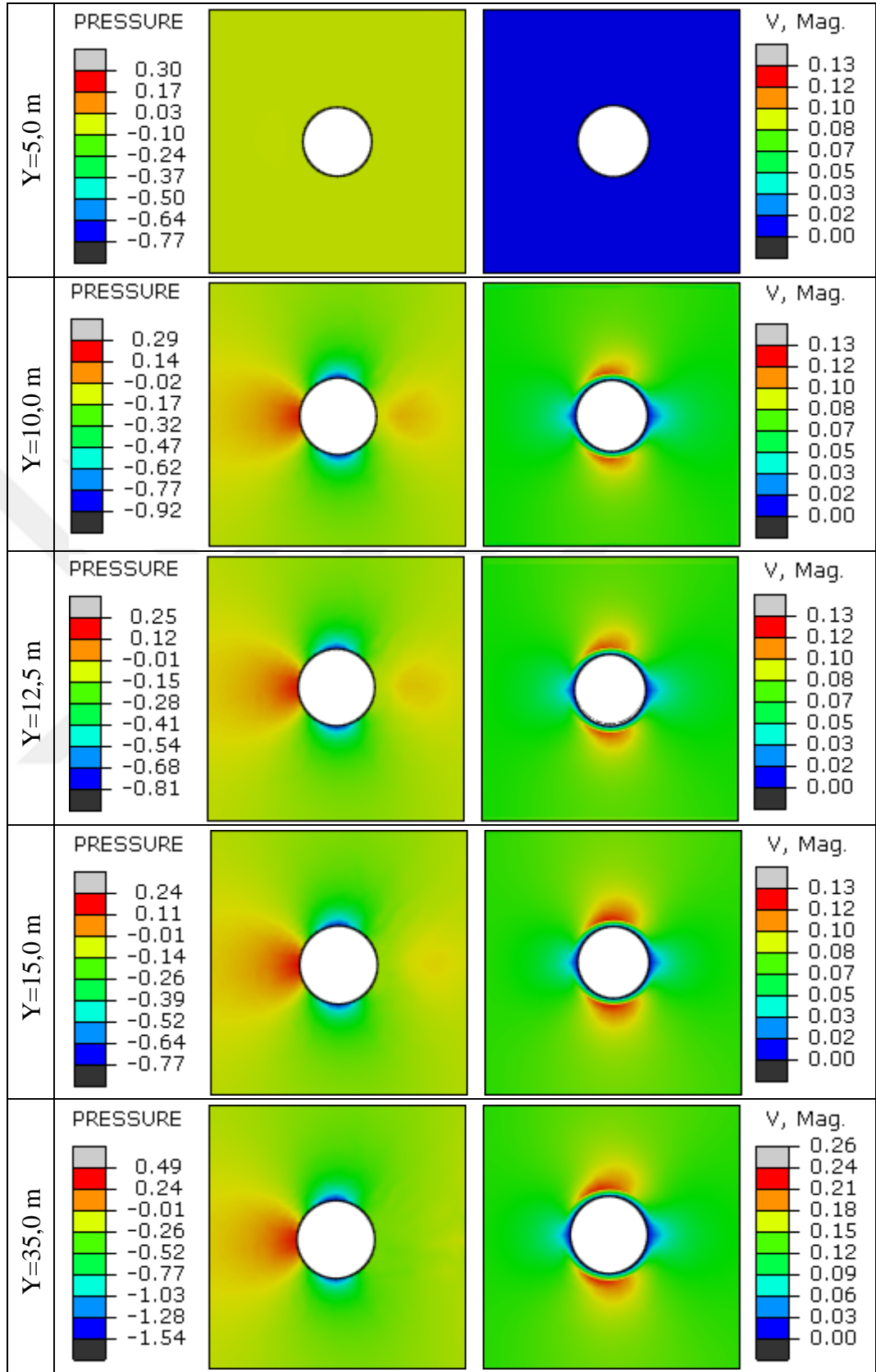
Derinlikle değişen konsantrasyon profili,  $c(y)$  Şekil 9.22.a'da gösterilmiştir. Deniz suyunun yoğunluğunun derinlikle değişimi  $\rho(y)$  ise Şekil 9.22.b 'de gösterilmiştir.



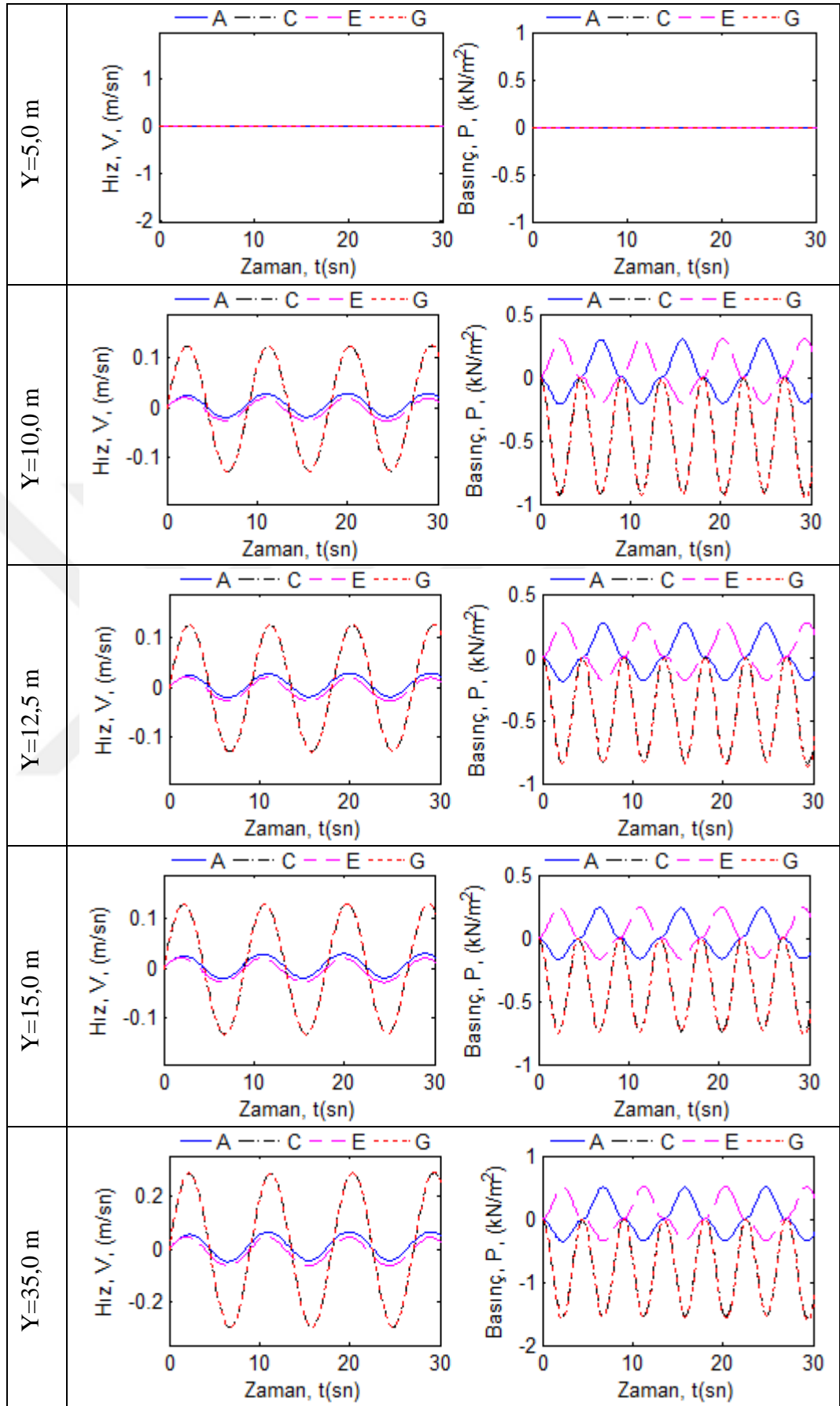
Şekil 9.22. a) Sediment düşey konsantrasyon profili,  $c(y)$ , b) Deniz suyu yoğunluk profili,  $\rho(y)$ .

Değişken yoğunluklu deniz suyu düşey profili  $\rho(y)$  belirlenmesinde sediment konsantrasyonu, sediment parçacık yoğunluğu ve deniz suyu yoğunluğu dikkate alınarak Denklem (6.50) ile Şekil 9.22.b'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Analiz sonuçları Şekil 9.23-Şekil 9.31'de gösterilmiştir.

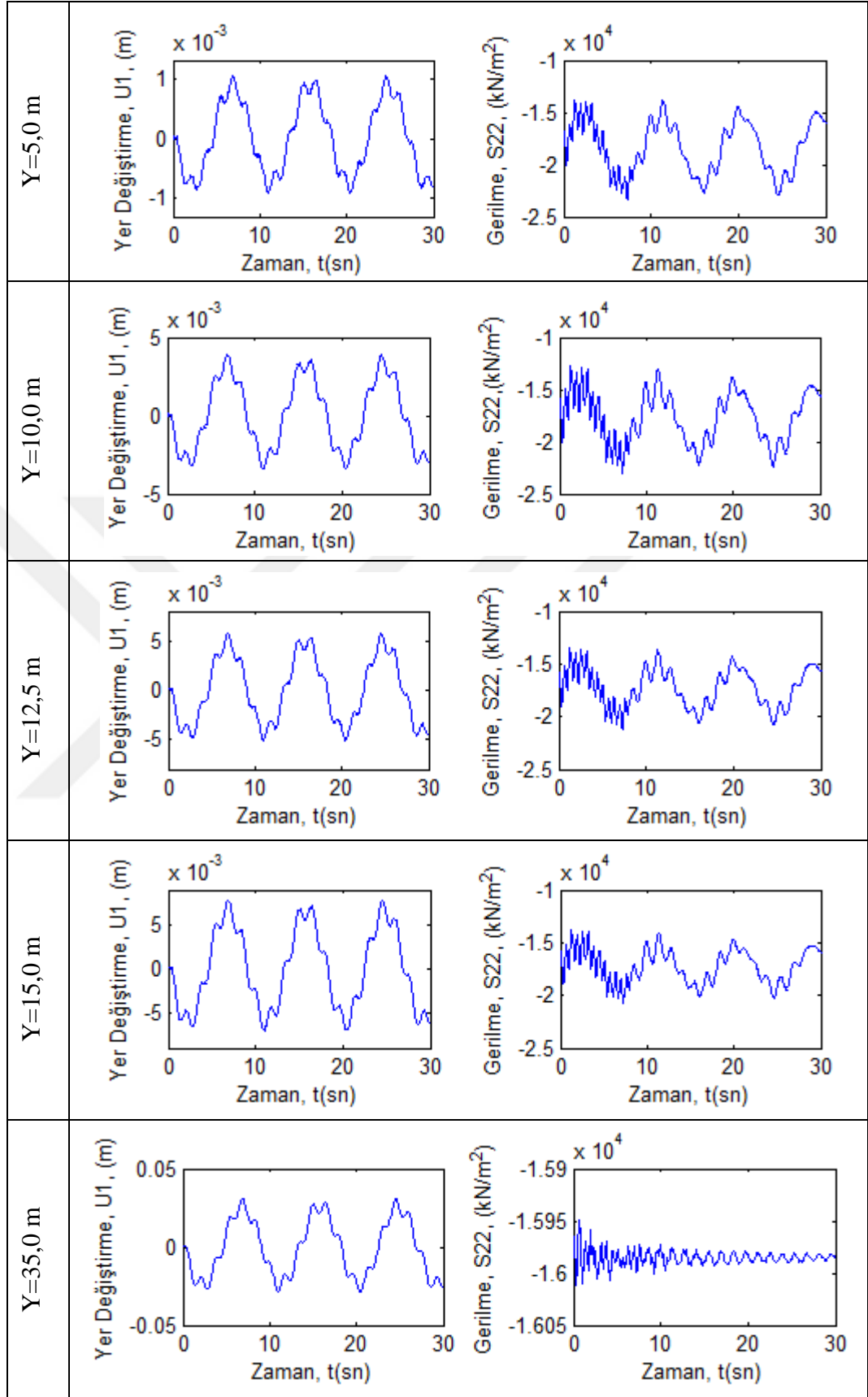
### 9.2.2.1 S1-RD-ZS Modeli



Şekil 9.23. S1-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

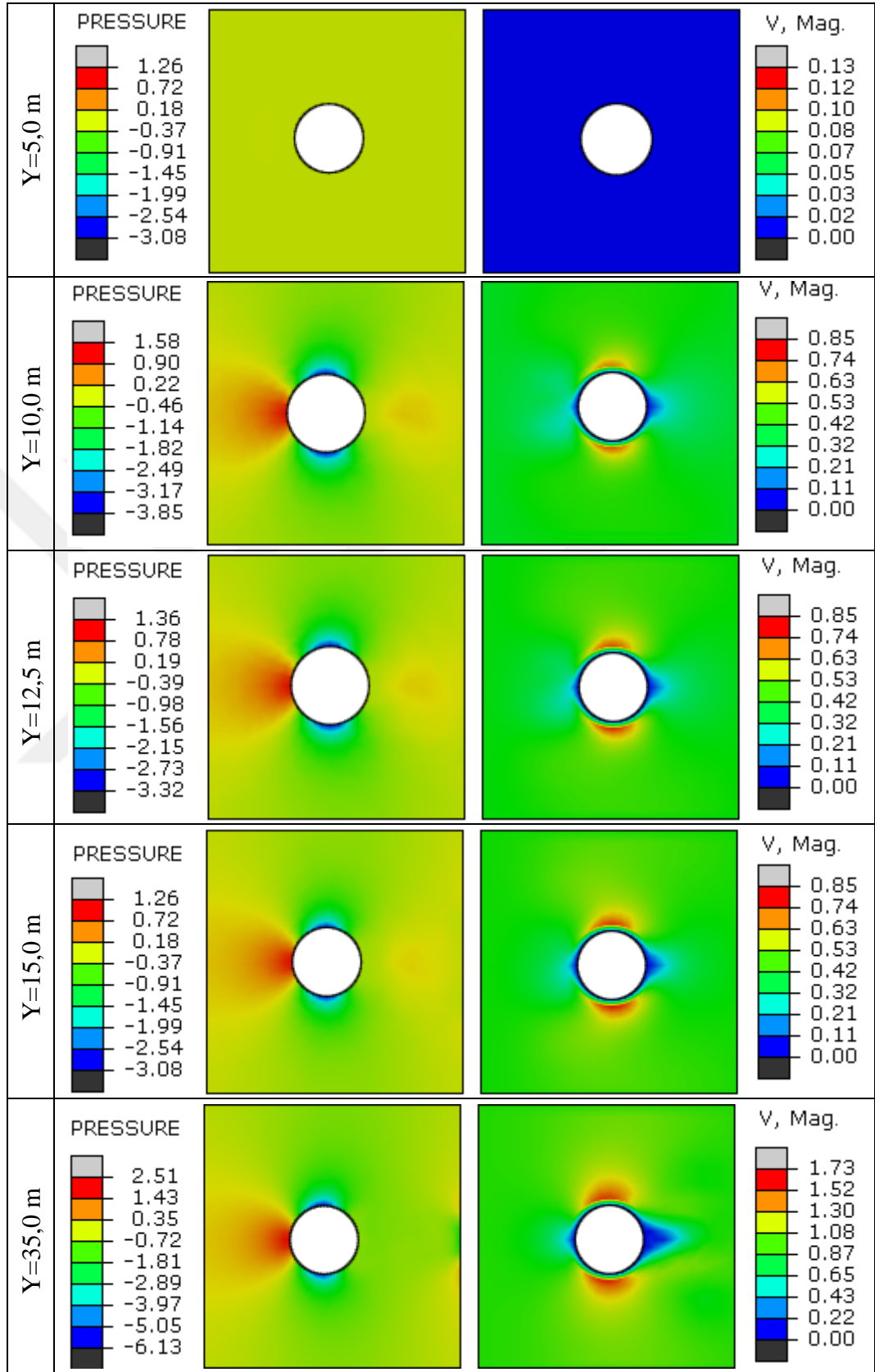


Şekil 9.24. S1-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri

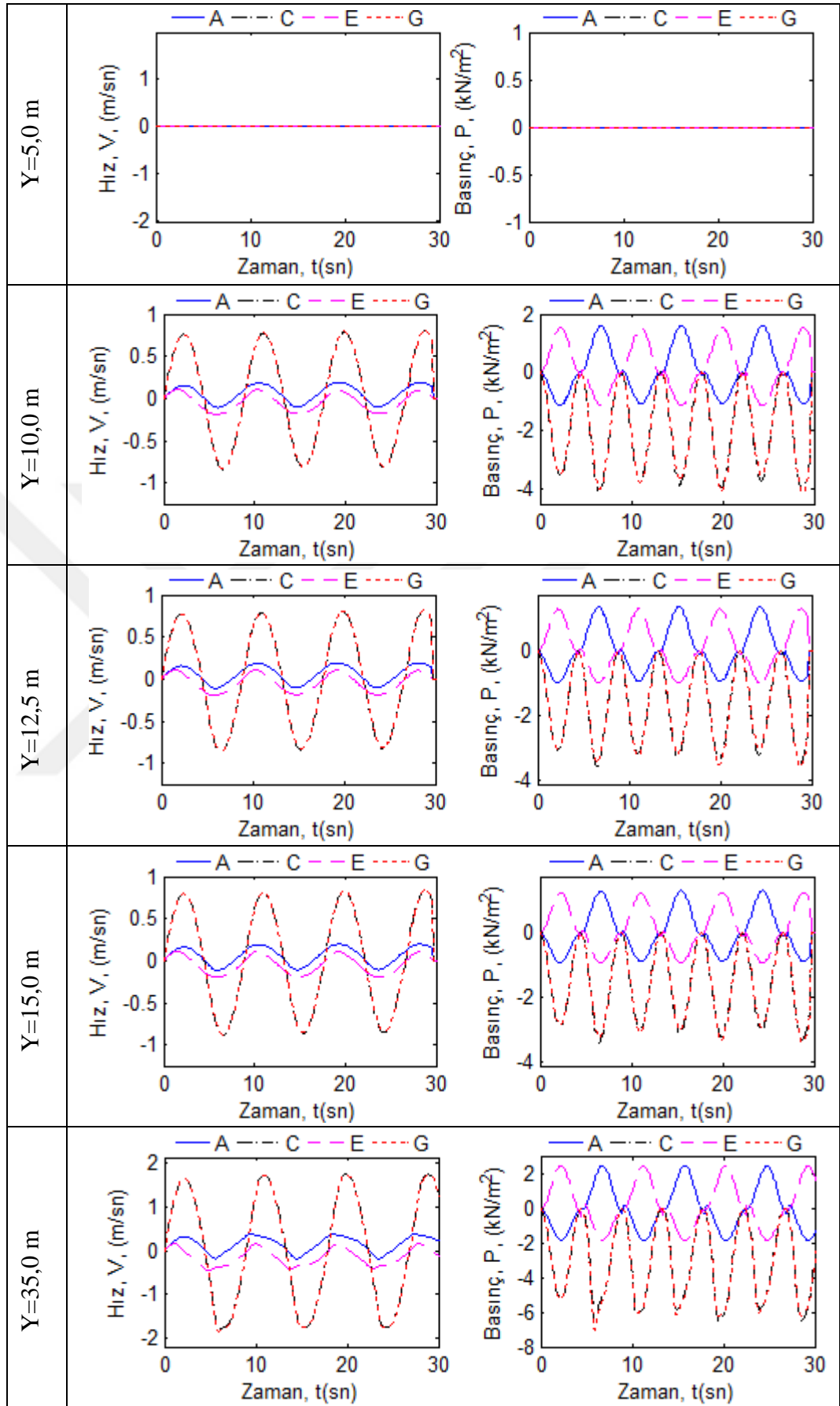


Şekil 9.25. S1-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

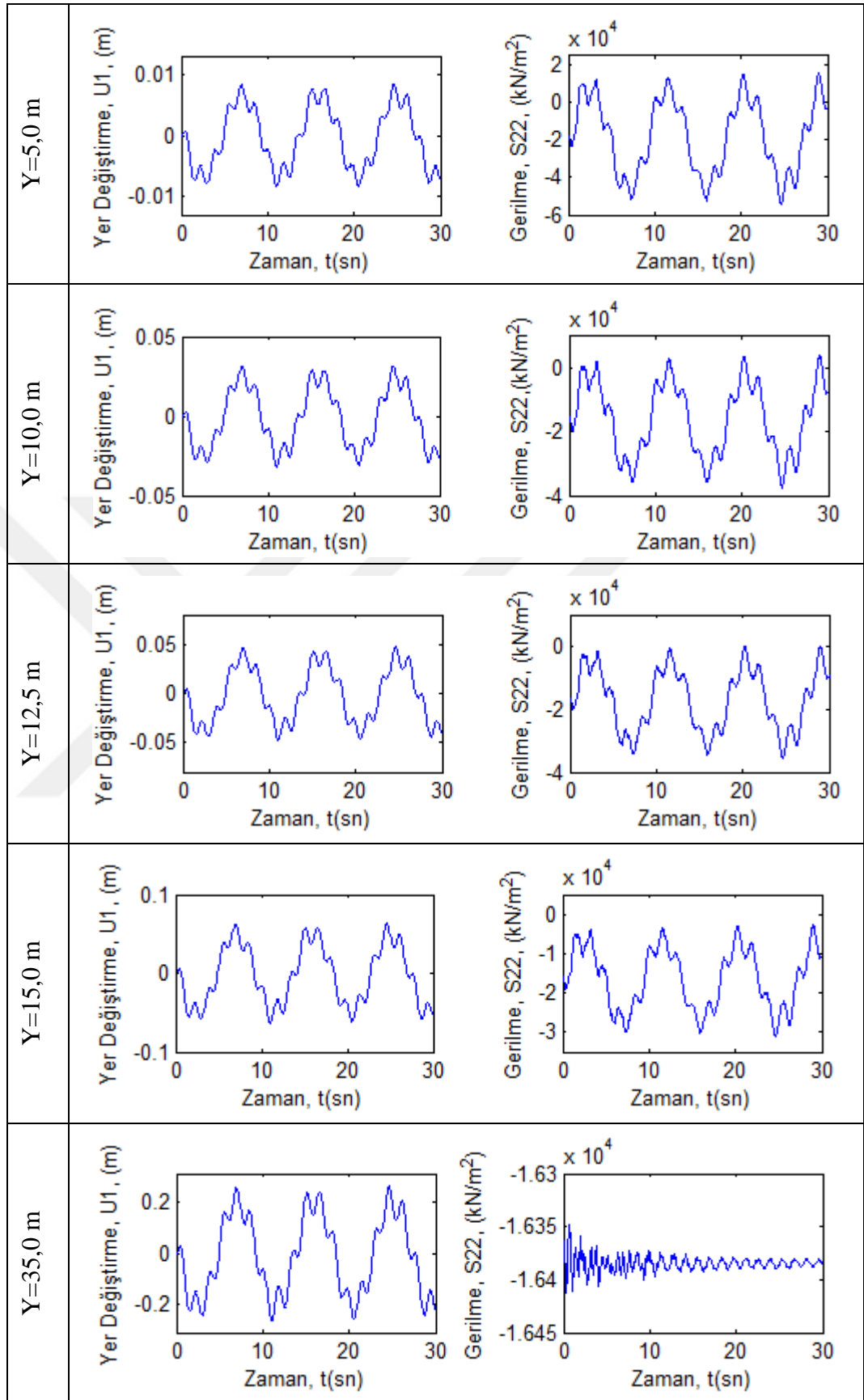
### 9.2.2.2 S2-RD-ZS Modeli



Şekil 9.26. S2-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

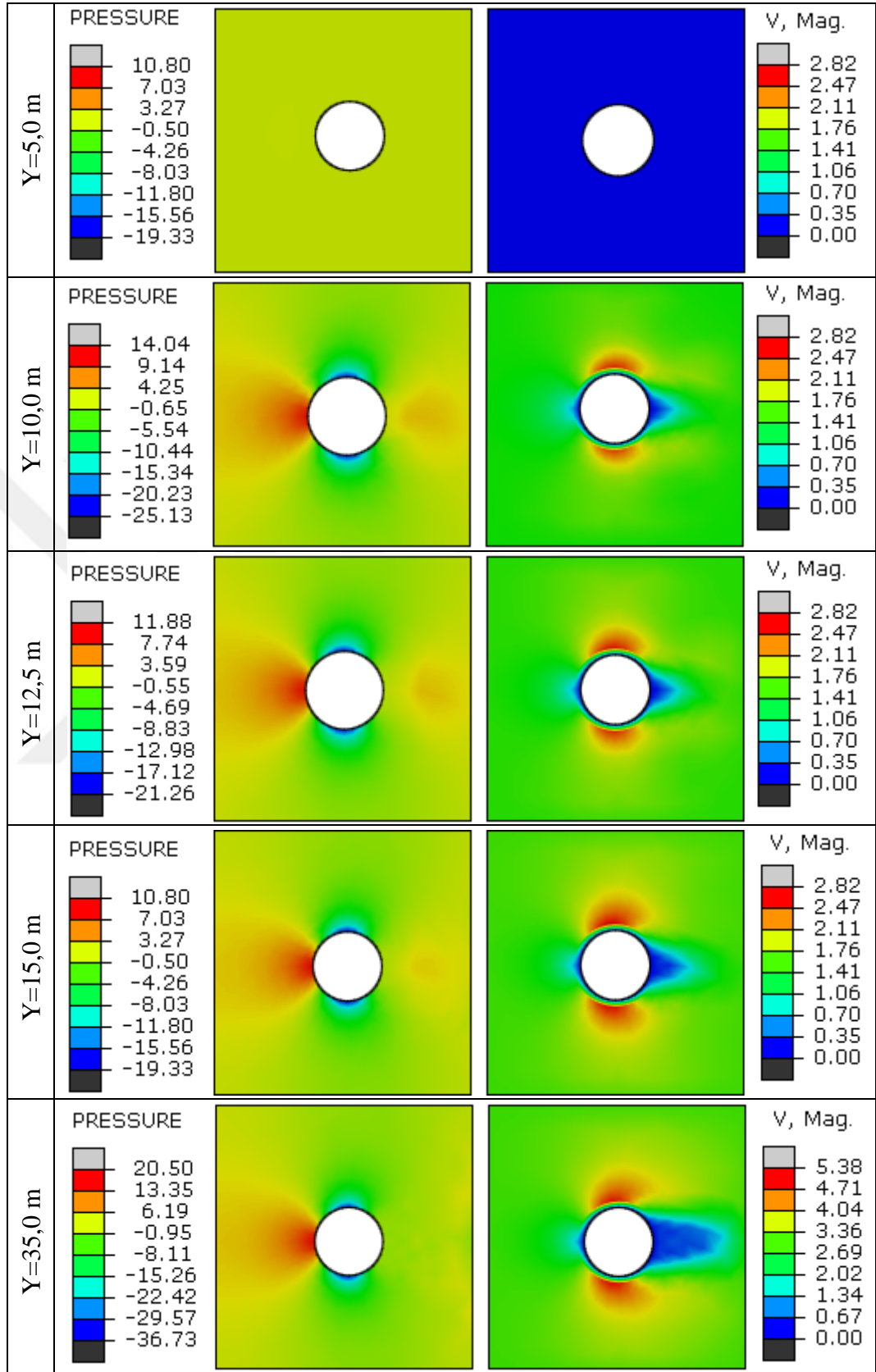


Şekil 9.27. S2-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



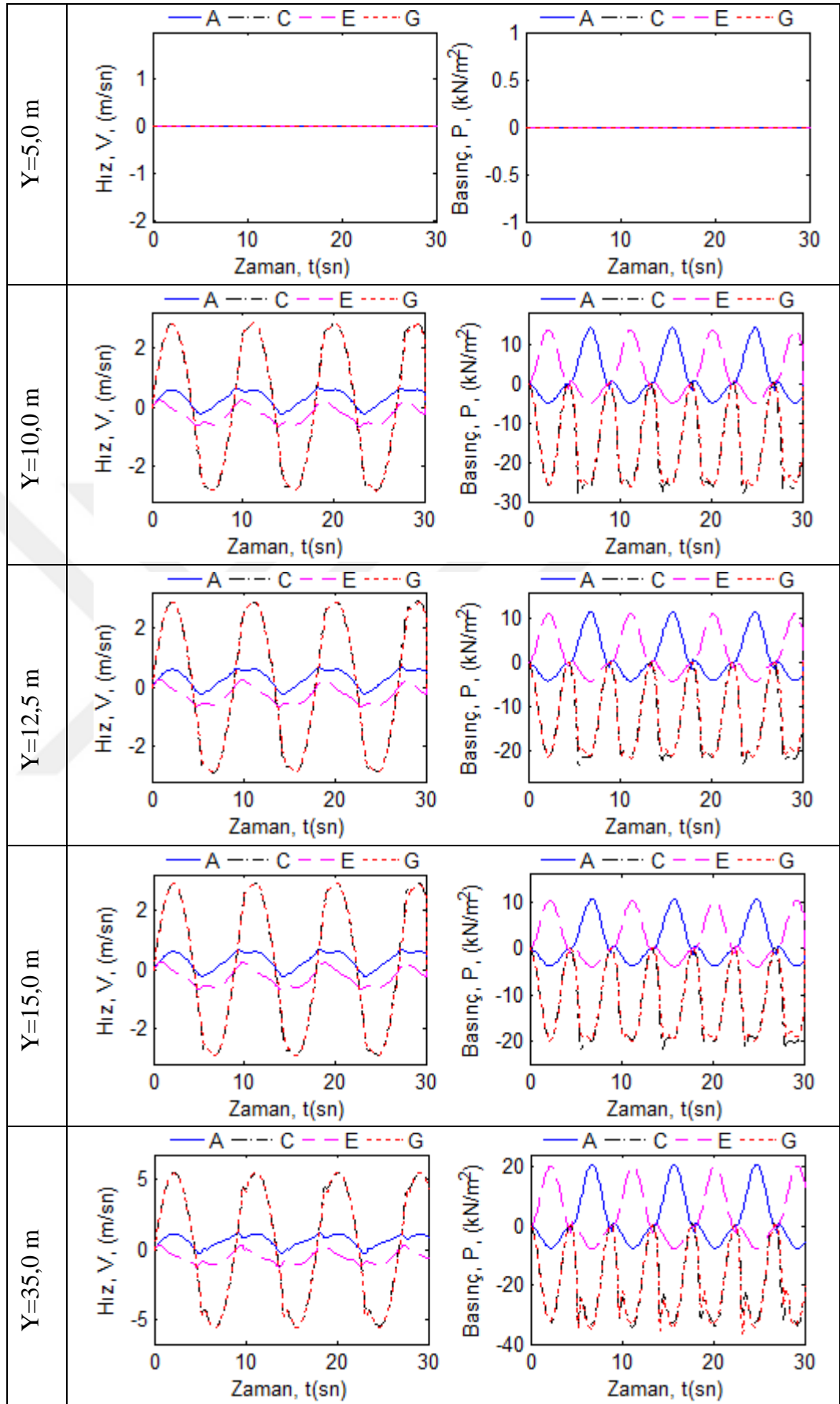
Şekil 9.28. S2-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değişirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.2.2.3 S3-RD-ZS Modeli

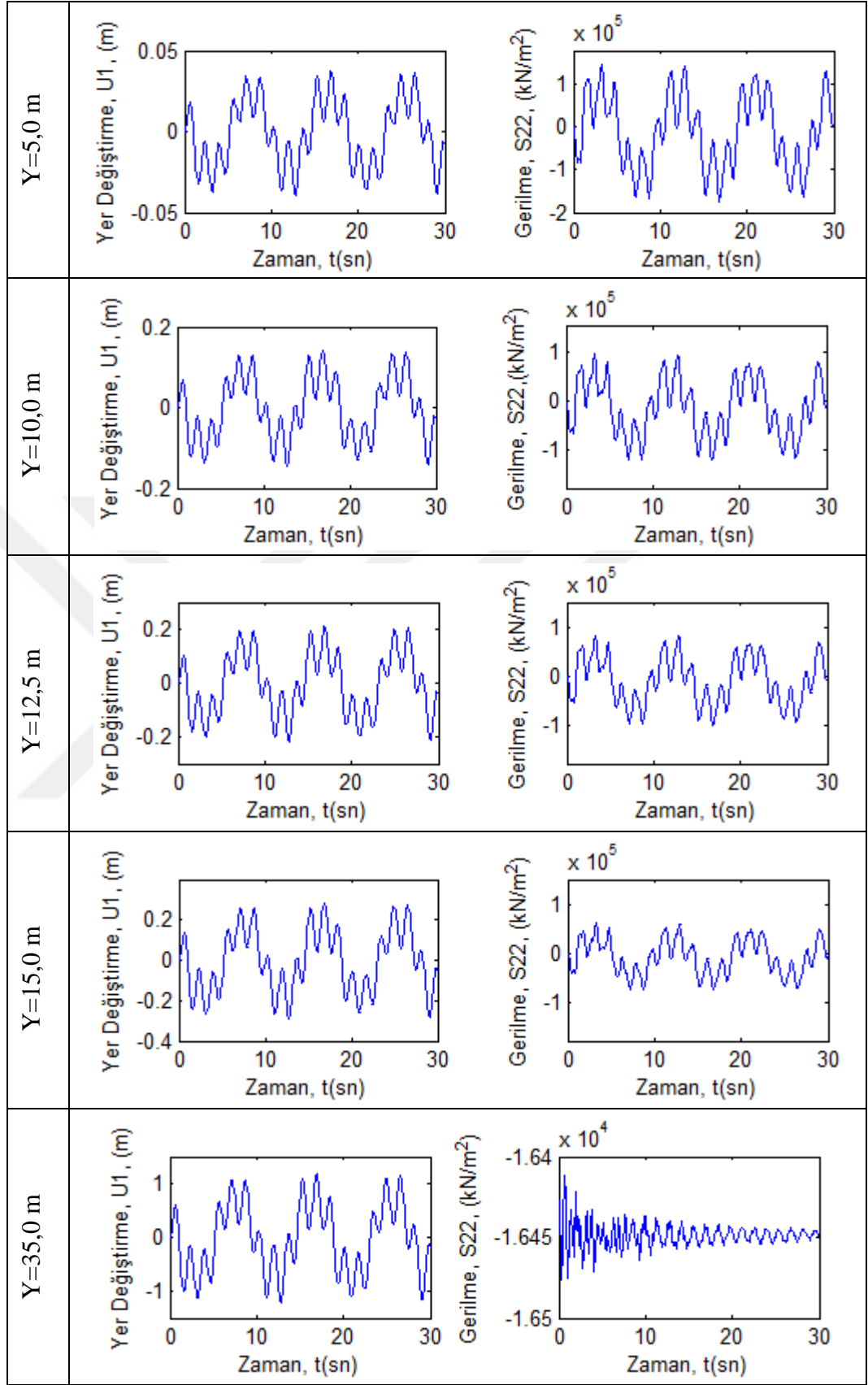


Şekil 9.29. S3-RD-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))





Şekil 9.30. S3-RD-ZS Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



Şekil 9.31. S3-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

#### 9.2.2.4 Model IIA İçin Değerlendirme

Derinlikle değişken yoğunluklu deniz ortamında yapılan analizlerde deniz tabanında sediment hareketi ile oluşan askıdaki katı madde konsantrasyonunun neden olduğu yoğunluk değişimi hesaplanmıştır (Tablo 9.2). Şekil 9.22'de görüleceği üzere yoğunluk farkı deniz tabanına yakın kesimde artış göstermektedir.

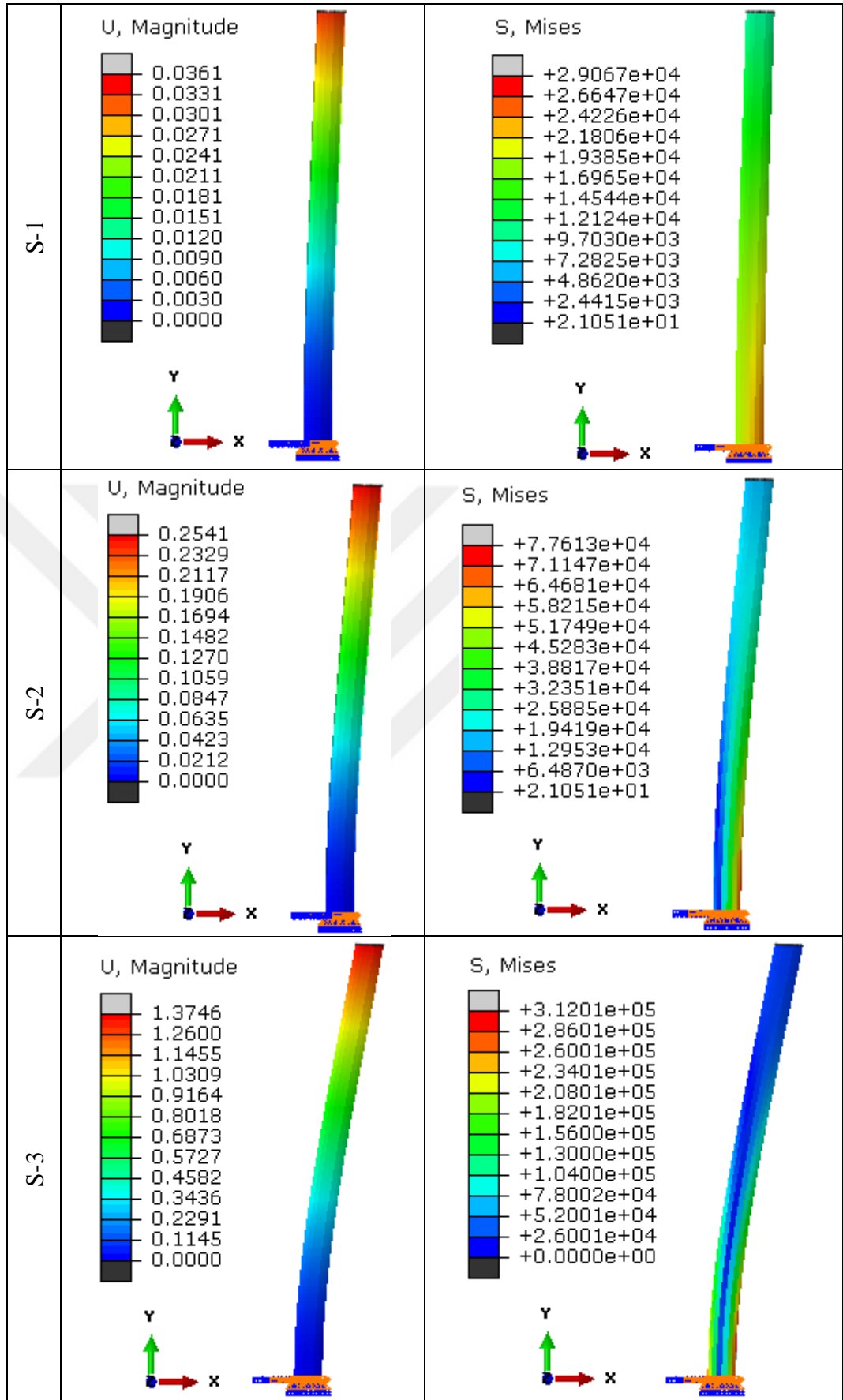
Bu yoğunluk farkı kazığa etkileyen hidrodinamik kuvveti artırmaktadır. Fakat kazığın deniz tabanına ankastre mesnetlendiği uçundaki bu kuvvet artışı kazık elemanın üzerindeki yer değiştirme ve gerilme sonuçlarına fazla etki etmemektedir (Tablo 9.3). Ayrıca analizlerde deniz tabanındaki yoğunluk farkı kazığa etkileyen basınçlar üzerinde sabit yoğunluklu ortama göre farkı Tablo 9.3 'de gösterilmiştir. Bu basınç artışı üssel formada azaldığı için kazık üzerinde etkili bir kuvvet meydana getirmemektedir.

Stokes 1-2-3 dalga teorileri etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.32'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.3. Model IIA için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Etrafında			Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Max. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=10,0m)	Min. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=10,0m)	Max. Akışkan Hızı (m/s) (y=10,0m)	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0.24 (%21)*	-0.77 (%21)	0.13 (%0.0)	0,0361 (%1.7)	29067.32 (%1.9)
Stokes-2	1.58 (%25)	-3.85 (%25)	0.85 (%0.0)	0.2541 (%2.1)	77613.44 (%2.5)
Stokes-3	14.04 (%31)	-25.13 (%31)	5.383 (%0.0)	1.3746 (%2.9)	312014.12 (%3.1)

\* Tabloda (%....) Sabit yoğunluklu deniz ve sabit zemin ortamına (Model IA) göre sonuçlar arasındaki farkları göstermektedir.

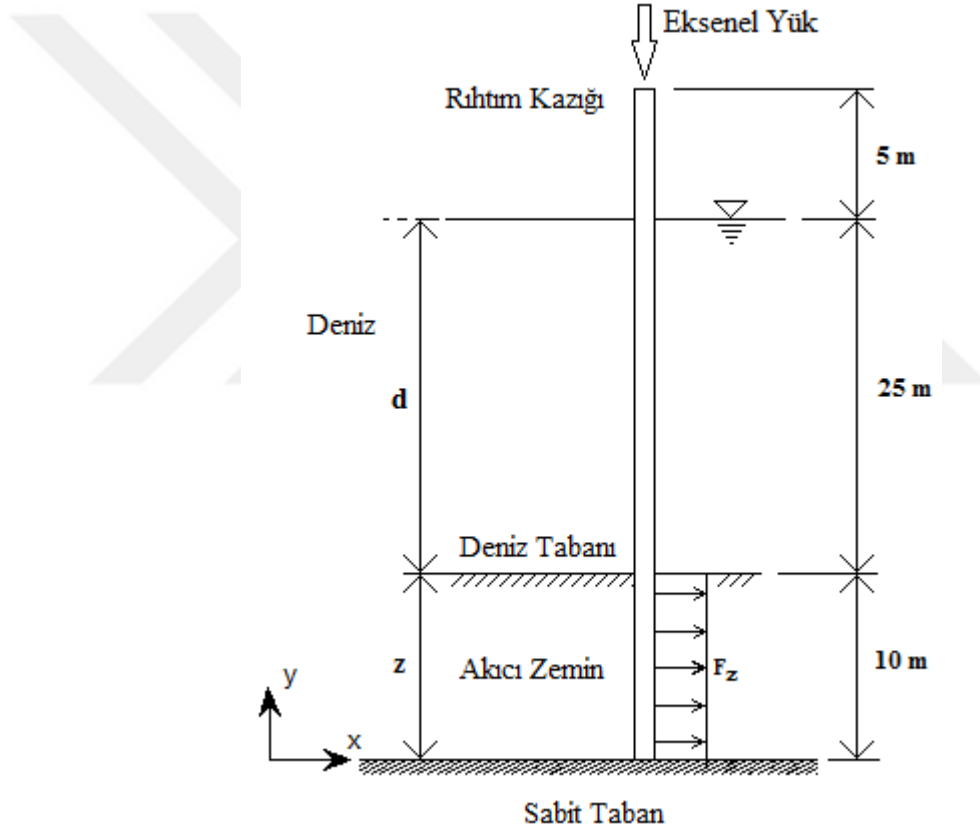


Şekil 9.32. Model IIA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))

### 9.2.3 Model IIIA İçin Nümerik Analiz

Durgun deniz ortamında deniz tabanındaki belirli bir kalınlıktaki zemin tabakasının akıcı sıvılaştırılmış zemin fiziğine uygun olarak yoğunluklu kararlı akışa geçmesi durumunda kazık etrafındaki akış hızı ve basınç parametreleri ile kazık üzerinde meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri analiz edilmiştir.

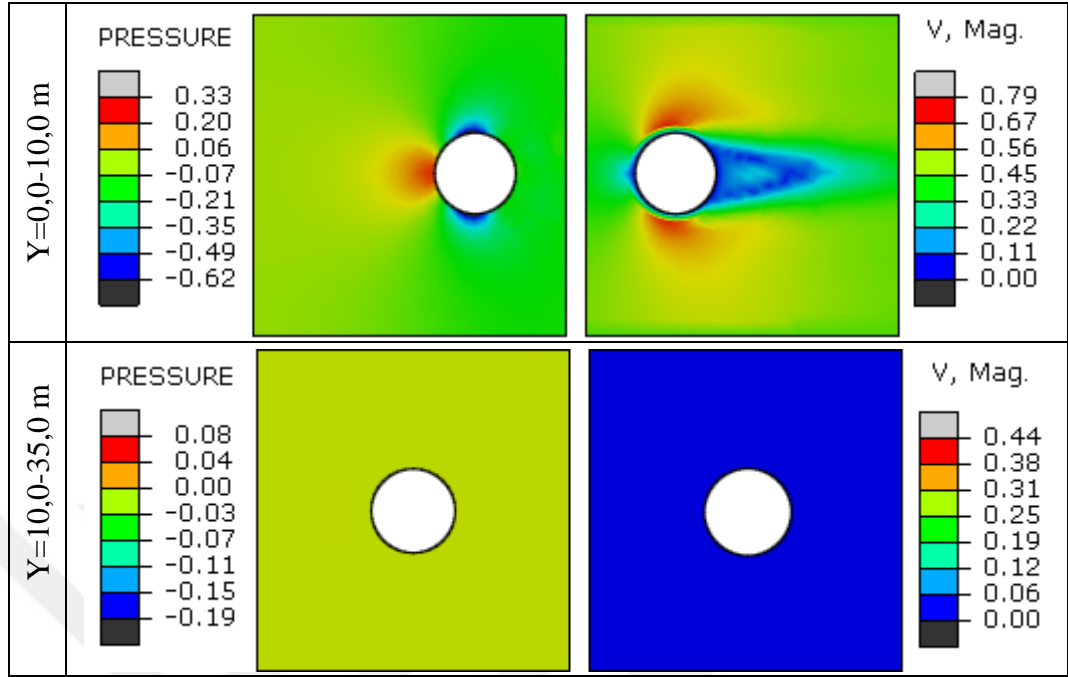
Dikdörtgen kesitli boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan sabit yoğunluklu durgun deniz ve boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 10 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan kararlı akışa sahip sıvılaştırılmış zemin ortamına dairesel kesitli çapı;  $D=1,0 \text{ m}$  yüksekliği;  $L=40,0 \text{ m}$  olan ankastre mesnetli rıhtım kazığı yerleştirilmiştir (Şekil 9.33).



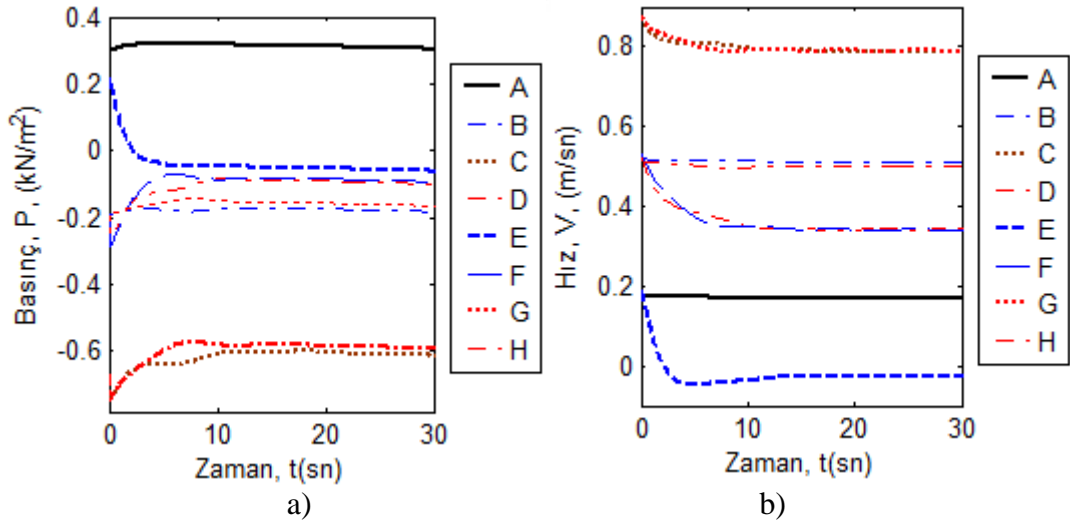
Şekil 9.33. Durgun Deniz Tabanında Akıcı Sıvılaştırılmış Zemin Hareketi

Sonlu elemanlar modelinde akıcı zemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Abaqus/CFD) çözücüsü ile Rıhtım kazığı ise Dinamik Sonlu Elemanlar (Abaqus/Standart-Explicit) çözücüsü ile modellenmiştir. Durgun deniz ortamında kazık üzerinde inceleme noktaları belirlenerek bu noktalardaki akışkana ait basınç, hız ve kazığa ait yer değiştirme, gerilme değerleri incelenecektir (Şekil 8.2).

### 9.2.3.1 S0-RS-ZA Modeli

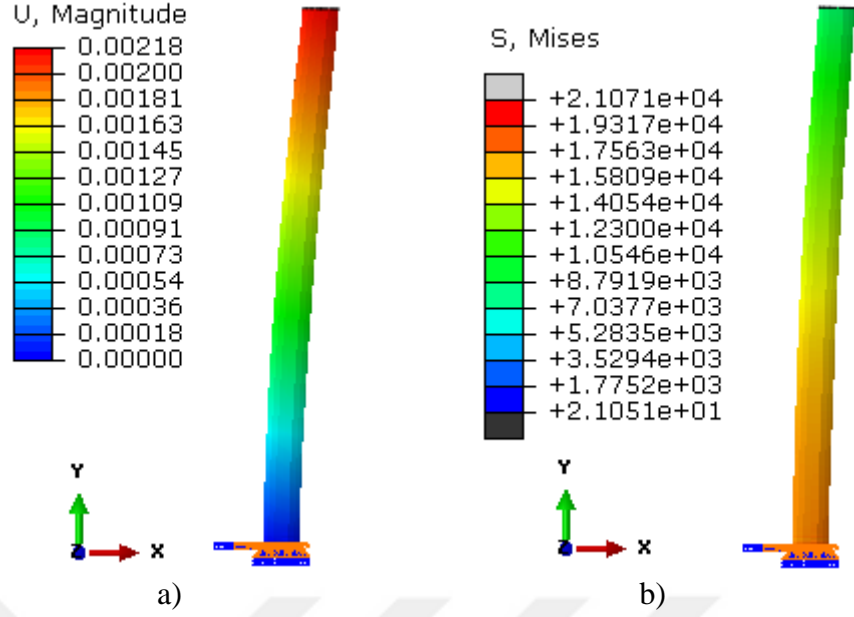


Şekil 9.34. S0-RS-ZS Modeli için basınç ve hız dağılımı ( $P(\text{kN/m}^2)$ ,  $V(\text{m/s})$ )



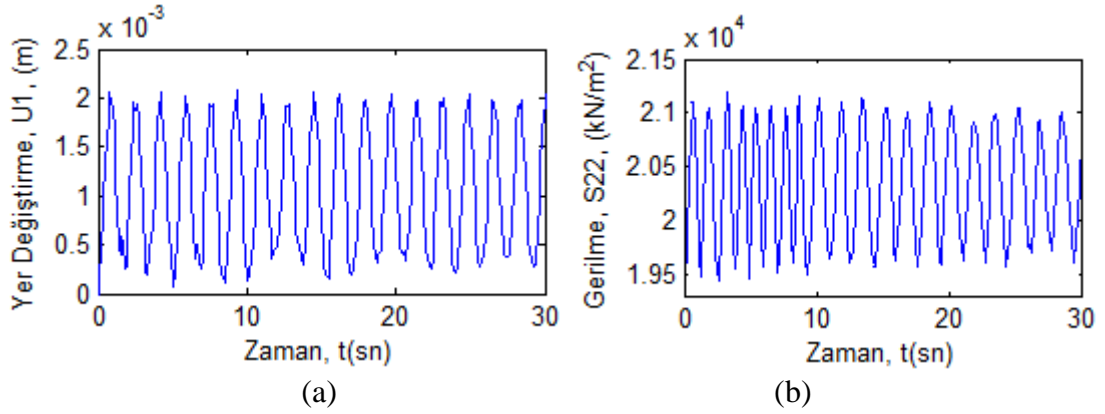
Şekil 9.35. Rıhtım kazığı etrafında oluşan akışkan a)basınç-zaman grafiği, b) hız-zaman grafiği ( $y=5.0\text{m}$ )

Rıhtım kazığı etrafında tespit edilen basınç ve hız dağılımları Şekil 9.34'de ve bu değerlerinin zamanla değişim grafiği Şekil 9.35'de gösterilmiştir ( $z=5,0\text{ m}$ ,  $V_z=0,50\text{ m/sn}$ ,  $D=1,0\text{ m}$ ,  $P_{\text{ref}}=0\text{ kN/m}^2$ ). Dinamik analizde belirtilen noktalardaki basınç değerlerinin zamanla değişimi ilk 15 sn süresi sonunda kararlı biçimine ulaşmıştır.



Şekil 9.36. Rıhtım kazığı üzerinde oluşan a) yer değiştirme değerleri U(m), b) gerilme değerleri S(kN/m<sup>2</sup>)

Yapıya etkileyen akıcı sıvılaştırılmış zemin itki kuvvetleri sonucunda s=14mm et kalınlığındaki çelik kazığın tepe noktasında 0,00218 m yer değiştirme (Şekil 9.36.a) ve kazık tabanında 21071,20 kN/m<sup>2</sup> büyüklüğünde Mises gerilmesi hesaplanmıştır (Şekil 9.36.b). Elde edilen bu yer değiştirme ve gerilme değerlerinin zamanla değişimi Şekil 9.37.a-b'de gösterilmiştir.



Şekil 9.37. a) Rıhtım kazığı üzerinde oluşan yer değiştirme - zaman grafiği, b) Rıhtım kazığı tabanında oluşan gerilme - zaman grafiği.

### 9..2.3.2 Model IIIA İçin Değerlendirme

Rıhtım kazıkları üzerinde yapılan analizler sonucunda;

- Akıcı zemin hızı silindirik kazık etrafından geçerken kazık yüzeylerindeki C ve G noktalarında akış hızı  $\approx 1.6$  kat artmıştır.

- Kazık üzerindeki A, C ve G noktalarında kazık çapının 2 katı mesafesinde akışın hız formu değişikliğe uğramaktadır. Gözlenen  $2D$  mesafeden sonra akış hızı normal formunda devam ettiği görülmüştür. Kazık yüzeyindeki basınç değerleri içinde aynı durum görülmüştür.
- $V=0,02-0,10-0,25-0,50$  m/sn hızları için  $D$  çaplı silindirik kazığa etkiyen hidrodinamik kuvvetler ve hidrodinamik sürükleme katsayısı  $C_D \approx 1,35$  olarak tespit edilmiştir (Tablo 9.4).
- Çeşitli akıcı zemin hızları için yapılan analizlerde akış hızı ile orantılı artan basınç, hız, yer değiştirme ve gerilme değerleri verilmiştir (Tablo 9.5).

Tablo 9.4. Değişik akıcı zemin hızlarında  $C_D$  katsayısı ( $D=1.00$  m)

$\rho_z$ (t/m <sup>3</sup> )	V (m/sn)	$F_D$ (kN/m)	$C_D$
1,922	0.05	0,0033	1,38
	0.1	0,0131	1,36
	0.25	0,0812	1,35
	0.50	0,3210	1,33

Tablo 9.5. Model IIIA için akışkan-yapı etkileşimi

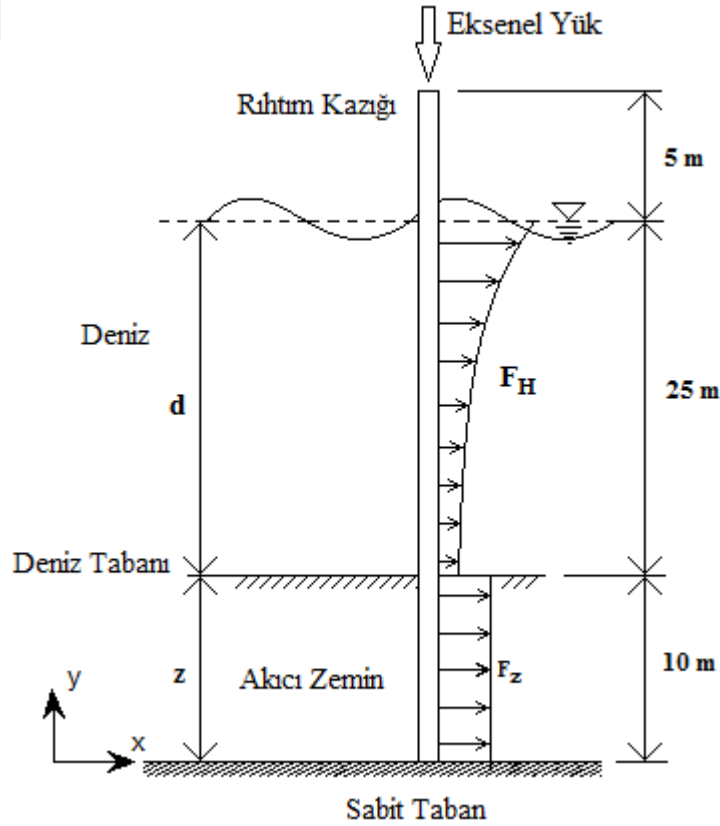
Tabaka İçi Üniform Akış Hızı (m/sn)	Rıhtım Kazığı Etrafında			Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Max. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=10,0m)	Min. Akışkan Basıncı (kN/m <sup>2</sup> ) (y=10,0m)	Max. Akışkan Hızı (m/s) (y=10,0m)	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
$V_x=0,05$	0,0029	-0,0027	0,0671	0,00006	8533,96
$V_x=0,10$	0,0109	-0,0119	0,1362	0,00014	12120,16
$V_x=0,25$	0,0632	-0,1277	0,3693	0,00061	17199,04
$V_x=0,50$	0,3380	-0,628	0,7935	0,00218	21071,78



### 9.2.4 Model IVA İçin Nümerik Analiz

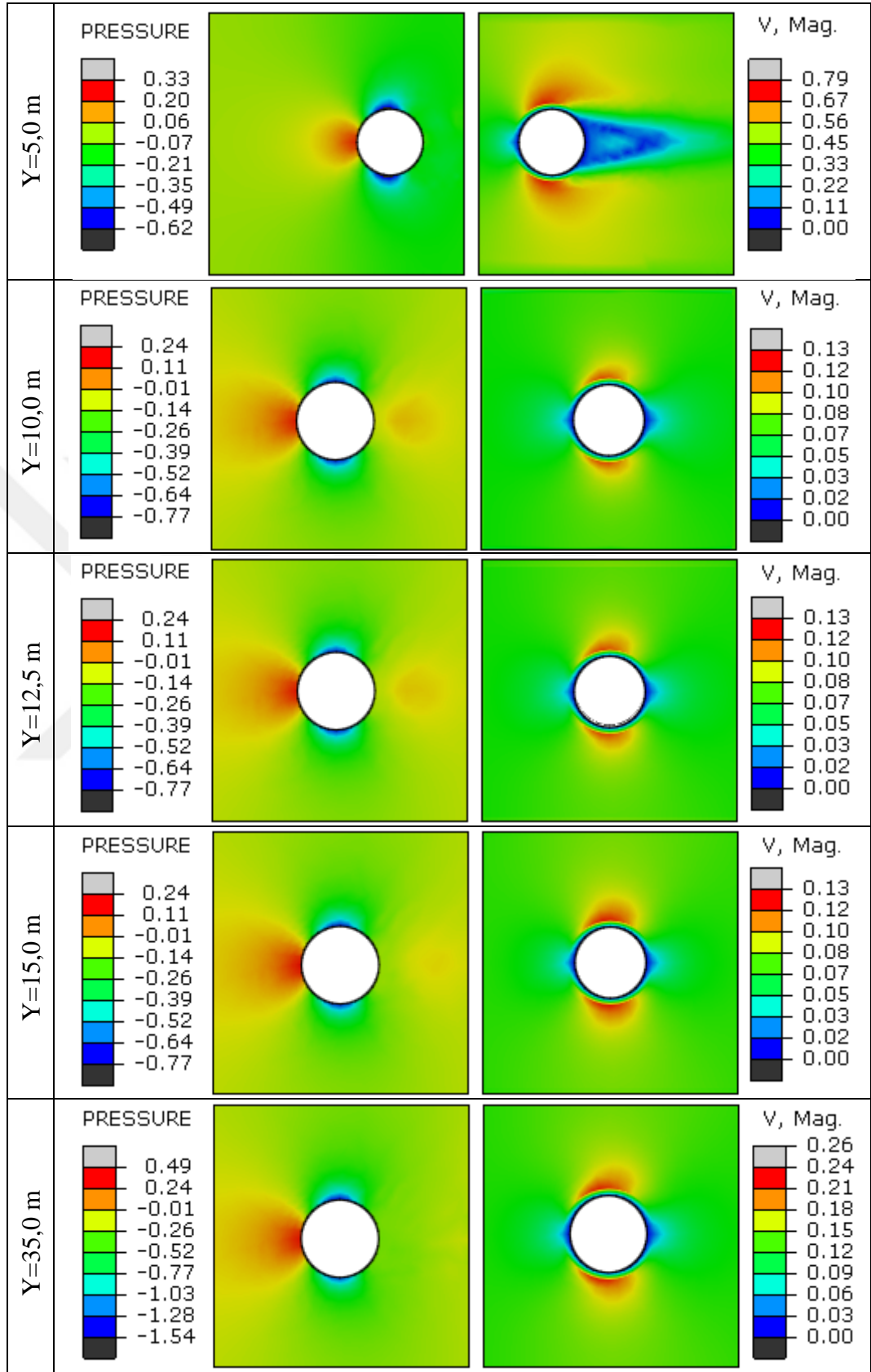
Bu bölümde sıvılaştan zemin ve dalgalı deniz ortamında Stokes-1 (Lineer Dalga), Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorilerinin sabit yoğunluklu bir dikdörtgen deniz kesitindeki silindirik dikey rıhtım kazığı etrafında oluşturacağı akış hızı ve basınç dağılımının tespiti, derinlik boyunca kazıkların etrafında oluşacak hidrodinamik etkilerin belirlenmesi ve rıhtım kazığında oluşturacağı yer değiştirme ve gerilme değerlerinin hesaplanması için modelleme yapılmıştır.

Dikdörtgen kesitli boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan sabit yoğunluklu dalgalı deniz ve boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 10 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan kararlı akışa sahip sıvılaştırmış zemin ortamına dairesel kesitli çapı;  $D=1,0 \text{ m}$  yüksekliği;  $L=40,0 \text{ m}$  olan ankastre mesnetli rıhtım kazığı yerleştirilmiştir (Şekil 9.38). Analiz sonuçları Şekil 9.39-Şekil 9.47'de gösterilmiştir.

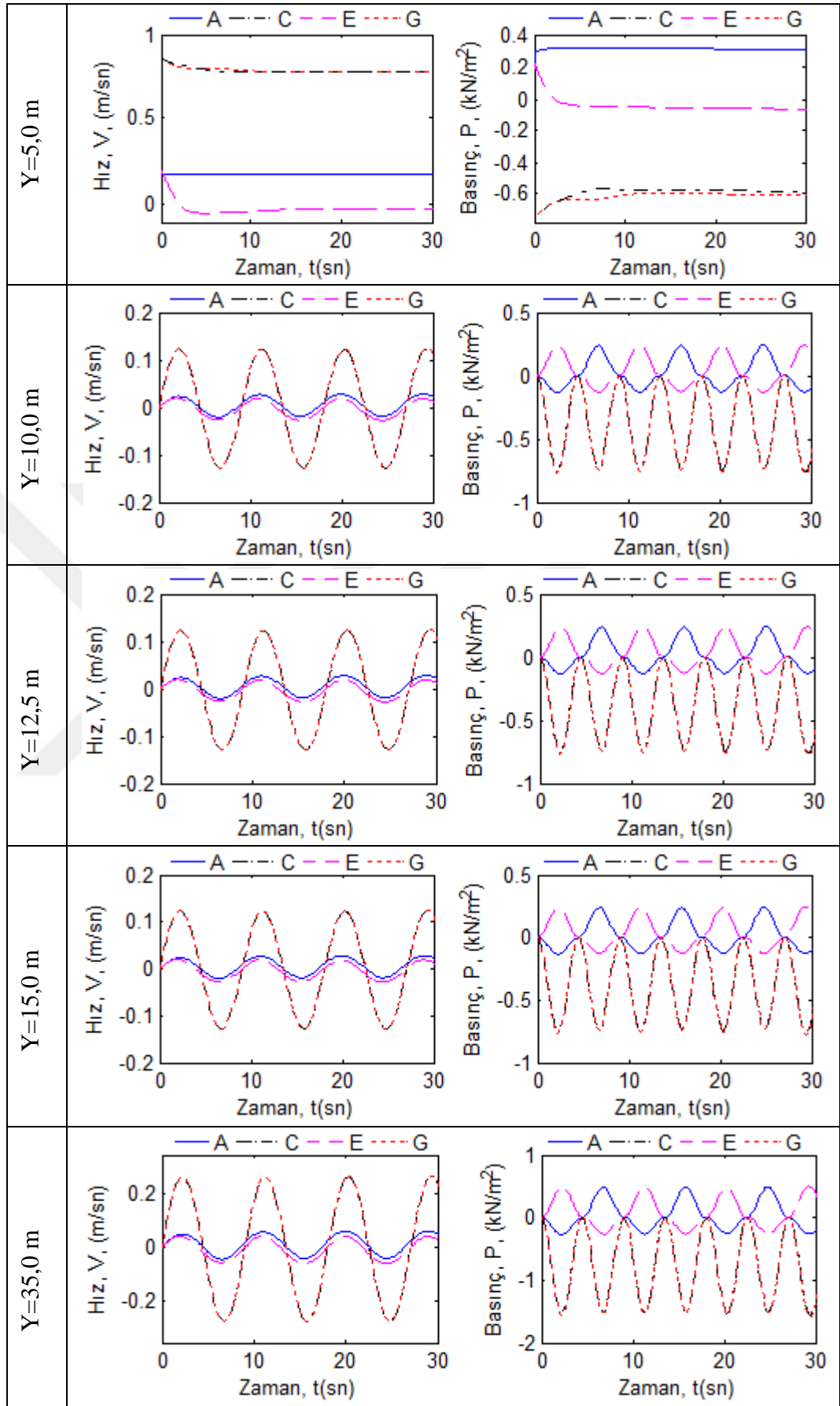


Şekil 9.38. Akıcı zemin etkisinde sabit yoğunluklu dalgalı deniz ortamında rıhtım kazığı.

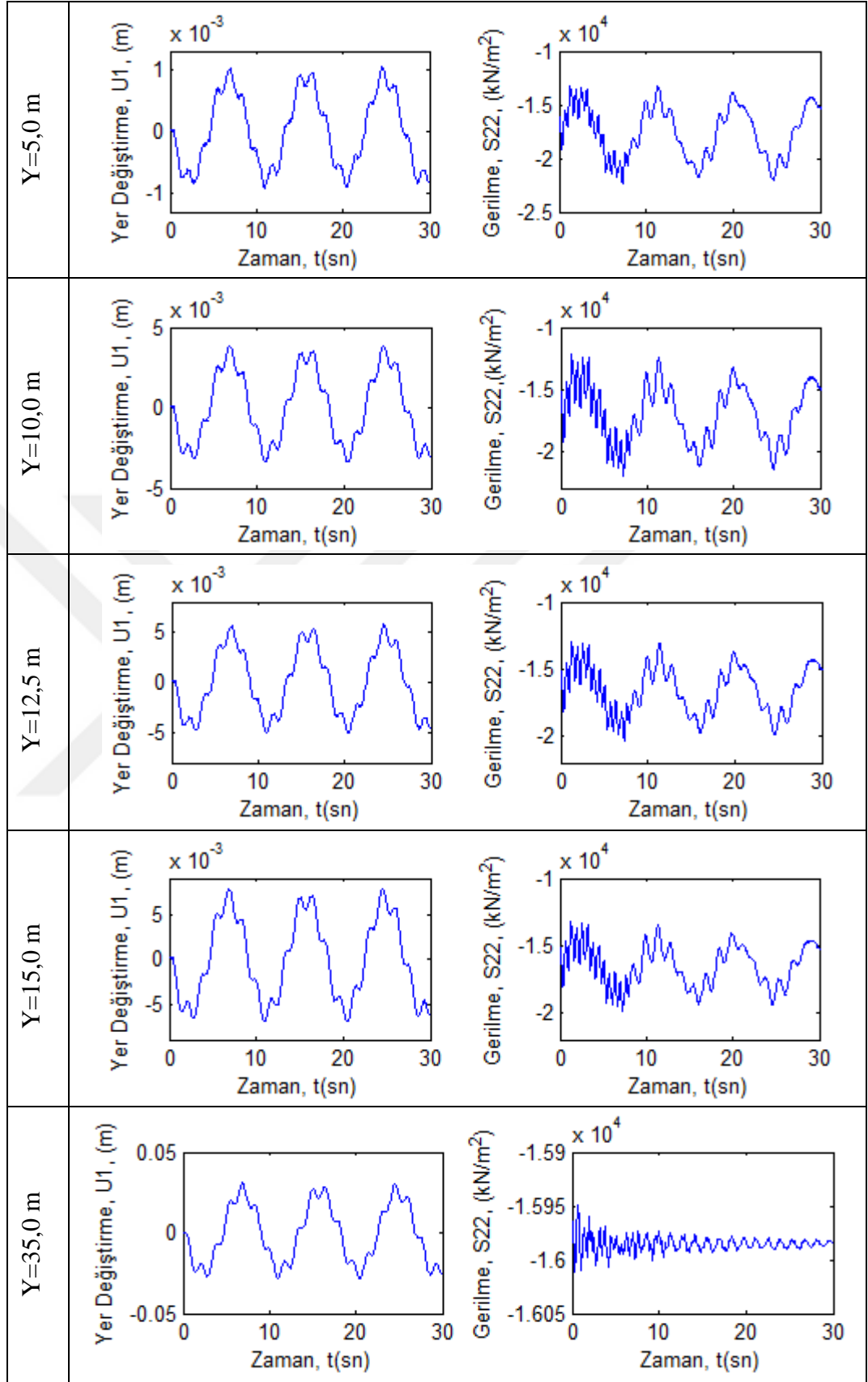
### 9.2.4.1 S1-RS-ZA Modeli



Şekil 9.39. S1-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

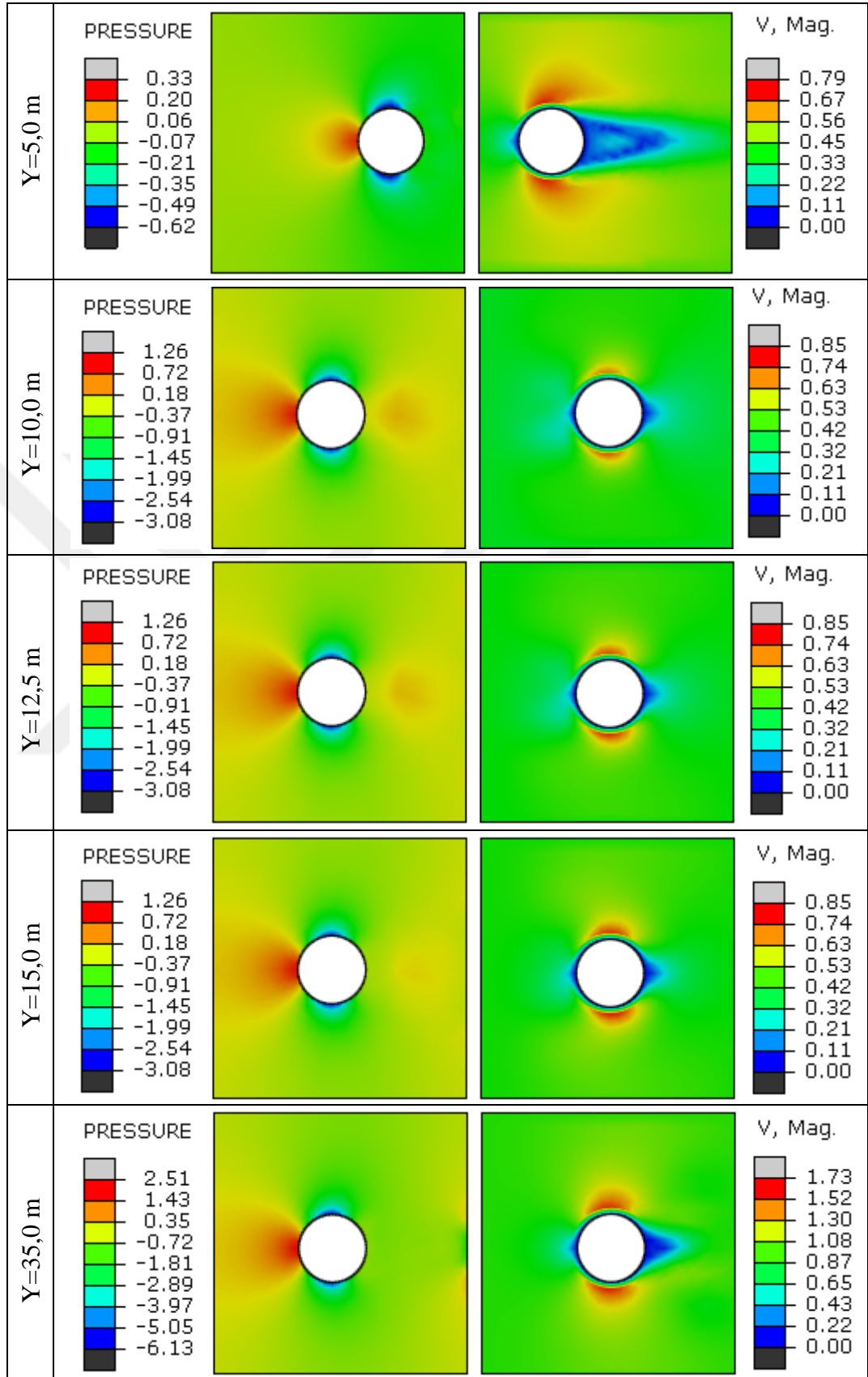


Şekil 9.40. S1-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri

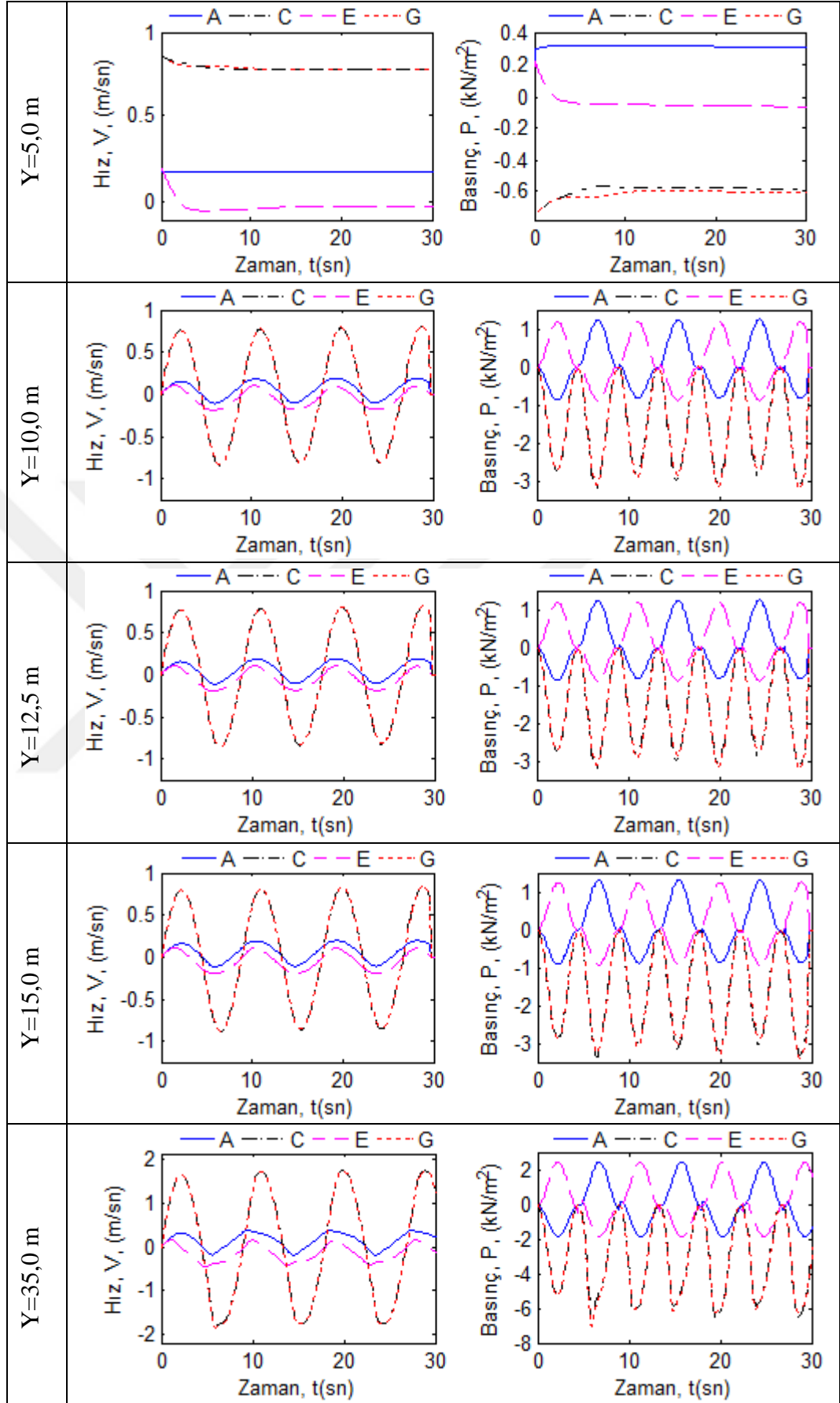


Şekil 9.41. S1-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

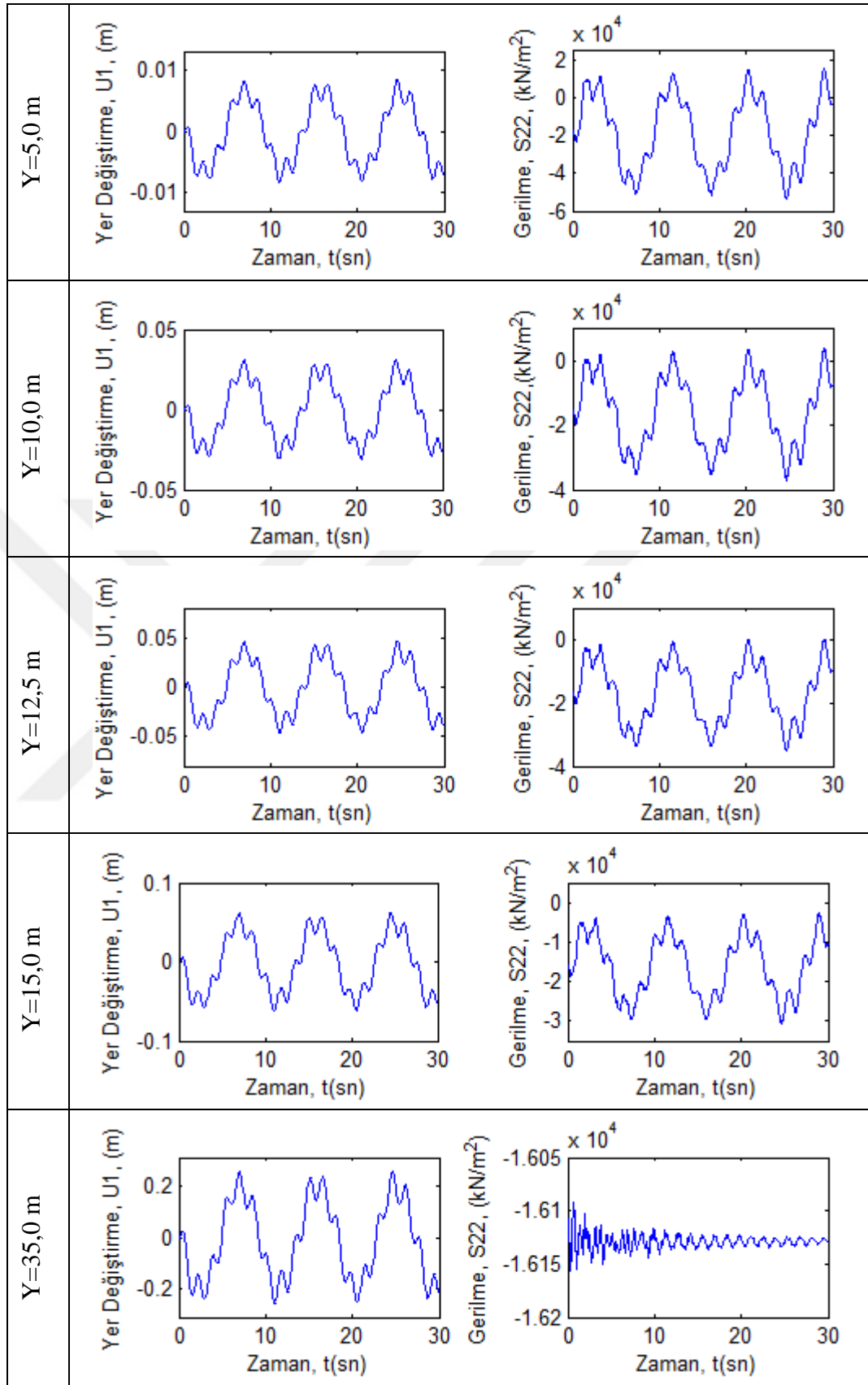
### 9.2.4.2 S2-RS-ZA Modeli



Şekil 9.42. S2-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

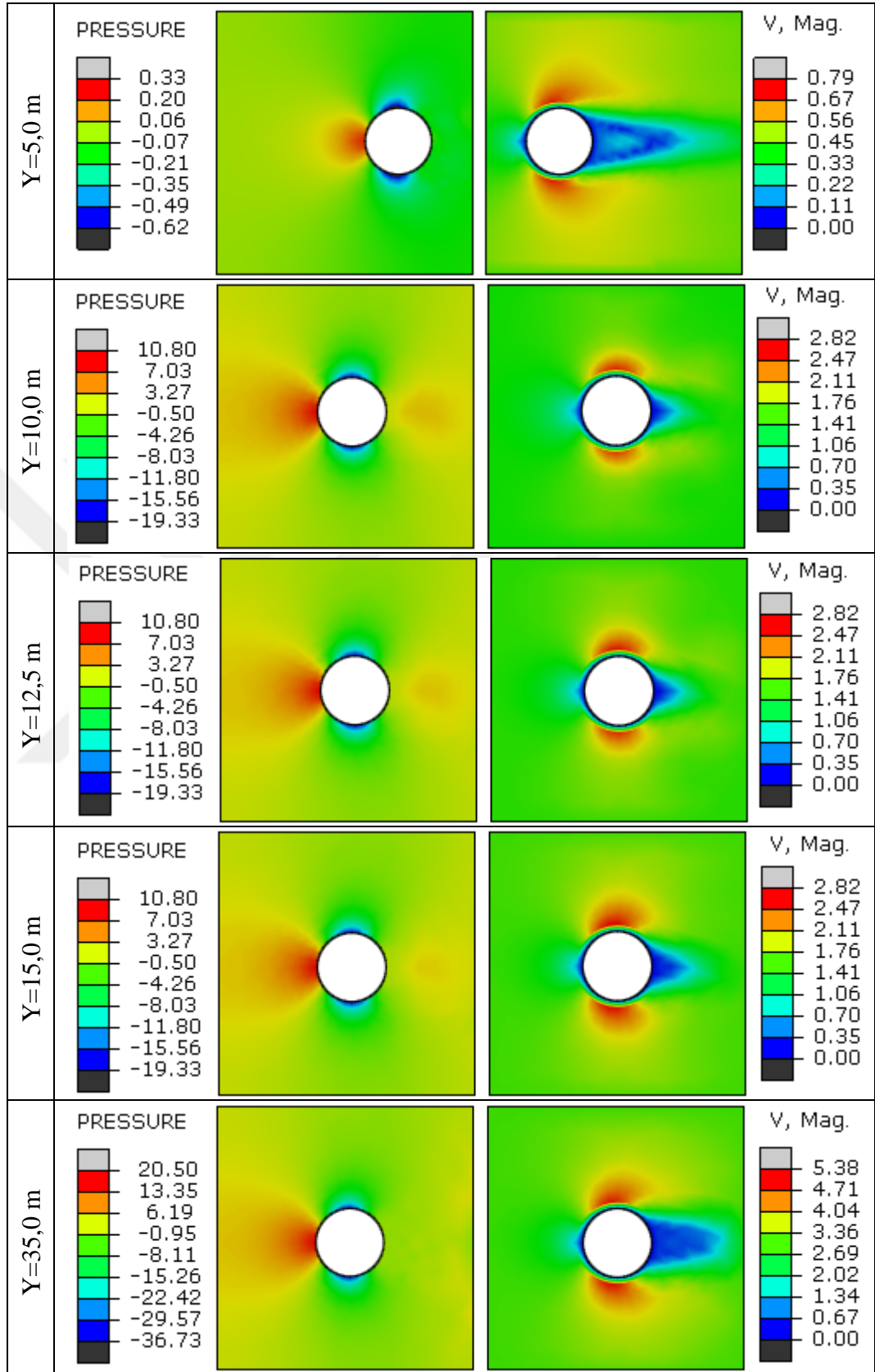


Şekil 9.43. S2-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



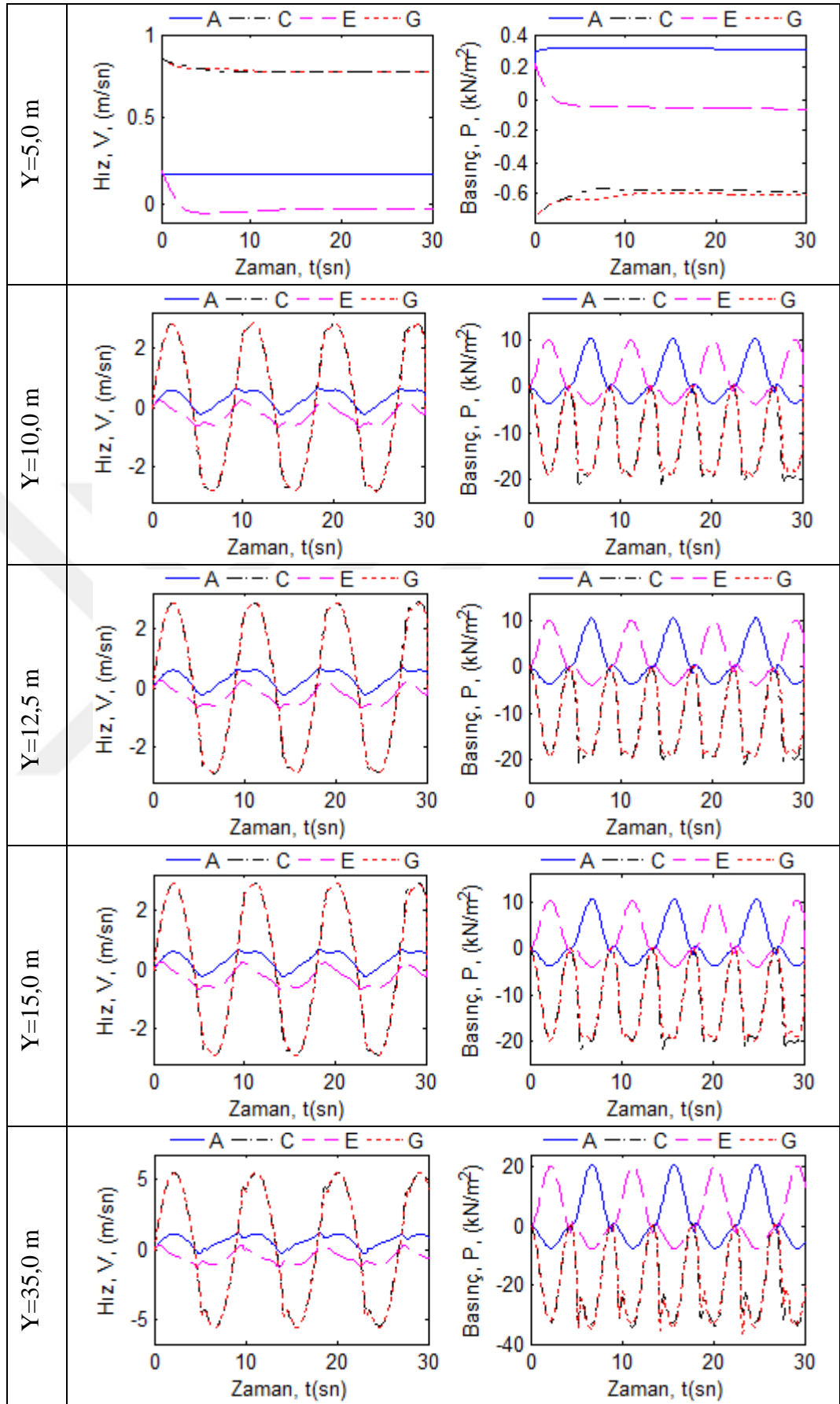
Şekil 9.44. S2-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değişirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.2.4.3 S3-RS-ZA Modeli

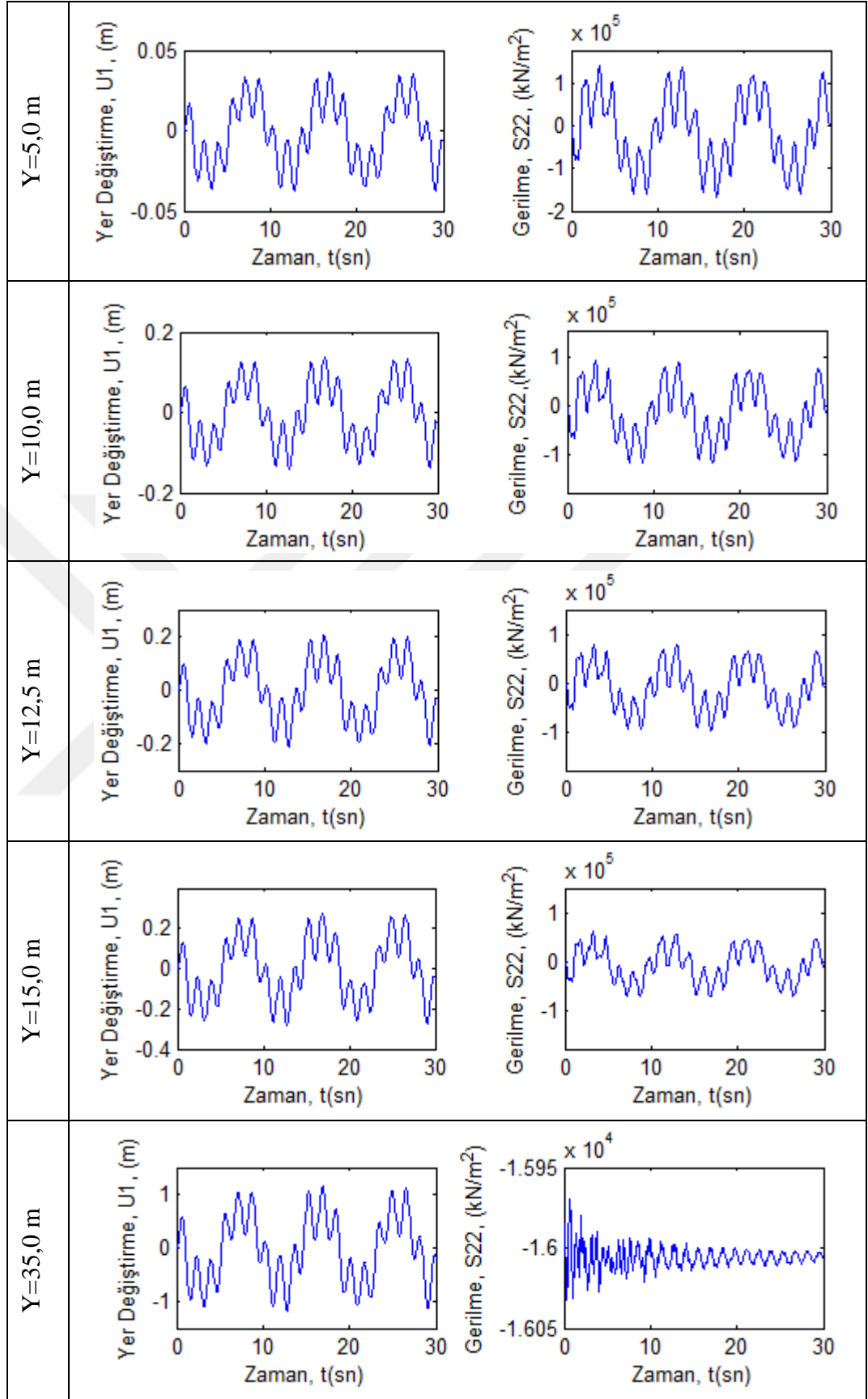


Şekil 9.45. S3-RS-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))





Şekil 9.46. S3-RS-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



Şekil 9.47. S3-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

#### 9.2.4.4 Model IVA İçin Değerlendirme

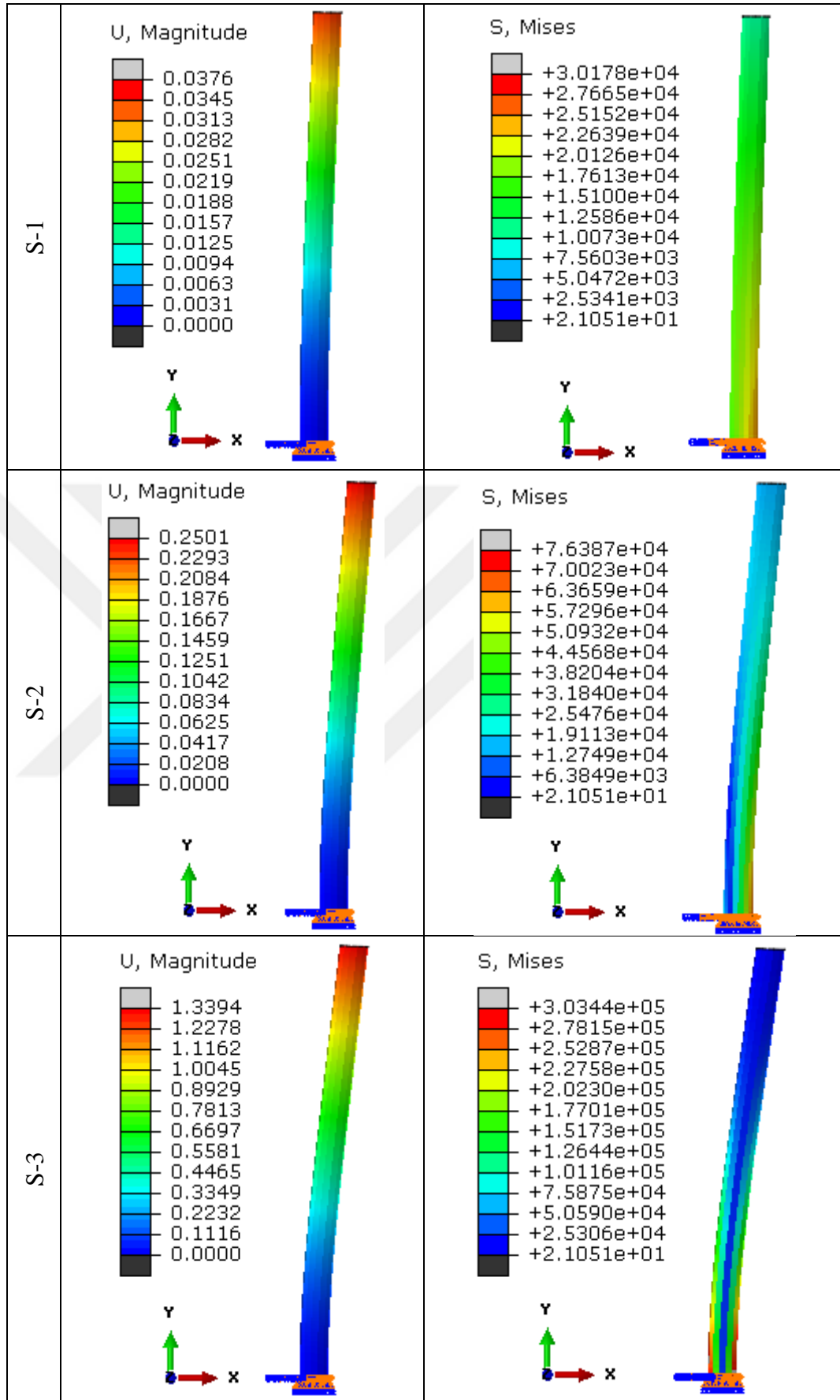
Yapılan analizlerde bulunan sabit yoğunluklu dalgalı deniz ortamında akıcı zemin etkisinin sabit zemin ortamına oranla sonuçlar üzerindeki farkı Tablo 9.6'da verilmiştir.

Stokes 1-2-3 tasarım dalgaları ve akıcı zemin etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.48'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.6. Model IVA için akışkan-yapı etkileşimi.

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0,0376 (% 5.90)*	30178,13 (%5.88)
Stokes-2	0,2501 (% 0.90)	76387,37 (%0.88)
Stokes-3	1,3394 (% 0.16)	303448,68 (%0.17)

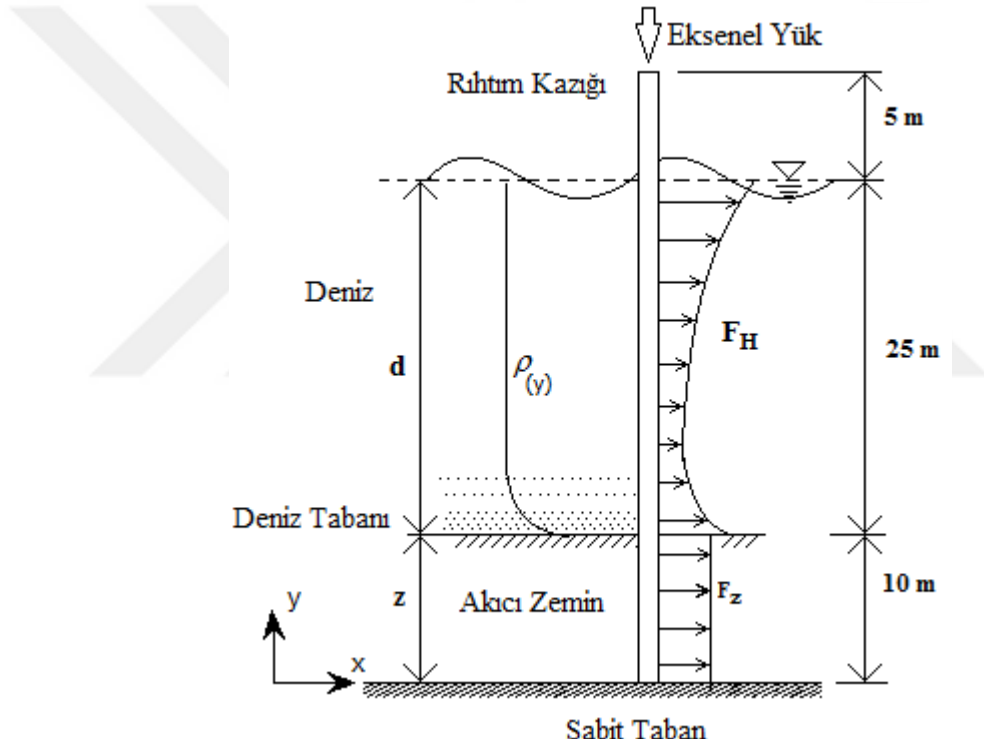
\* Tabloda (%....) Sabit yoğunluklu deniz ve sabit zemin ortamına (Model IA) göre sonuçlar arasındaki farkları göstermektedir.



Şekil 9.48. Model IVA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))

### 9.2.5 Model VA İçin Nümerik Analiz

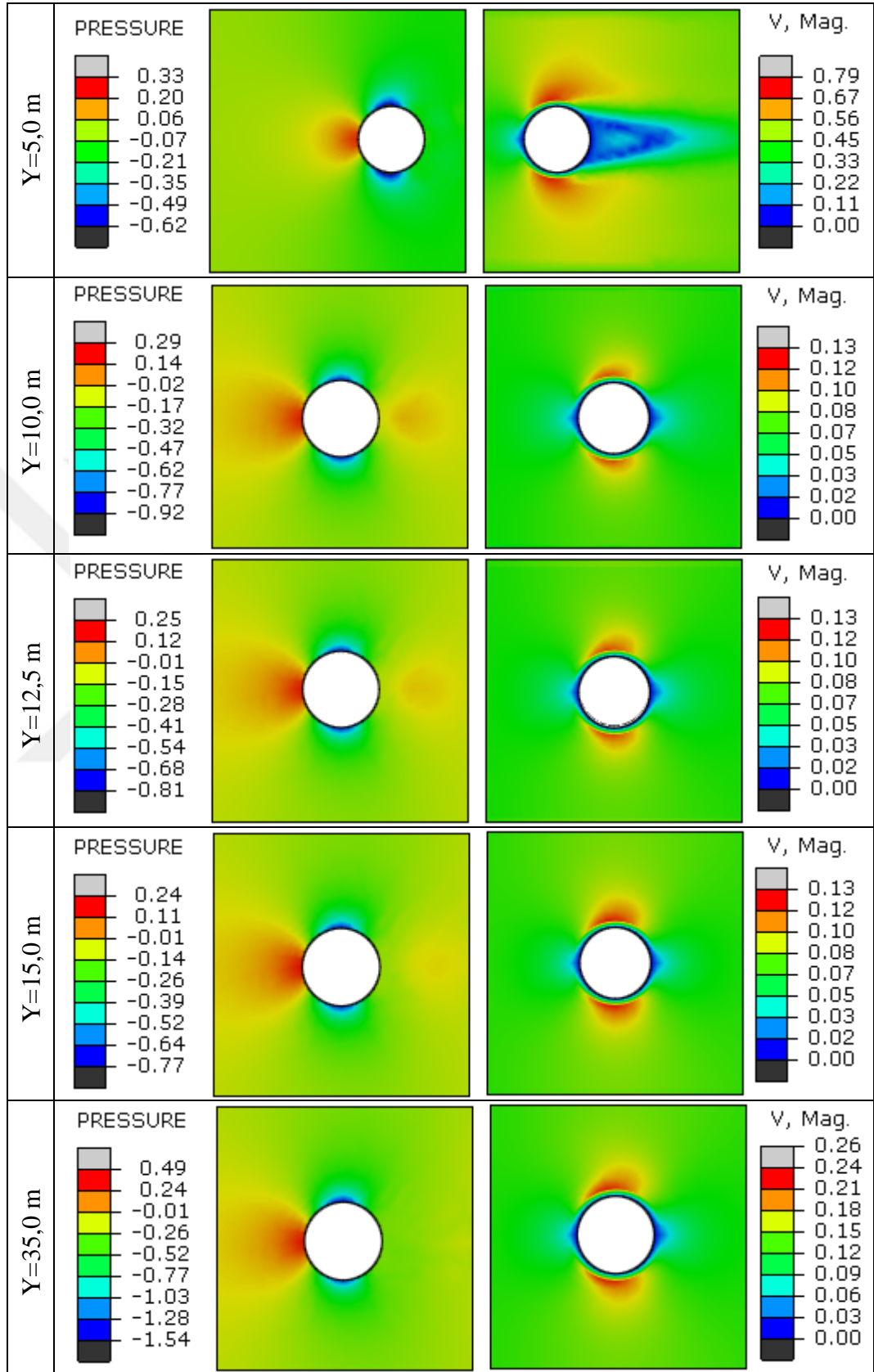
Bu bölümde Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorileri ve sıvılaştan zemin etkilerine maruz değişken yoğunluklu deniz ortamındaki silindirik dikey rıhtım kazığı etrafında oluşturacağı akış hızı ve basınç dağılımının tespiti, rıhtım kazığında oluşturacağı yer değiştirme ve gerilme değerlerinin hesaplanması için modelleme yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 25 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan derinlikle değişen yoğunluklu dalgalı deniz ve boyutları  $(X,Y,Z) = (50 \text{ m}, 10 \text{ m}, 5 \text{ m})$  olan kararlı akışa sahip sıvılaştan zemin ortamına dairesel kesitli çapı;  $D=1,0 \text{ m}$  yüksekliği;  $L=40,0 \text{ m}$  olan ankastre mesnetli kazık yerleştirilmiştir (Şekil 9.49).



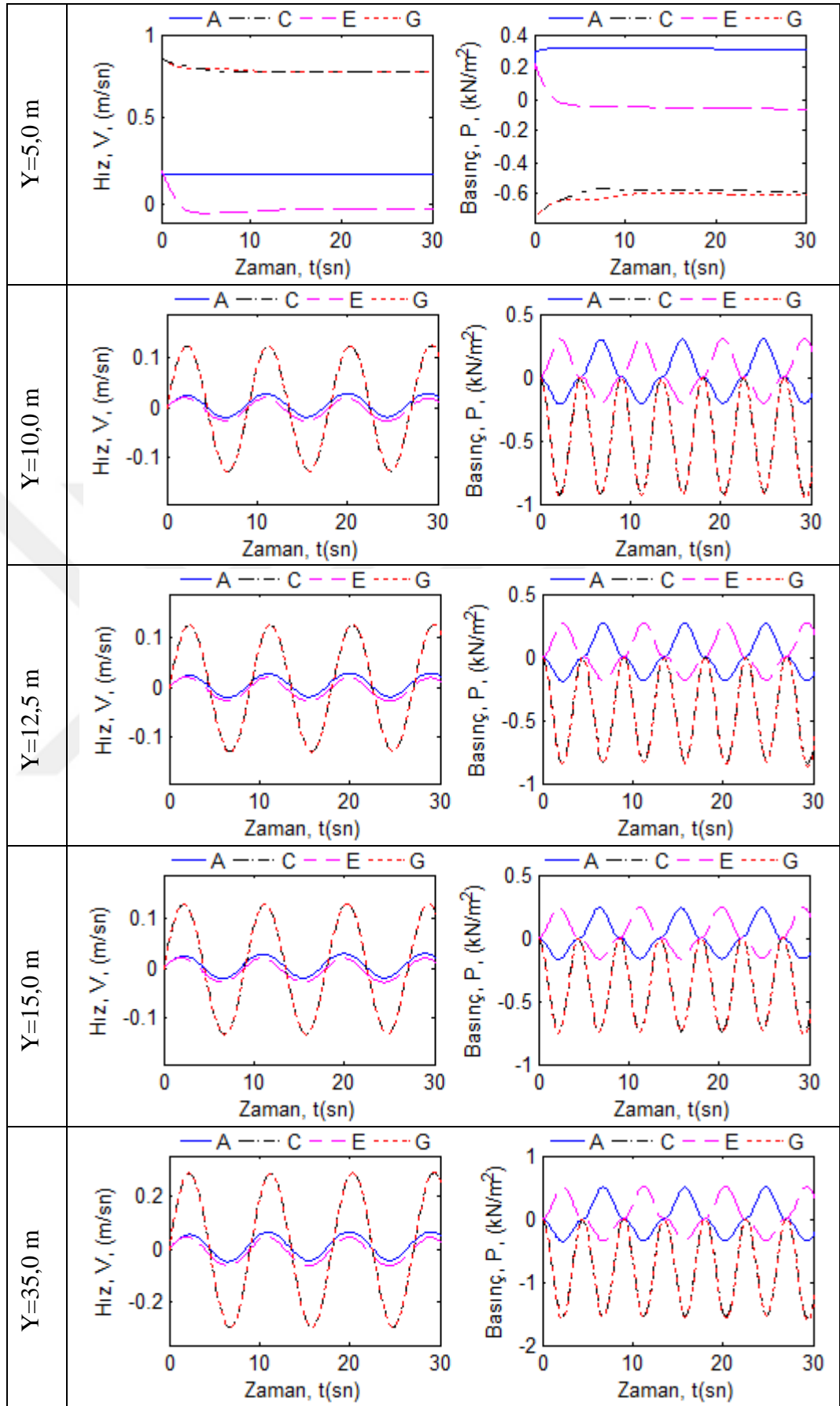
Şekil 9.49. Akıcı zemin etkisinde değişken yoğunluklu dalgalı deniz ortamında rıhtım kazığı.

Derinlikle değişen sedimentsiyon profili, Model II 'de gösterildiği üzere derinlikle değişen sedimentsiyonu  $c_{(y)}$  ve değişken yoğunluklu deniz suyu düşey profili  $\rho_{(y)}$ , Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalga teorileri için daha önce Tablo 9.2. Derinlikle değişen konsantrasyon ve yoğunluk denklemleri'de verilmiştir (Şekil 9.22.a,b). Analiz sonuçları Şekil 9.50-Şekil 9.58'de gösterilmiştir.

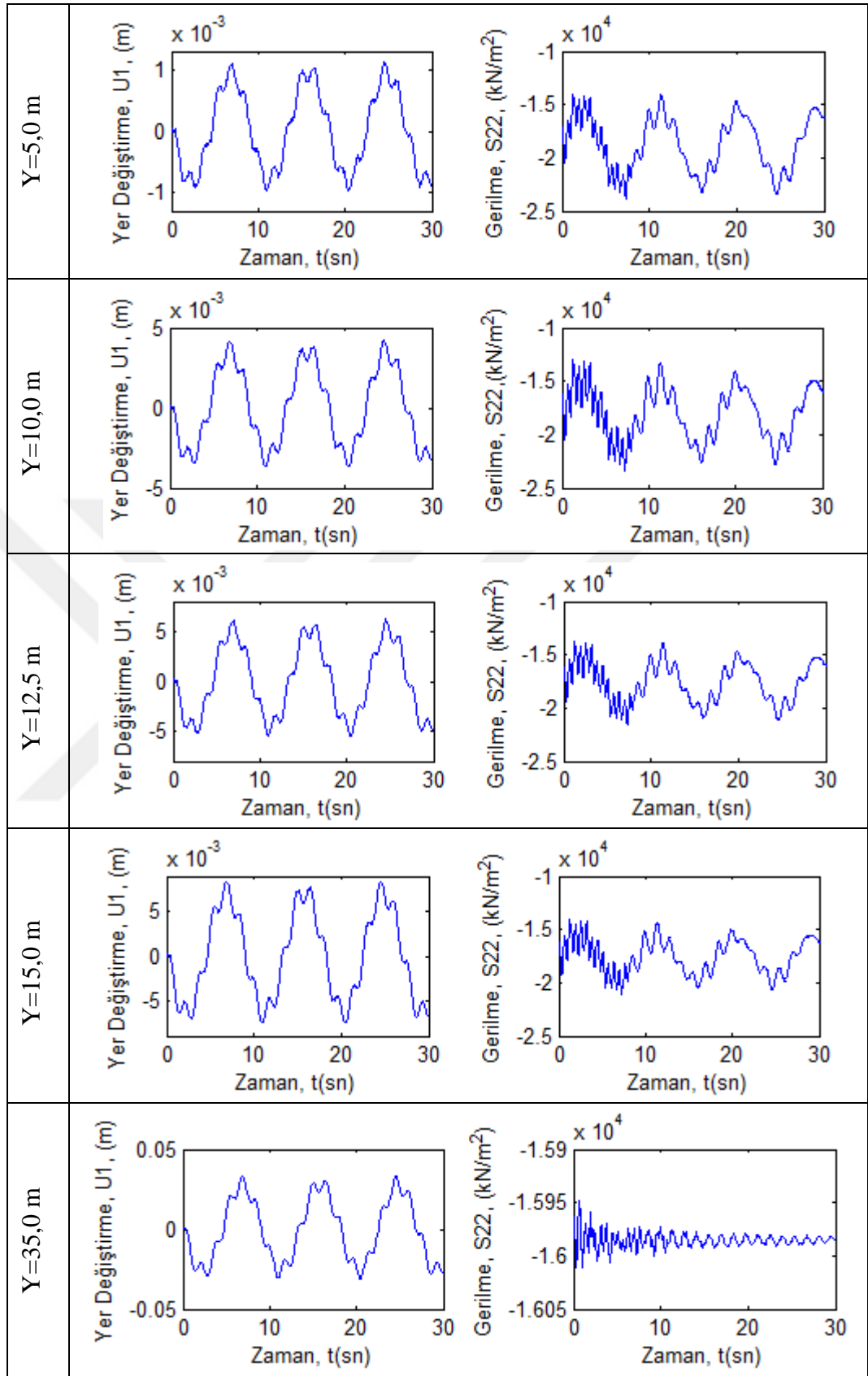
### 9.2.5.1 S1-RD-ZA Modeli



Şekil 9.50. S1-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))



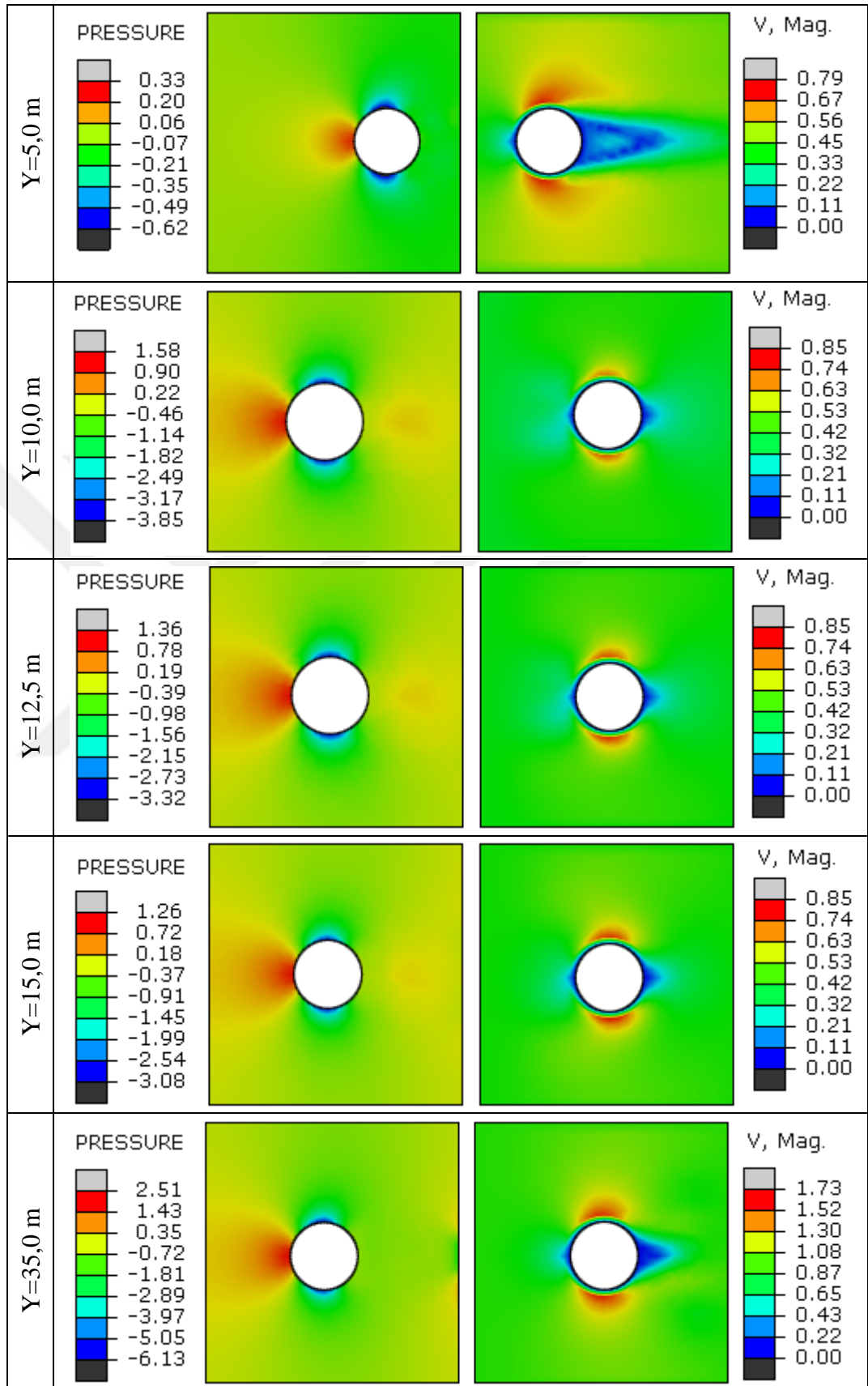
Şekil 9.51. S1-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



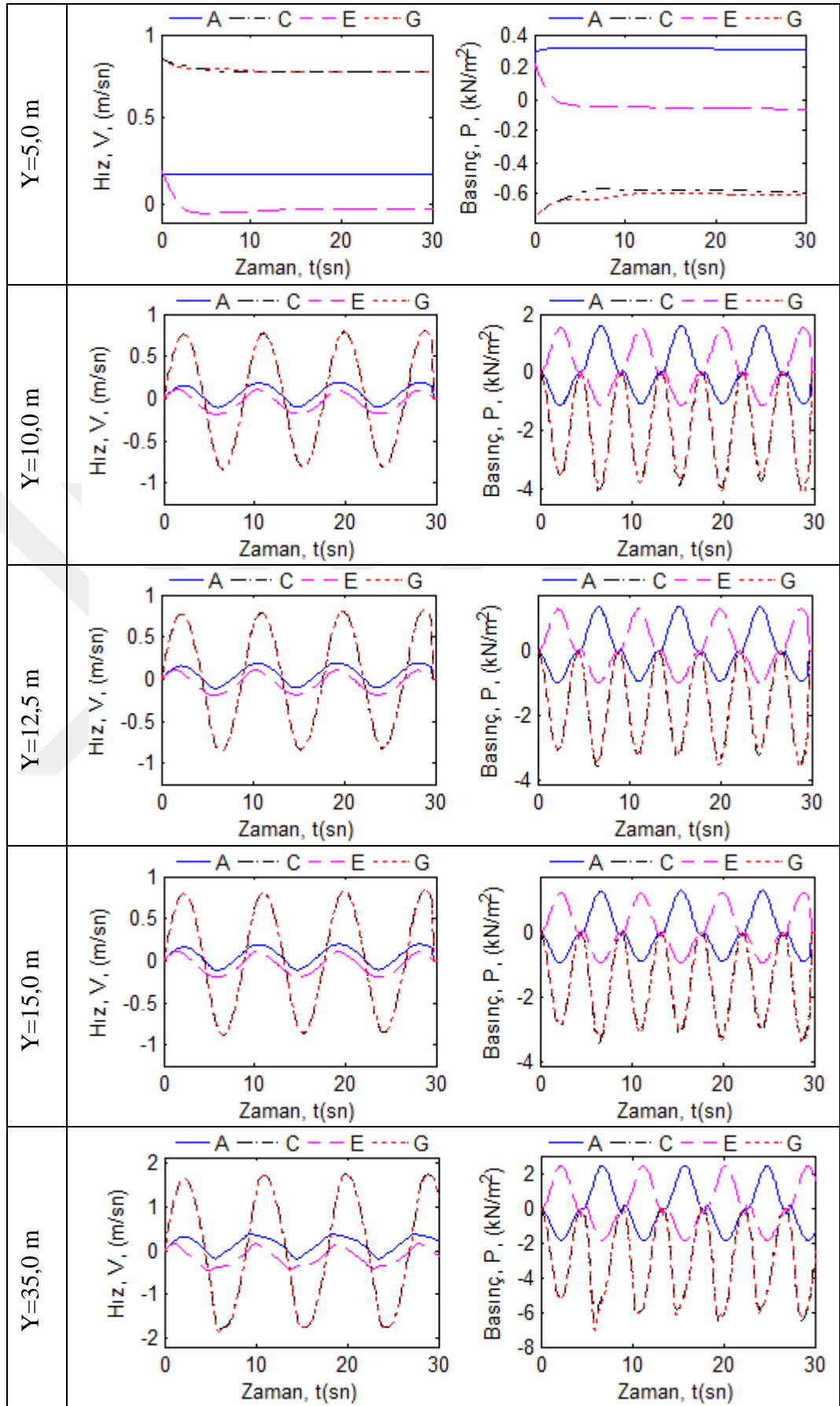
Şekil 9.52. S1-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri



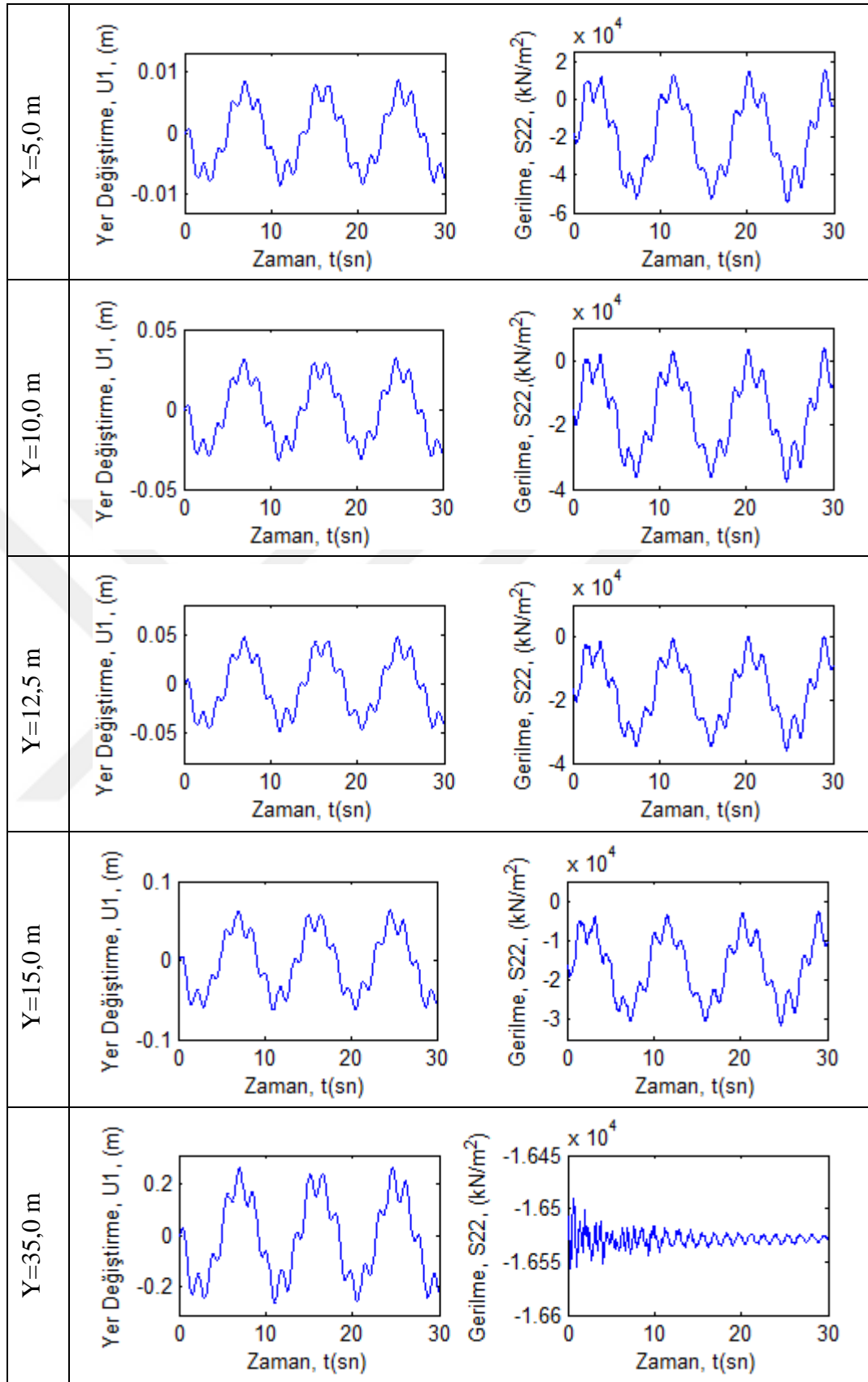
### 9.2.5.2 S2-RD-ZA Modeli



Şekil 9.53. S2-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))

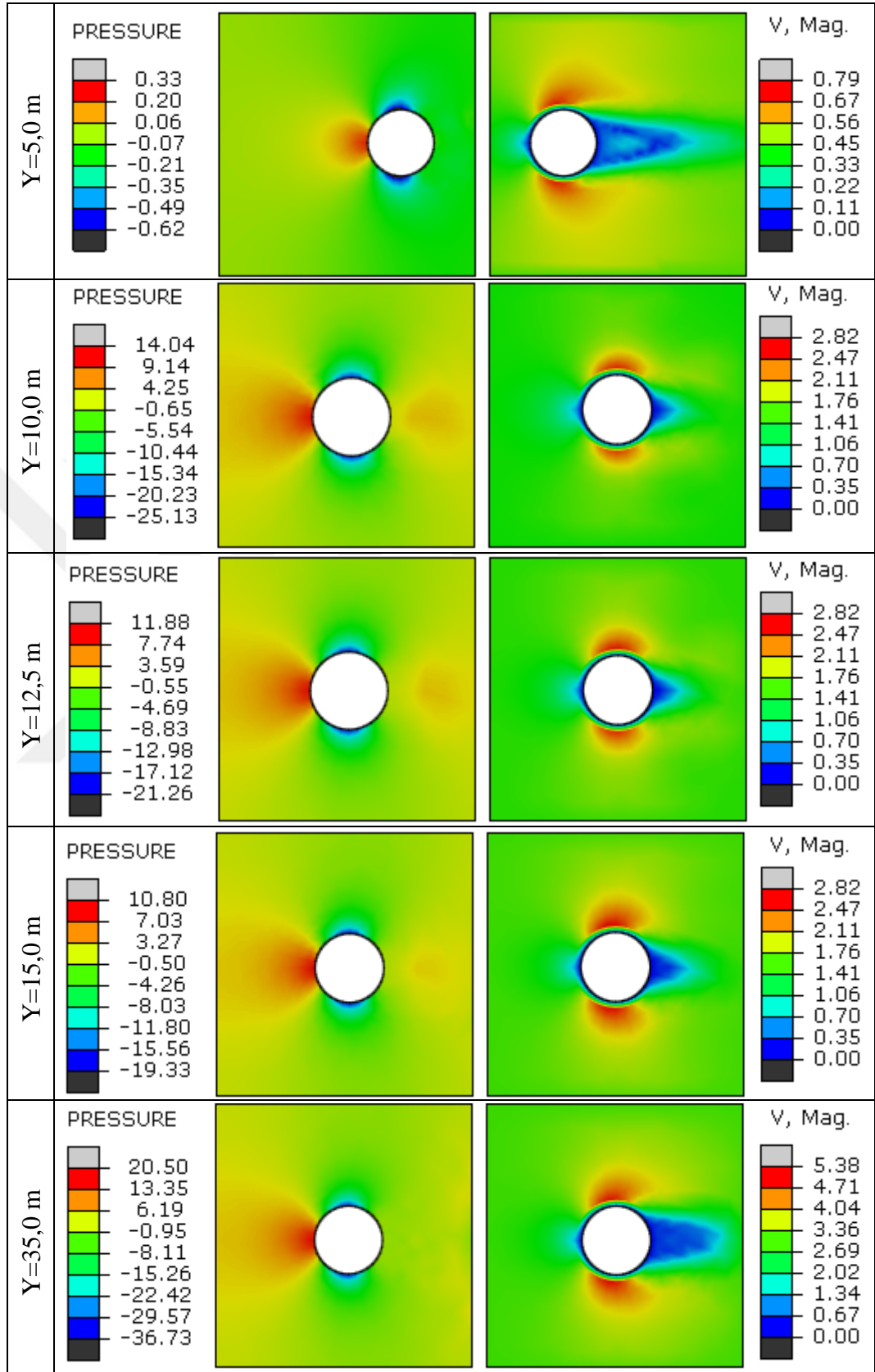


Şekil 9.54. S2-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri

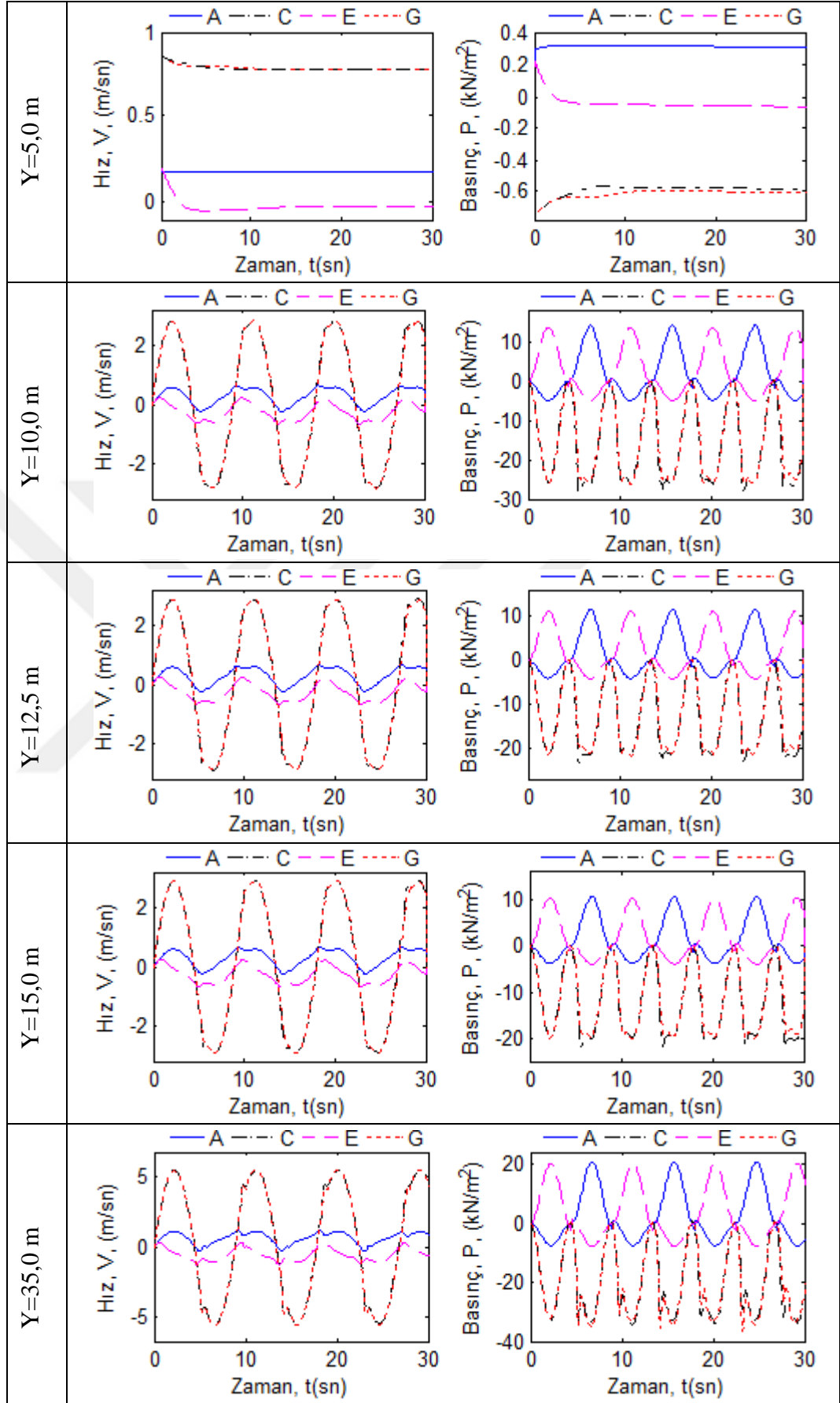


Şekil 9.55. S2-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

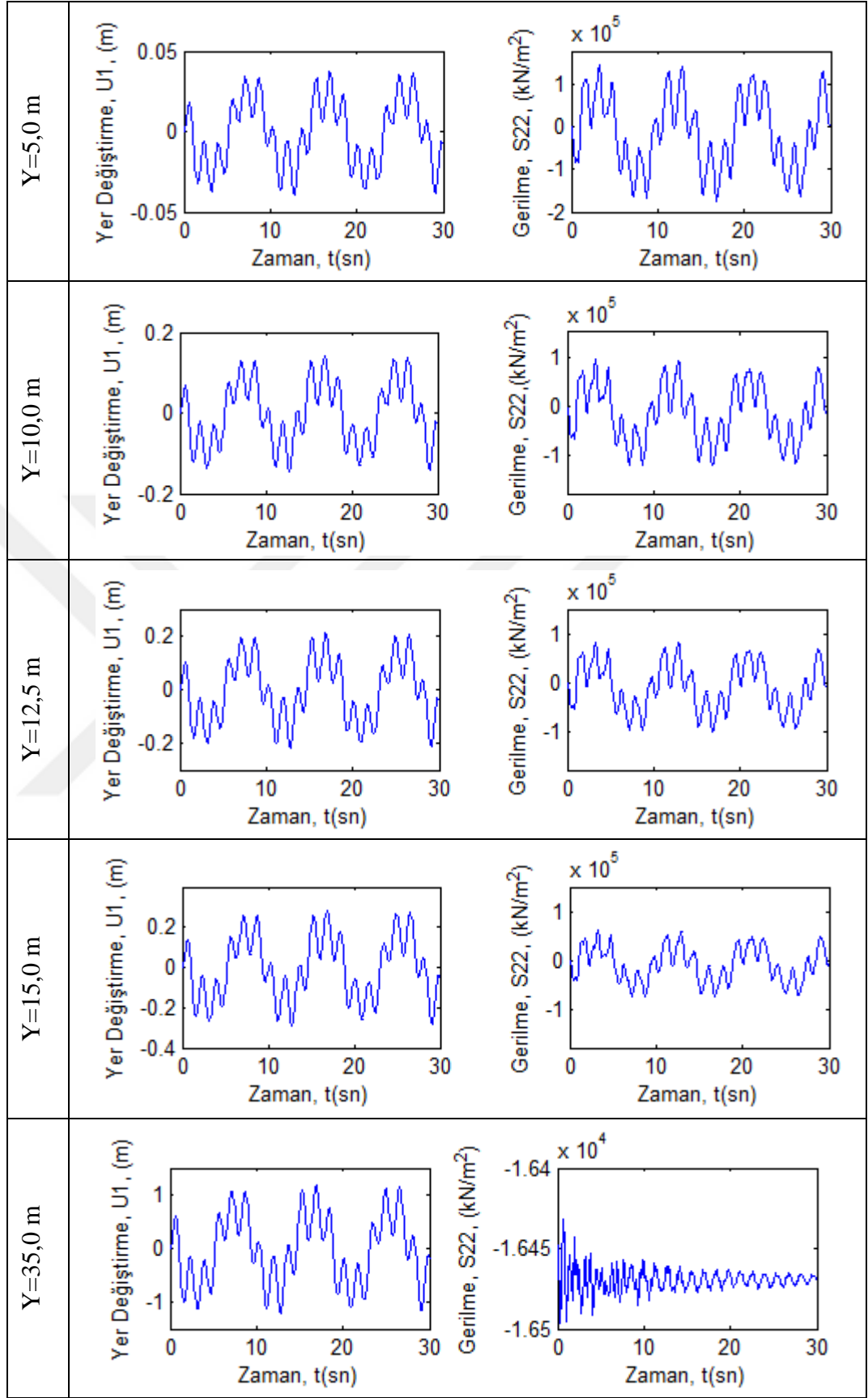
### 9.2.5.3 S3-RD-ZA Modeli



Şekil 9.56. S3-RD-ZA Modeli için basınç ve hız dağılımı (P(kN/m<sup>2</sup>), V(m/s))



Şekil 9.57. S3-RD-ZA Modeli için basınç-zaman ve hız-zaman grafikleri



Şekil 9.58. S3-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

#### 9.2.5.4 Model VA İçin Değerlendirme

Derinlikle değişken yoğunluklu deniz ve akıcı zemin ortamında yapılan analizlerde deniz tabanında sediment hareketi ile oluşan askıdaki katı madde konsantrasyonunun neden olduğu yoğunluk değişimi hesaplanmıştır (Tablo 9.2). Şekil 9.22 'de görüleceği üzere yoğunluk farkı deniz tabanına yakın kesimde artış göstermektedir.

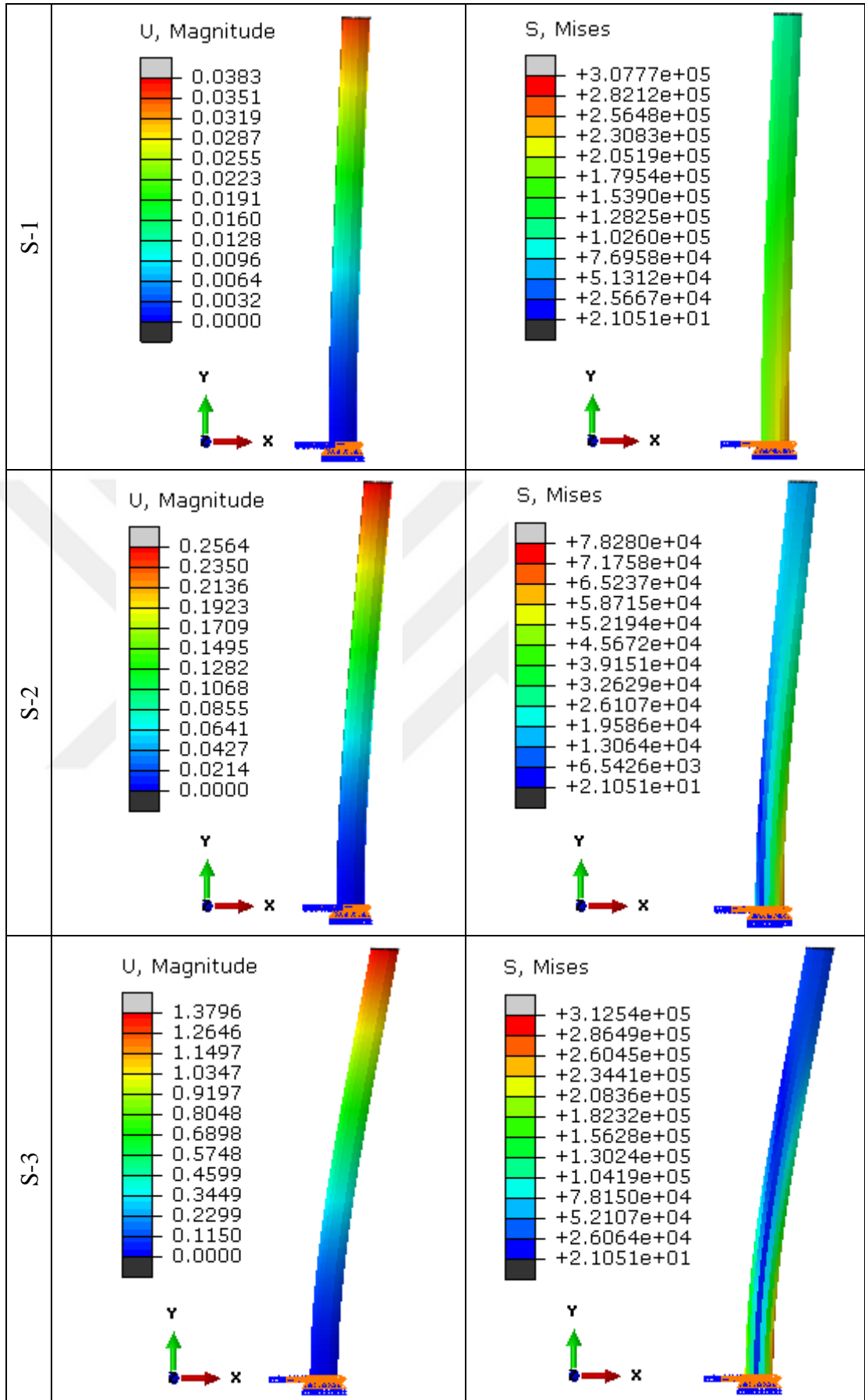
Derinlikle değişen yoğunluk farkı kazığa etkiyen hidrodinamik kuvveti artırmaktadır. Fakat kazığın deniz tabanına ankastre mesnetlendiği ucundaki bu kuvvet artışı kazık elemanın üzerindeki en büyük yer değiştirme ve gerilme sonuçları üzerinde yaklaşık %2-3 oranında artışa neden olmaktadır. Bu oran bize göstermektedir ki sediment hareketi kökenli deniz suyu yoğunluk değişimi hassas çözüm gerektirmeyen modellemelerde ihmal edilebilir.

Değişken yoğunluklu sıvılaştırılmış zemin akışı ortamında yapılan analizler sonucu elde edilen yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.7'de verilmiştir. Stokes 1-2-3 dalga teorileri etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.59'da gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.7. Model VA için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0,0383 (%7.5)*	30776,84 (%7.9)
Stokes-2	0,2564 (%3.4)	78280,06 (%3.38)
Stokes-3	1,3796 (%3.03)	312540,56 (%3.17)

\* Tabloda (%....) Sabit yoğunluklu deniz ve sabit zemin ortamına (Model IA) göre sonuçlar arasındaki farkları göstermektedir.



Şekil 9.59. Model VA için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))



### 9.3 Eksenel Yük Hariç Kazıkların Modellenmesi

Modeller: IB, IIB, IIIB, IVB ve VB kodlamasıyla yapılmıştır. Herbir kodda yeralan "B" harfi "Eksenel Yük Hariç" anlamına gelmektedir.

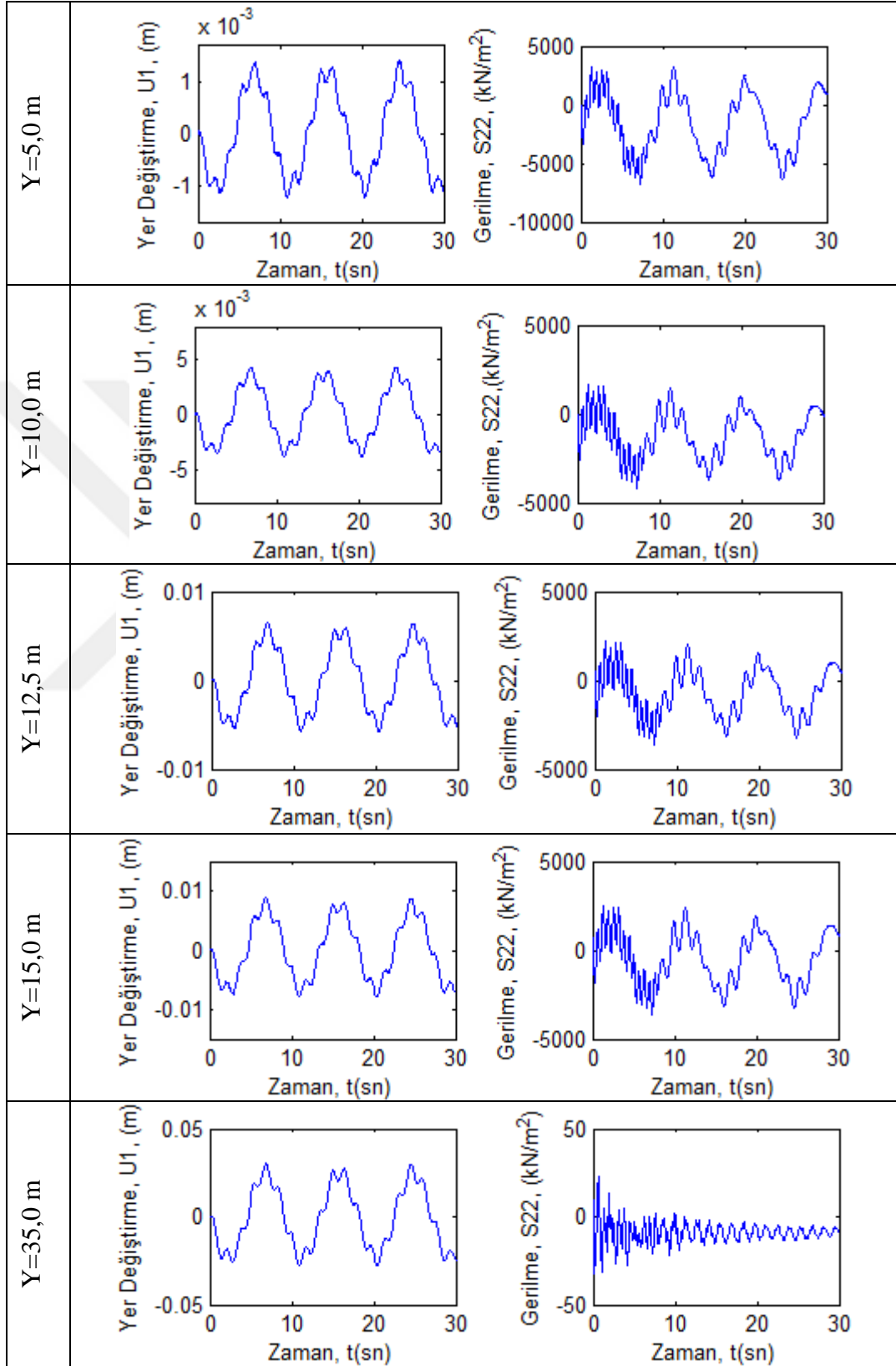
*Model Nümerik Analizi* kısmında (Örneğin: *Model IB için Nümerik Analiz* kısmında S1-RS-ZS, S2-RS-ZS, S3-RS-ZS Modellerine yönelik uygulama yapılmıştır) *kazık kesiti etrafındaki basınç ve hız dağılımları ile kazık kesitinin A-C-E-G noktalarındaki hız-zaman ve basınç-zaman grafikleri; Model A da verilen dağılımlardan ve grafiklerden farklılık göstermediğinden dolayı aynı dağılımların ve grafiklerin esas alınması uygun görülmüştür.* Buna karşın, Eksenel Yük Hariç Modellemede; özellikle *kazık boyunca yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafiklerinde farklılıklar görüldüğünden dolayı bu grafiklerin herbir model için ayrı ayrı verilmesi uygun görülmüştür.*

*Model Değerlendirme* (örneğin Model IB için) kısmında ise *akışkan-yapı etkileşimi tablosu ile kazık boyunca yer değiştirme ve gerilme dağılımları* verilmektedir.

Bir model için yapılan işlemler farklı modeller için de benzer biçimde yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 9.60-Şekil 9.77'da gösterilmiştir.

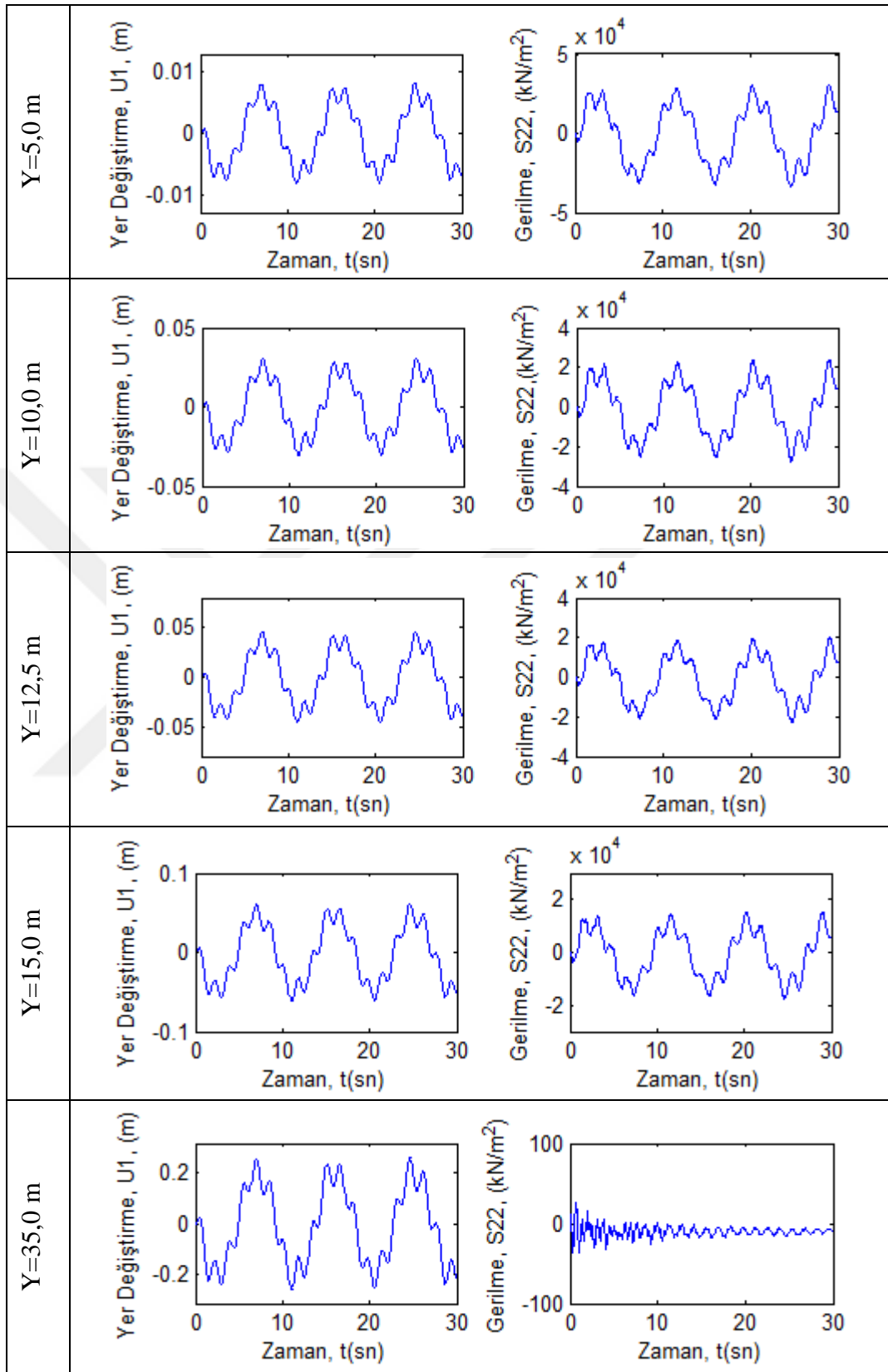
### 9.3.1 Model IB İçin Nümerik Analiz

#### 9.3.1.1 S1-RS-ZS Modeli



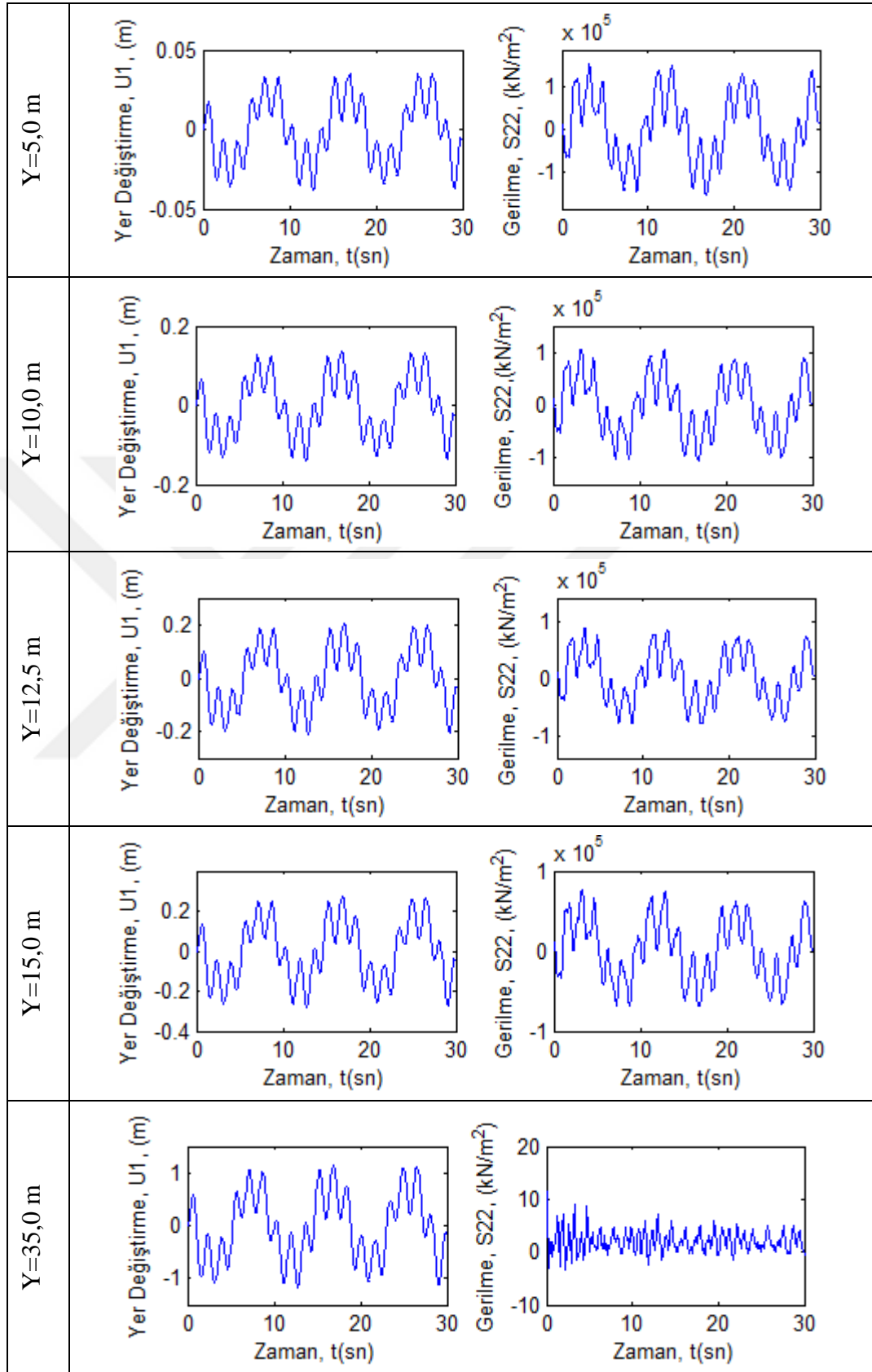
Şekil 9.60. S1-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.1.2 S2-RS-ZS Modeli



Şekil 9.61. S2-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.1.3 S3-RS-ZS Modeli



Şekil 9.62. S3-RS-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.1.4 Model IB İçin Değerlendirme

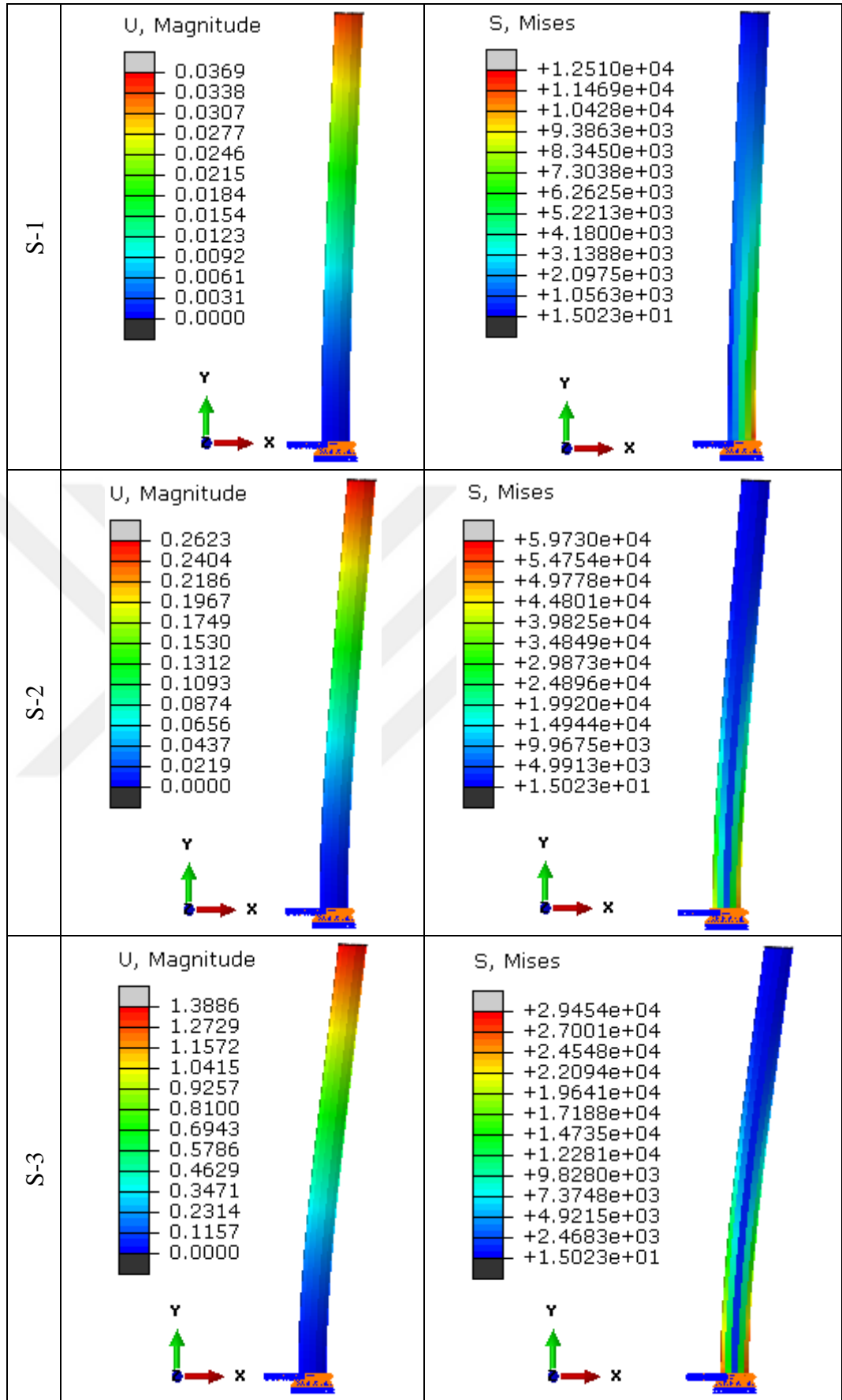
Sabit yoğunluklu deniz ve sabit zemin ortamında yapılan analizler sonucu aksenal yüksüz rıhtım kazığında meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.8'de verilmiştir.

Stokes 1-2-3 tasarım dalgaları etkisinde aksenal yüklemesiz rıhtım kazığı boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.63'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.8. Model IB için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40.0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0.0m)
Stokes-1	0.0369 (%3.8)*	12510.32 (%56.10)
Stokes-2	0.2623 (%5.4)	59730.25 (%21.12)
Stokes-3	1.3886 (%3.85)	294540.11 (%2.76)

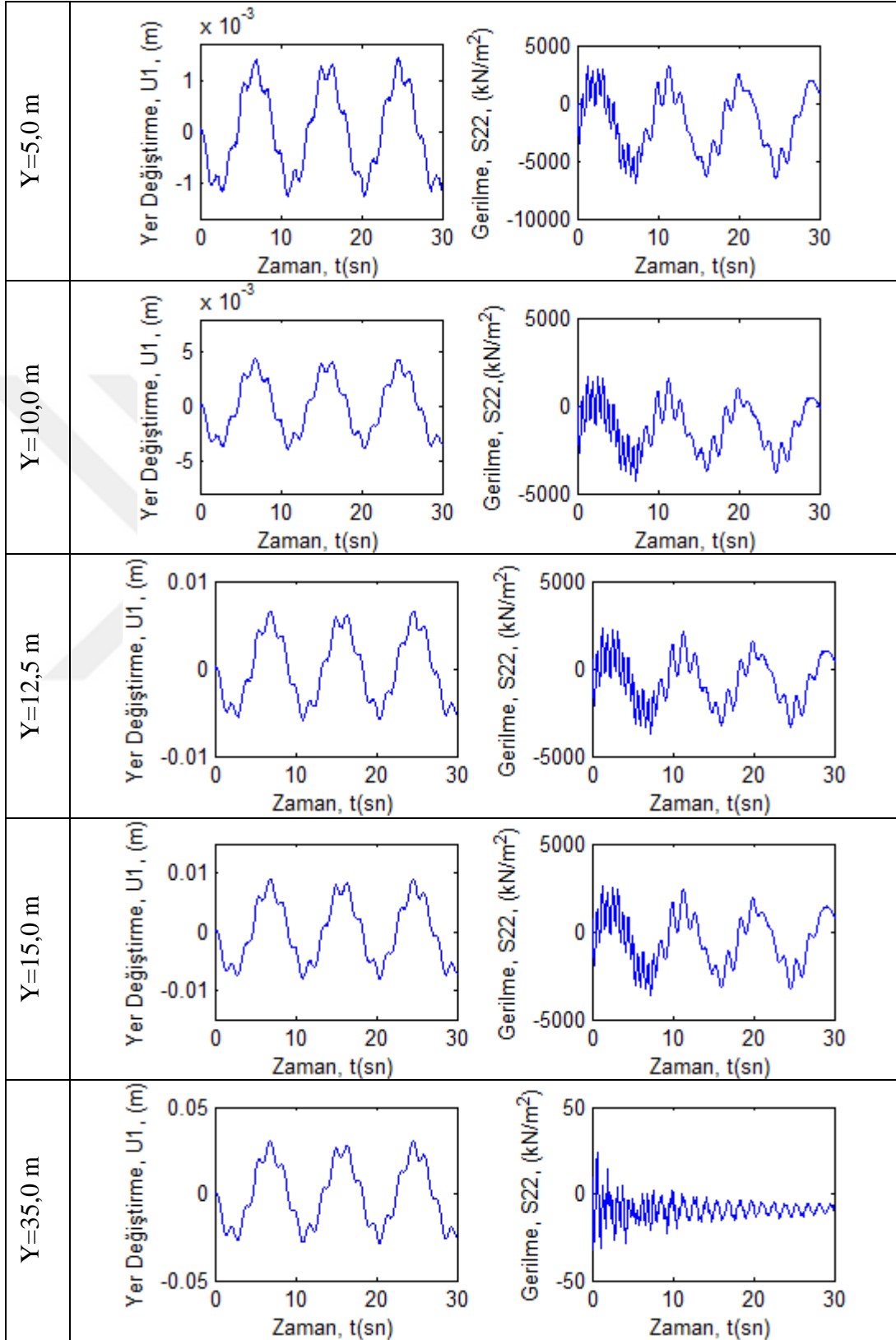
\* Tabloda (%....) Aksenal yüklü (Model IA) ve Aksenal yük hariç (Model IB) rıhtım kazıkları arasındaki sonuçların farklarını göstermektedir.



Şekil 9.63. Model IB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))

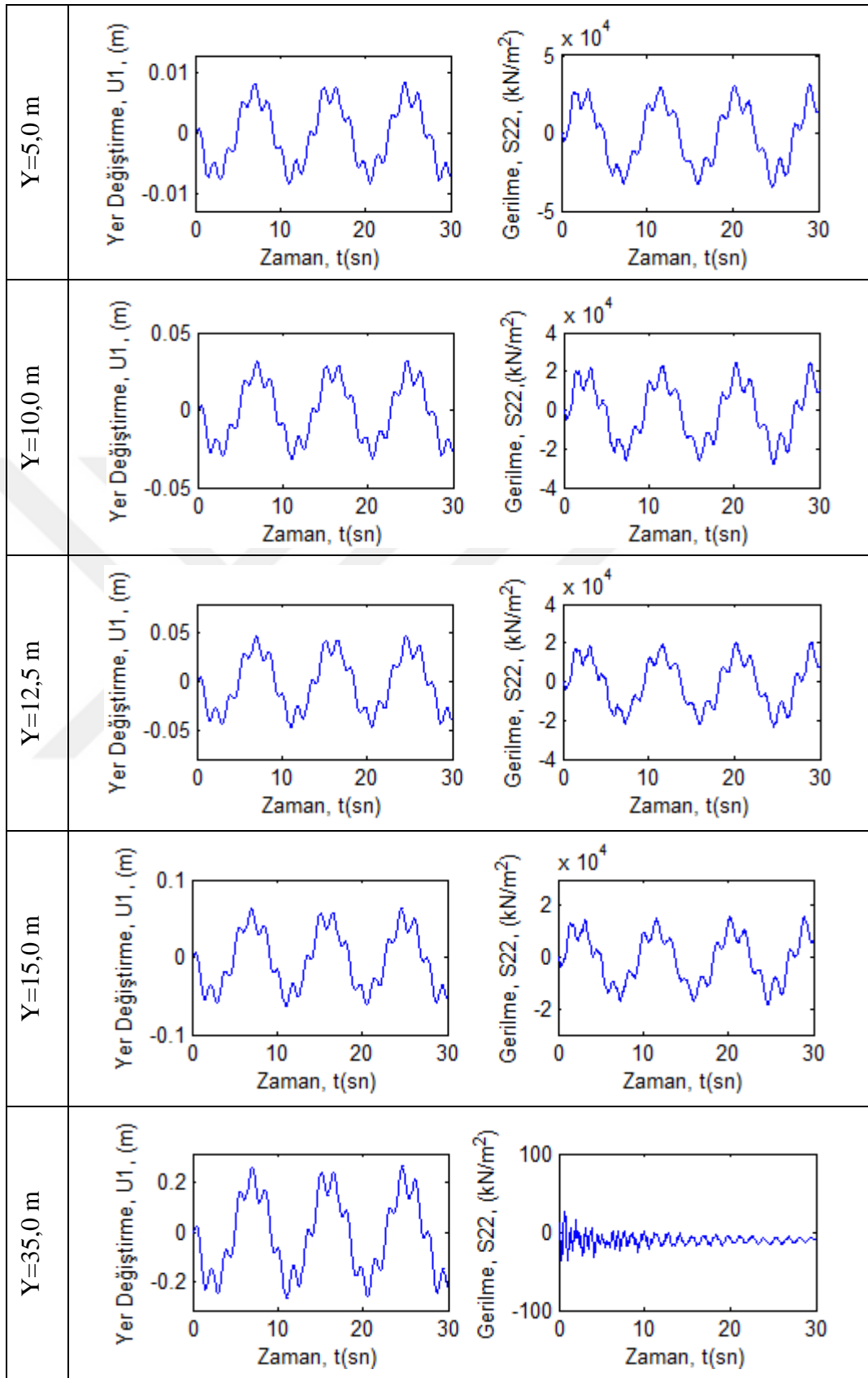
### 9.3.2 Model IIB İçin Nümerik Analiz

#### 9.3.2.1 S1-RD-ZS Modeli



Şekil 9.64. S1-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

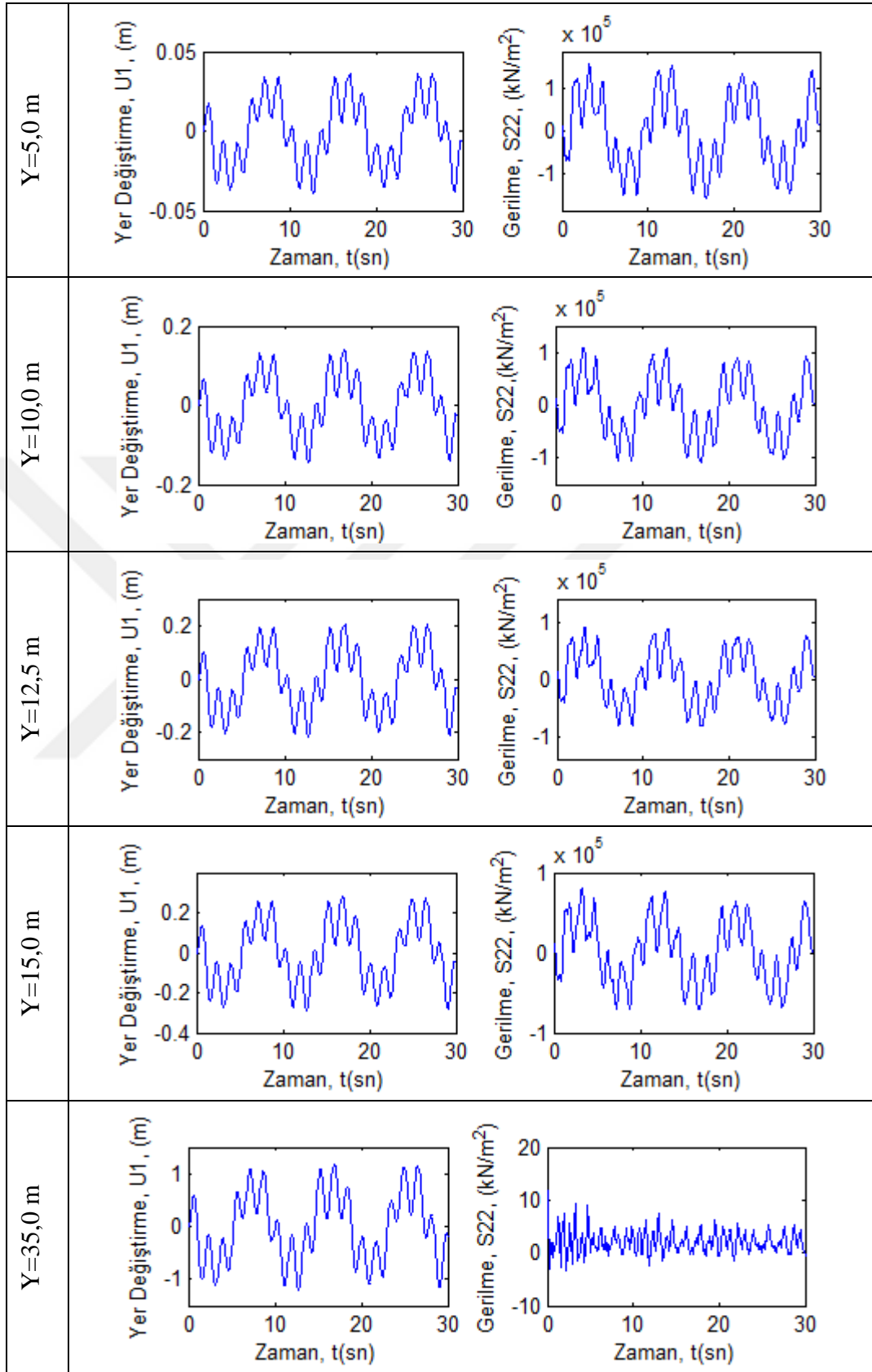
### 9.3.2.2 S2-RD-ZS Modeli



Şekil 9.65. S2-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri



### 9.3.2.3 S3-RD-ZS Modeli



Şekil 9.66. S3-RD-ZS Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.2.4 Model IIB İçin Değerlendirme

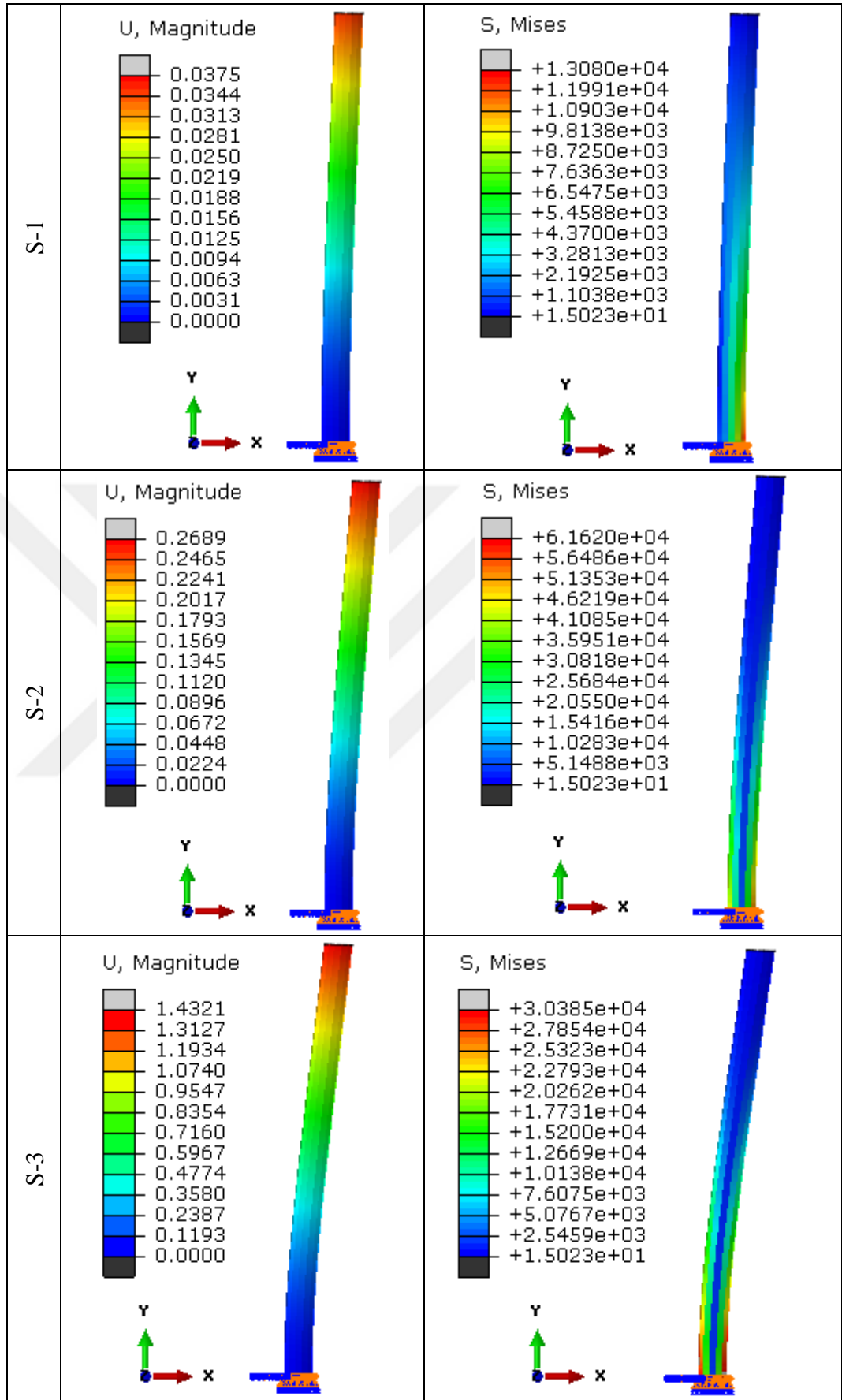
Değişken yoğunluklu deniz ve sabit zemin ortamında yapılan analizler sonucu eksenel yüksüz rıhtım kazığında meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.9'da verilmiştir.

Stokes 1-2-3 dalga teorileri etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.67'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştir.

Tablo 9.9. Model IIB için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0,0375 (%3.73)*	13080.45 (%55)
Stokes-2	0,2689 (%5.50)	61620.33 (%21)
Stokes-3	1,4321 (%4.18)	303853.12 (%2.61)

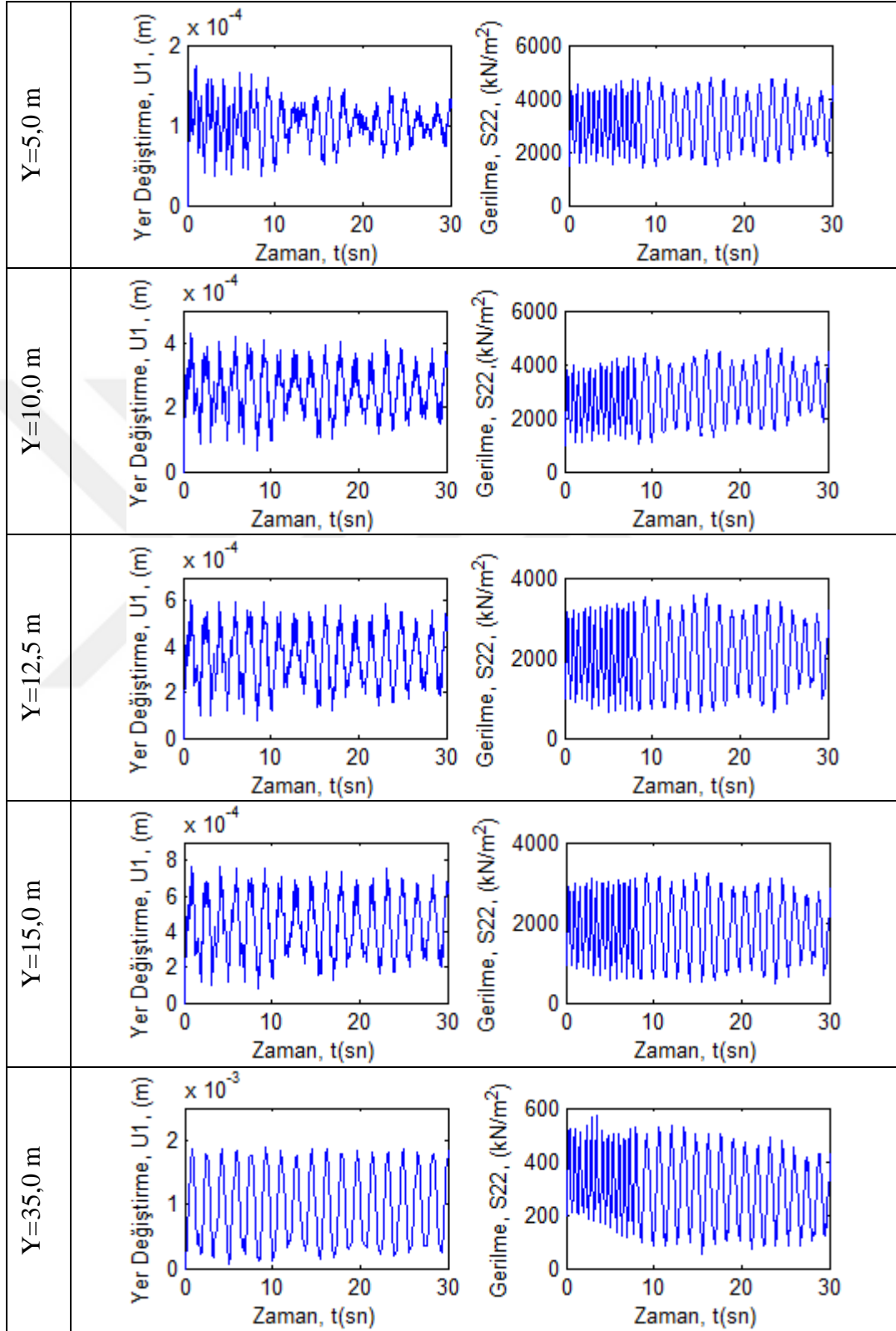
\* Tabloda (%...) Eksenel yüklü (Model IIA) ve Eksenel yük hariç (Model IIB) rıhtım kazıkları arasındaki sonuçların farklarını göstermektedir.



Şekil 9.67. Model IIB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))

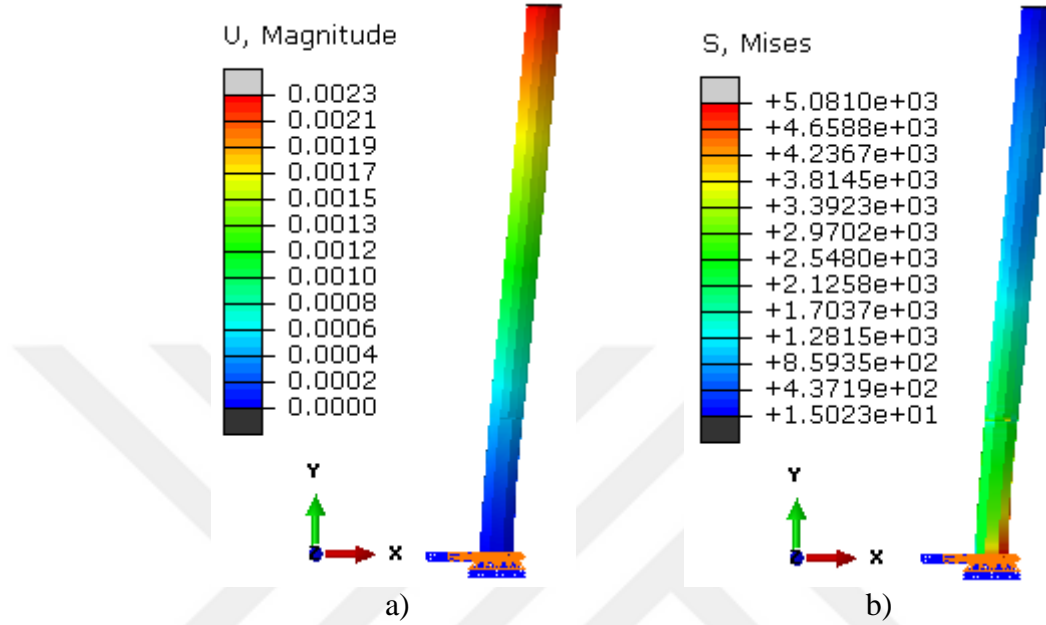
### 9.3.3 Model IIIB İçin Nümerik Analiz

#### 9.3.3.1 S0-RS-ZA Modeli



Şekil 9.68. S0-RS-Zs Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

Bu kısımda durgun deniz ortamında azkıcı zemin etkisindeki rıhtım kazığı aksel yüksüz analiz edilmiştir. Şekil 9.68'de farklı yükseklikteki noktalar için yer değiştirme-zaman ve gerilme-zaman grafikleri verilmiştir. Kazık boyunca meydana gelen yer değiştirme ve gerilme dağılımları ise Şekil 9.69'da gösterilmiştir.



Şekil 9.69. Model IIIB için kazık üzerindeki yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>)).

### 9.3.3.2 Model IIIB İçin Değerlendirme

Rıhtım kazıkları üzerinde yapılan analizler sonucunda aksel yük hariç olması durumunda elde edilen en büyük yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.10'da gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç kısmında verilecektir.

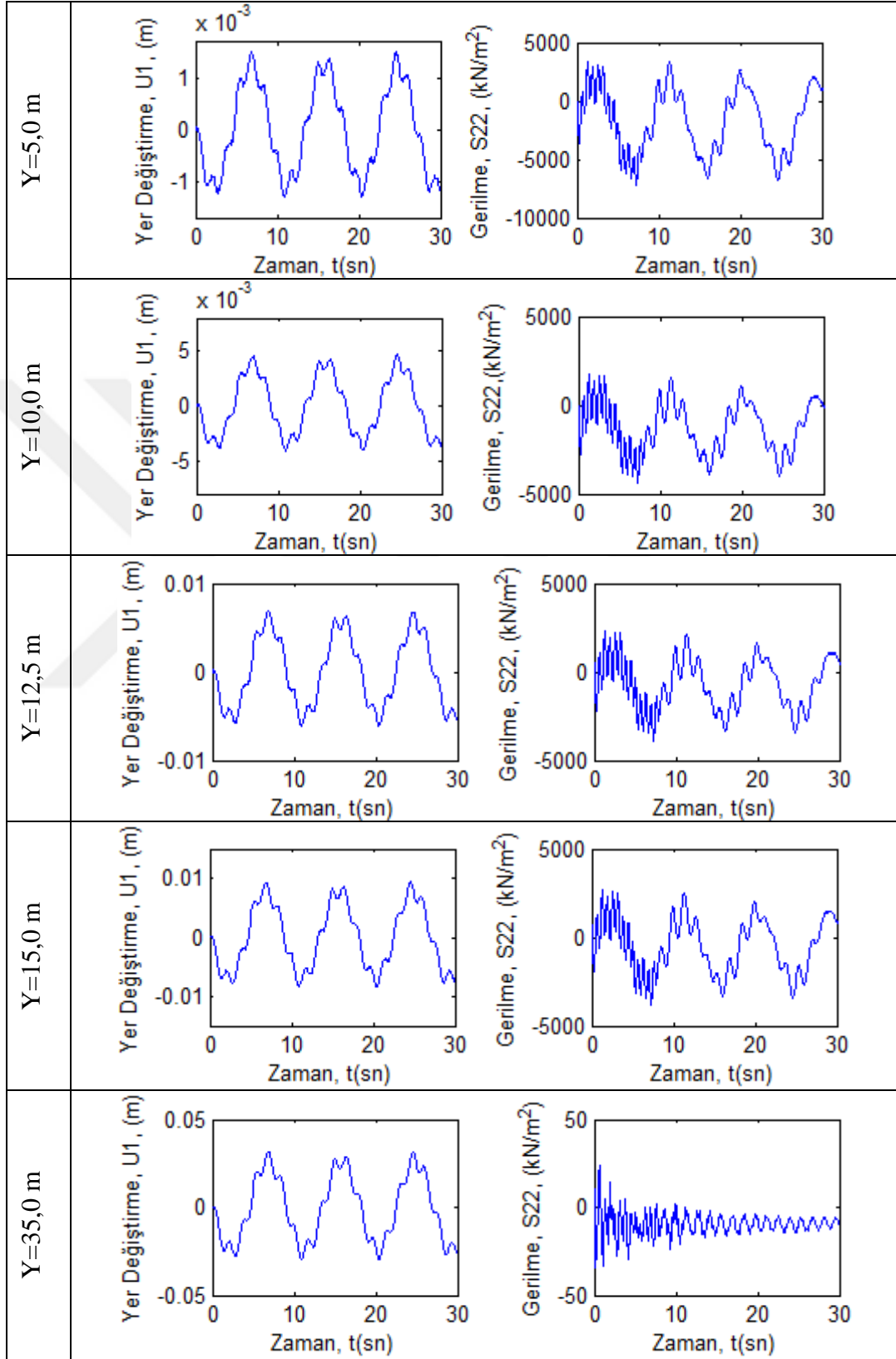
Tablo 9.10. Model IIIB için akışkan-yapı etkileşimi

Tabaka İçi Üniform Akış Hızı (m/sn)	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
V <sub>x</sub> =0,05	0,0023 (%5.5)*	5081.36 (%75.88)

\* Tabloda (%....) Aksel yüklü (Model IIIA) ve Aksel yük hariç (Model IIIB) rıhtım kazıkları arasındaki sonuçların farklarını göstermektedir.

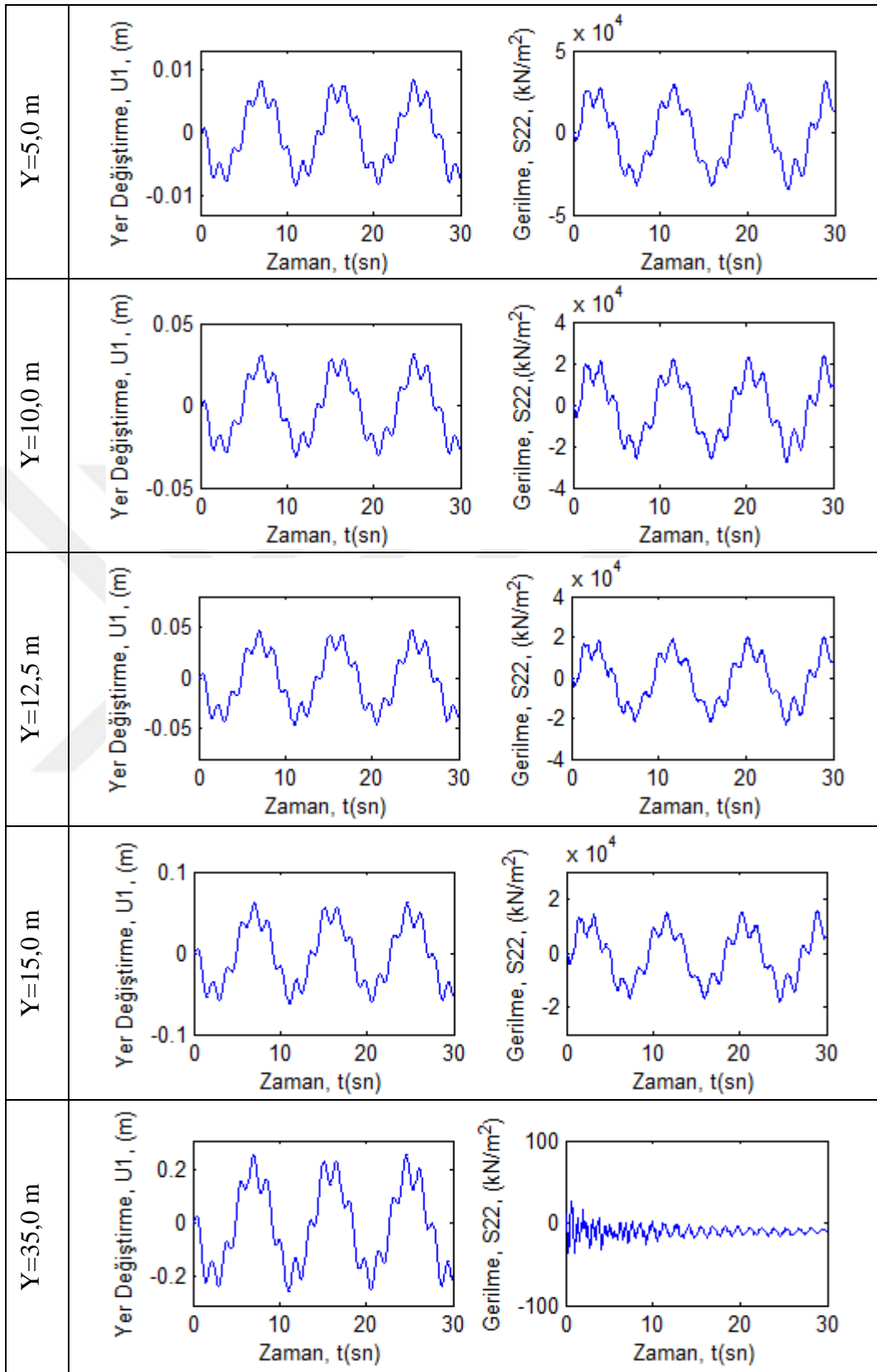
### 9.3.4 Model IVB İçin Nümerik Analiz

#### 9.3.4.1 S1-RS-ZA Modeli



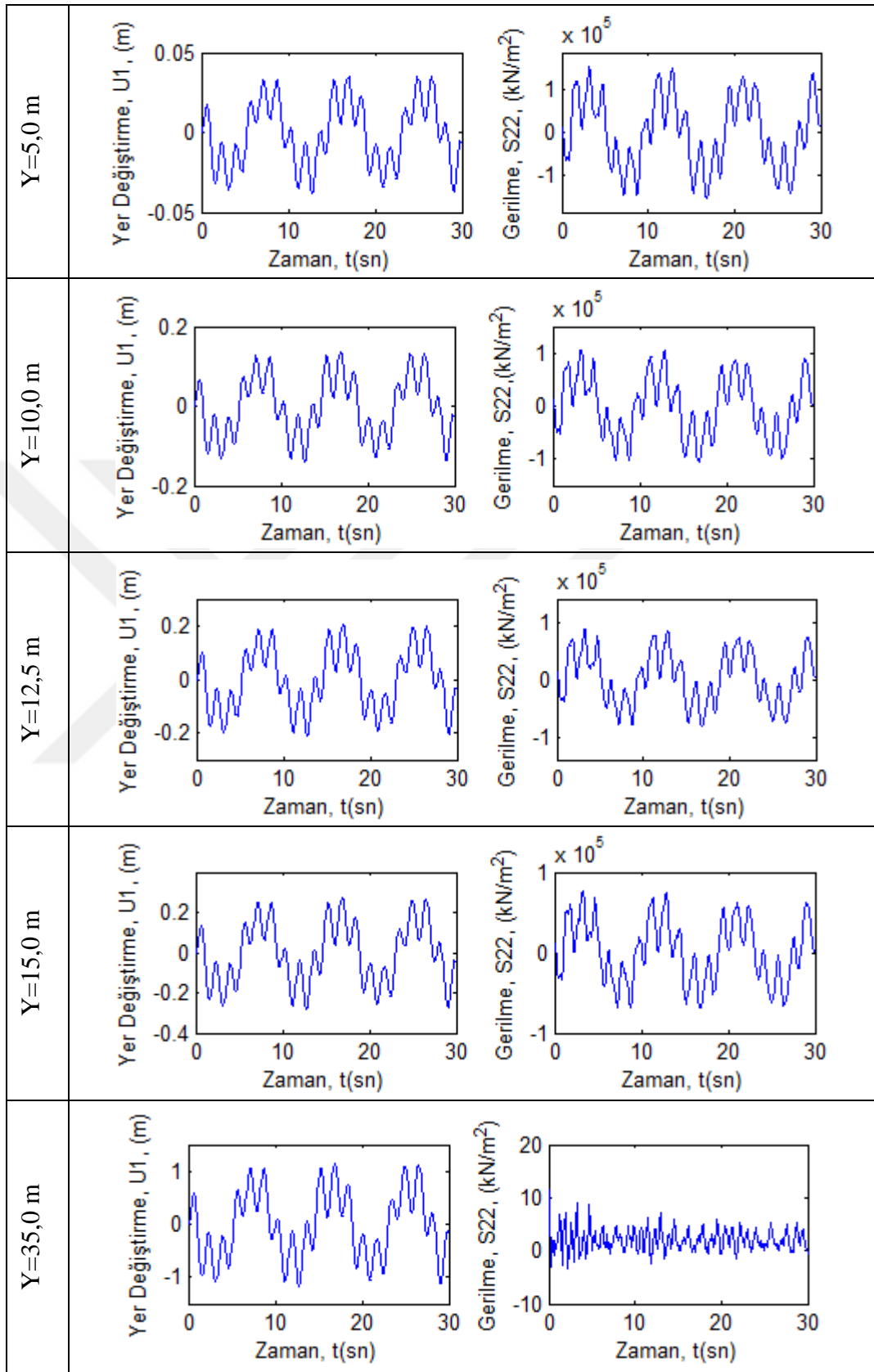
Şekil 9.70. S1-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.4.2 S2-RS-ZA Modeli



Şekil 9.71. S2-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.4.3 S3-RS-ZA Modeli



Şekil 9.72. S3-RS-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri



#### 9.3.4.4 Model IVB İçin Değerlendirme

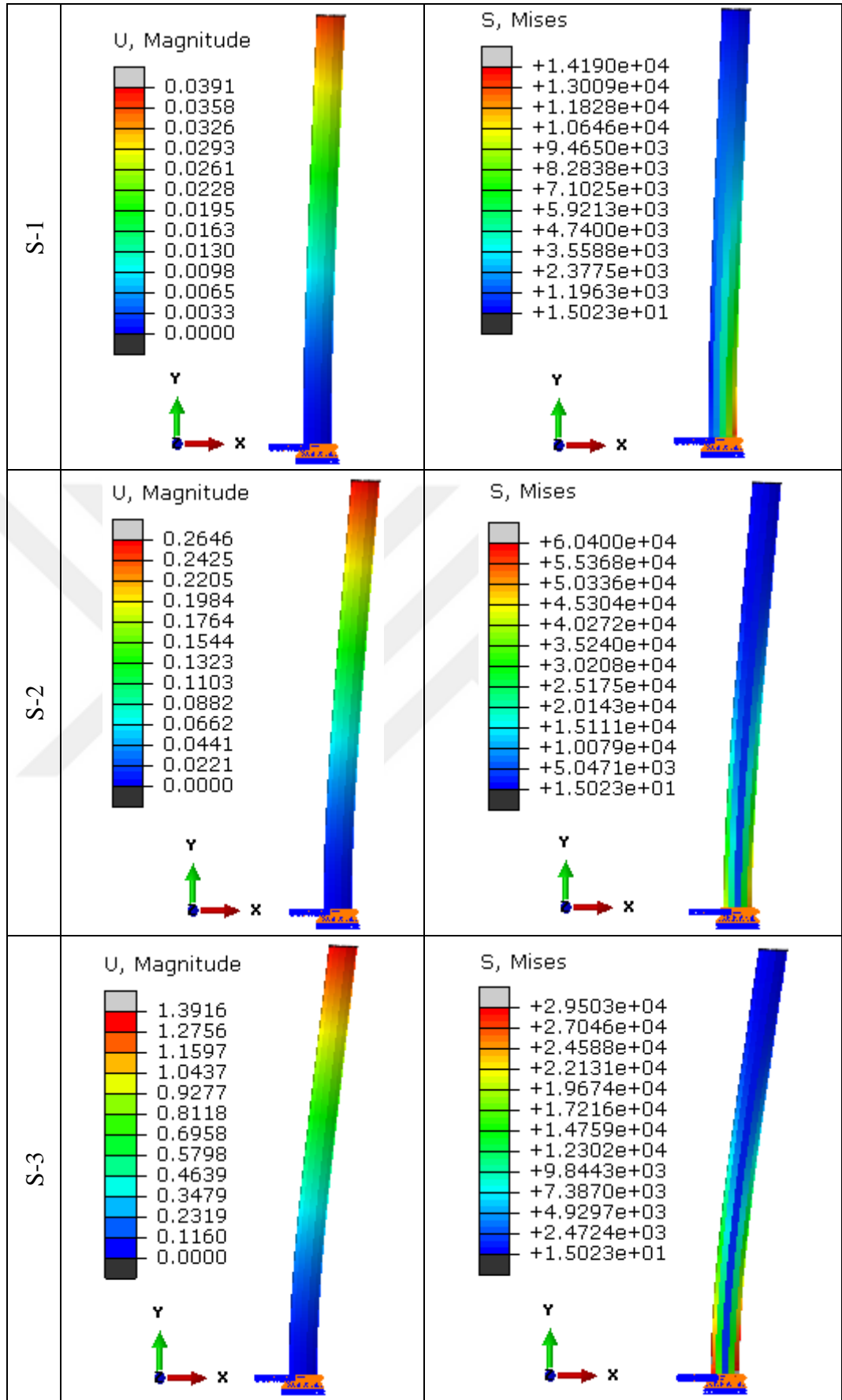
Sabit yoğunluklu deniz ve sıvılaşmış zemin akışı ortamında yapılan analizler sonucu eksenel yüksüz rıhtım kazığında meydana gelen yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.11'de verilmiştir.

Stokes 1-2-3 dalga teorileri etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.73'de gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.11. Model IVB için akışkan-yapı etkileşimi.

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı zerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0,0391 (%3.98)*	14190.37 (%53)
Stokes-2	0,2646 (%5.79)	60400.25 (%20.6)
Stokes-3	1,3916 (%3.89)	295030.42 (%2.77)

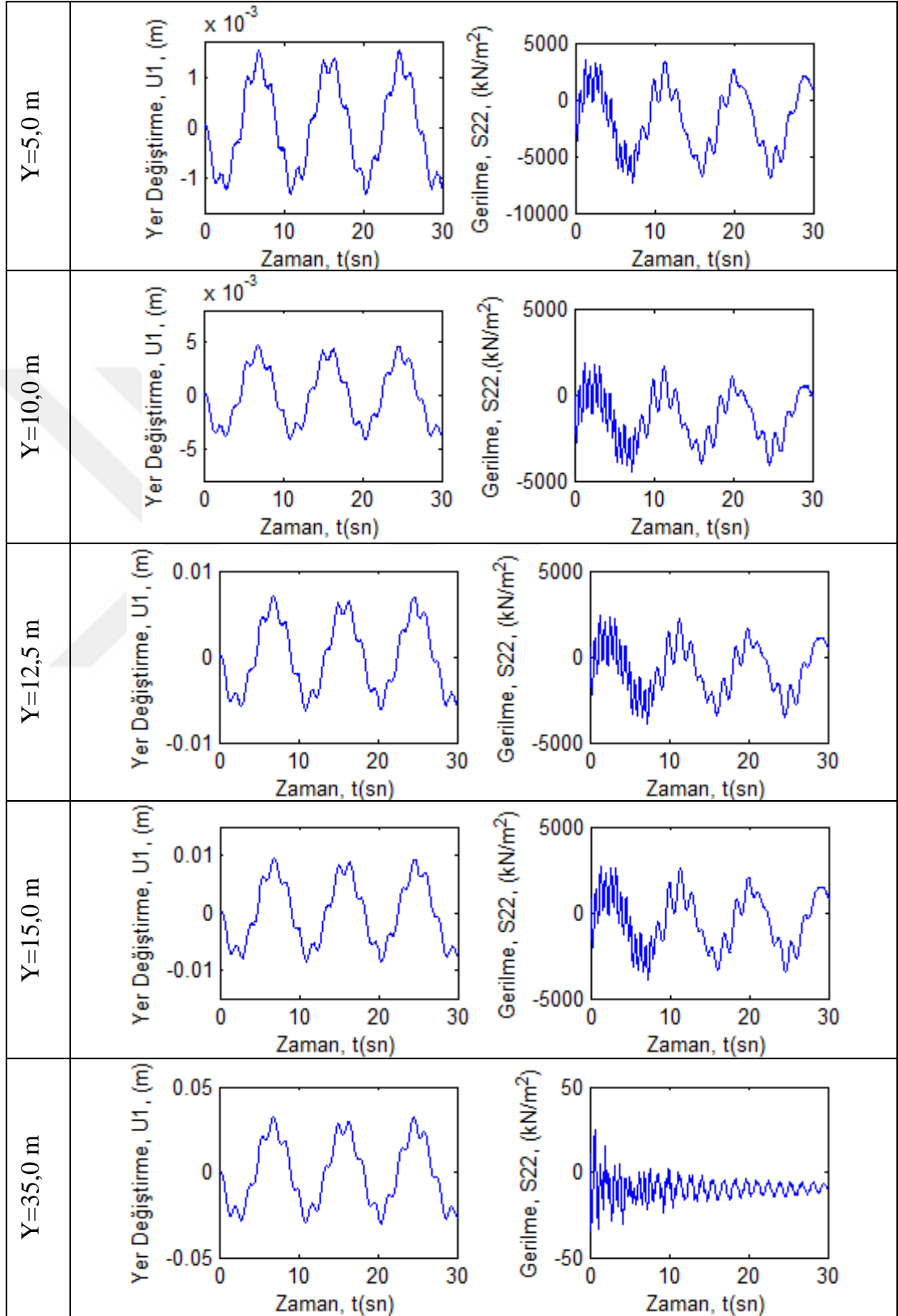
\* Tabloda (%...) Eksenel yüklü (Model IVA) ve Eksenel yük hariç (Model IVB) rıhtım kazıkları arasındaki sonuçların farklarını göstermektedir.



Şekil 9.73. Model IVB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>)).

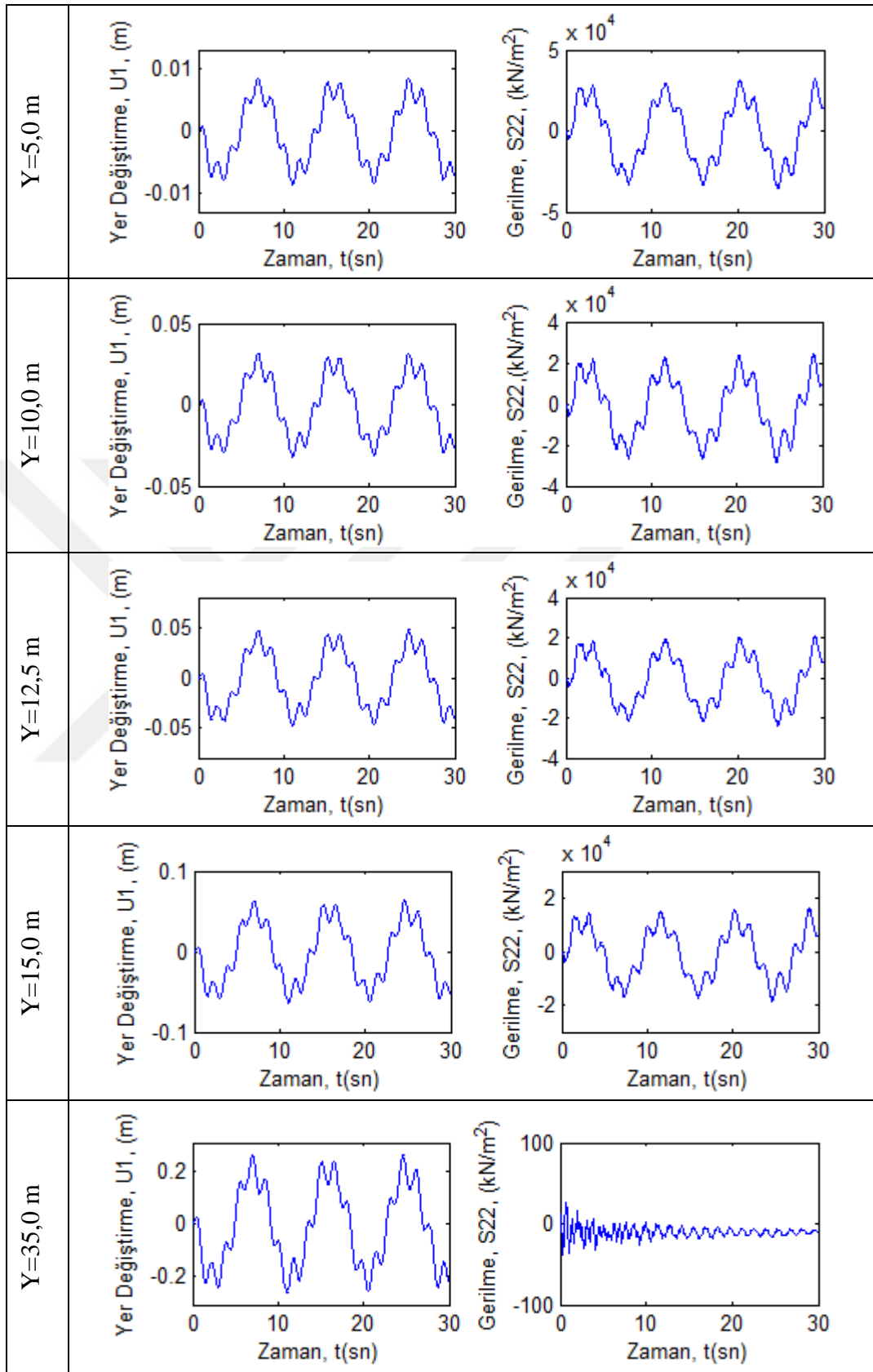
### 9.3.5 Model VB İçin Nümerik Analiz

#### 9.3.5.1 S1-RD-ZA Modeli



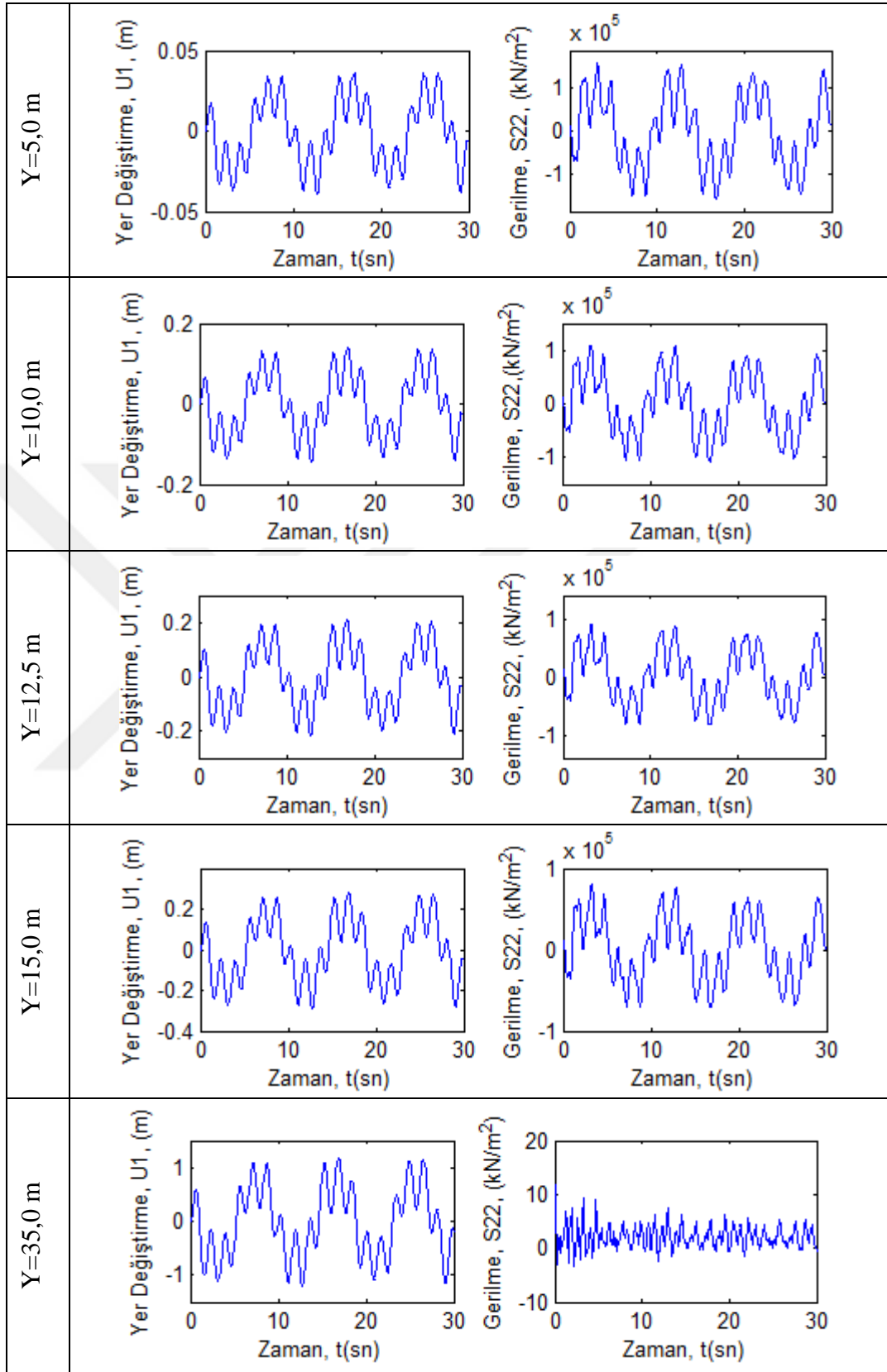
Şekil 9.74. S1-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.5.2 S2-RD-ZA Modeli



Şekil 9.75. S2-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değişirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.5.3 S3-RD-ZA Modeli



Şekil 9.76. S3-RD-ZA Modeli için kazık üzerindeki yer değiştirme-zaman ve gerilme zaman grafikleri

### 9.3.5.4 Model VB İçin Değerlendirme

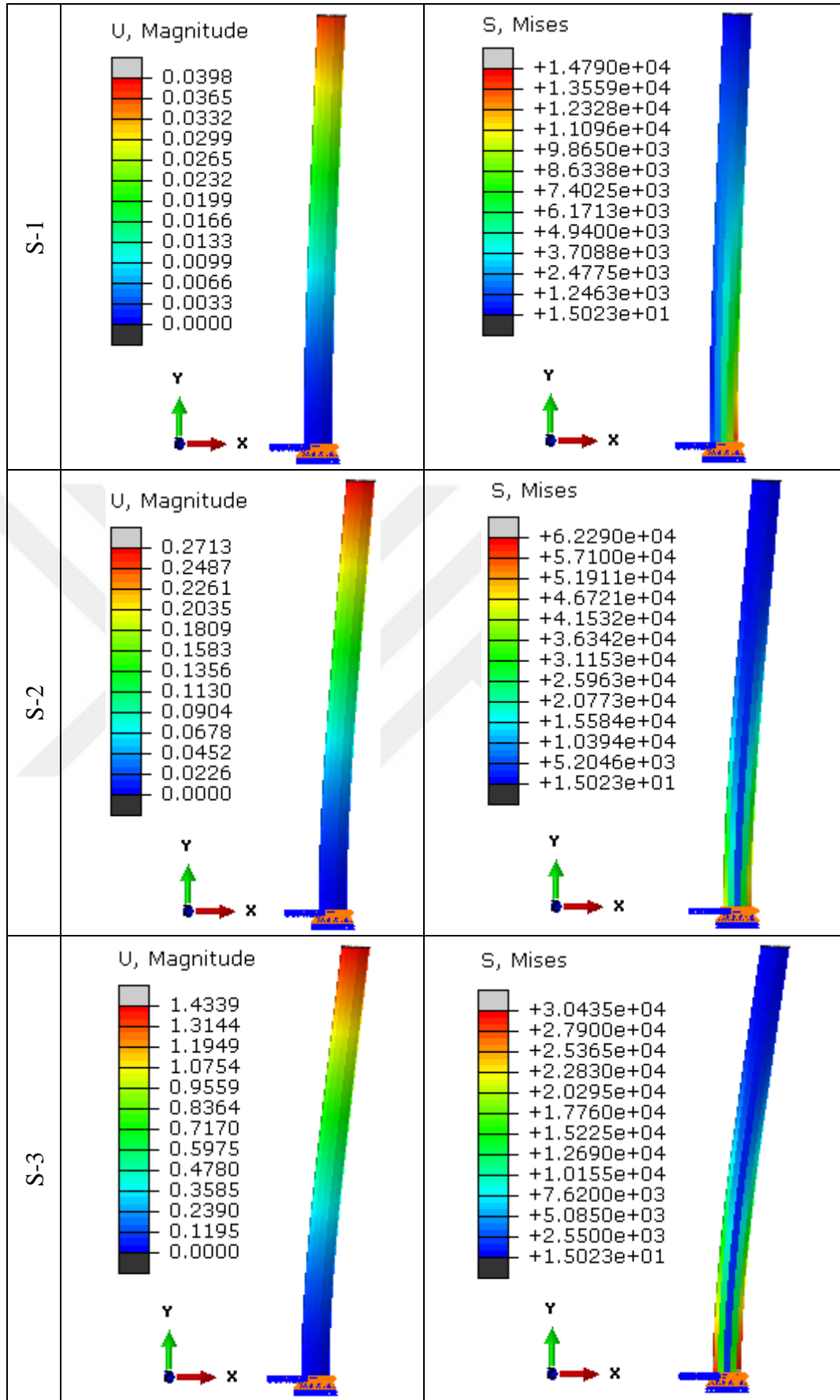
Derinlikle değişken yoğunluklu deniz ve akıcı zemin ortamında aksenal yük hariç yapılan analizlerde rıhtım kazığı üzerinde meydana gelen en büyük yer değiştirme ve gerilme değerleri Tablo 9.12'de verilmiştir.

Stokes 1-2-3 tasarım dalgaları etkisinde kazık boyunca ortaya çıkan yer değiştirme ve gerilme değerleri Şekil 9.77'da gösterilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuç bölümünde yapılmıştır.

Tablo 9.12. Model VB için akışkan-yapı etkileşimi

Dalga Tipi	Rıhtım Kazığı Üzerinde	
	Yer Değiştirme (m) (y=40,0m)	Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ) (y=0,0m)
Stokes-1	0,0398 (%3.91)*	14790.44 (%52)
Stokes-2	0,2713 (%5.82)	62290.17 (%20.4)
Stokes-3	1,4339 (%3.93)	304350.26 (%2.62)

\* Tabloda (%....) Aksenal yüklü (Model VA) ve Aksenal yük hariç (Model VB) rıhtım kazıkları arasındaki sonuçların farklarını göstermektedir.



Şekil 9.77. Model VB için yer değiştirme ve gerilme dağılımı (U(m), S(kN/m<sup>2</sup>))

#### 9.4 Modellerin Çoklu Regresyon Bağıntıları:

Modellerdeki kazık üst ucuna göre derinlik ( $Y=m$ ), hidrodinamik dalga basıncı ( $P=kN/m^2$ ), dalga hızı ( $V=m/sn$ ), yanal kazık yer değiştirmesi ( $U=m$ ) ve çelik kazıkta oluşan dalga-sediment-akıcı zemin kökenli Von-Mises gerilmeleri ( $S=kN/m^2$ ) çoklu regresyon analizi kullanılarak ilişkilendirilmiş ve bağıntılar Tablo 9.13-Tablo 9.22'de verilmiştir. Denklemlerde  $Y$  değeri kazık üst ucu 0.0 m, kazık mesneti 40.0 m olacak şekilde pozitif artmaktadır.



## Eksenel Yüklü Modellerin Çoklu Regresyon Bağlantıları

(Model IA, Model IIA, Model IIIA, Model IVA, Model VA)

Tablo 9.13. Model IA için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9924	A	$S = -1.02 \times 10^{-5} Y^4 - 6.56 \times 10^{-4} Y^3 - 1.45 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y - 13.09 P + 98.80 V - 2.58 U + 15.99$
	B	$S = -7.16 \times 10^{-6} Y^4 + 4.81 \times 10^{-4} Y^3 - 1.16 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.49 P + 0 V - 2.35 U + 15.99$
	C	$S = +4.10 \times 10^{-6} Y^4 - 1.19 \times 10^{-5} Y^3 - 1.37 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y - 5.96 P - 35.18 V - 1.68 U + 15.99$
	D	$S = +9.59 \times 10^{-6} Y^4 - 4.19 \times 10^{-5} Y^3 + 4.59 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y + 0.44 P - 0 V - 3.17 U + 15.99$
	E	$S = +1.54 \times 10^{-5} Y^4 - 7.32 \times 10^{-4} Y^3 + 1.02 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.67 P + 0 V - 3.45 U + 15.99$
S2-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9989	A	$S = -8.51 \times 10^{-5} Y^4 + 4.50 \times 10^{-3} Y^3 - 7.95 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y - 24.87 P + 174.47 V - 1.34 U + 15.99$
	B	$S = -5.65 \times 10^{-5} Y^4 + 3.11 \times 10^{-3} Y^3 - 5.91 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.09 P + 0 V - 0.04 U + 15.99$
	C	$S = +3.99 \times 10^{-6} Y^4 - 2.55 \times 10^{-3} Y^3 + 1.61 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.016 P - 0.057 V + 9.33 U + 15.99$
	D	$S = +5.92 \times 10^{-5} Y^4 - 3.07 \times 10^{-3} Y^3 + 5.24 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.05 P + 0 V - 0.73 U + 15.99$
	E	$S = +8.59 \times 10^{-5} Y^4 - 4.29 \times 10^{-3} Y^3 + 6.90 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 7.84 P + 76.65 V + 0.83 U + 15.99$
S3-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9976	A	$S = -4.19 \times 10^{-4} Y^4 + 2.12 \times 10^{-2} Y^3 - 3.65 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y - 9.16 P + 165.27 V - 0.88 U + 15.99$
	B	$S = -3.21 \times 10^{-4} Y^4 + 1.71 \times 10^{-2} Y^3 - 3.11 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.03 P + 0 V - 0.03 U + 15.99$
	C	$S = +3.68 \times 10^{-6} Y^4 - 6.11 \times 10^{-5} Y^3 - 2.41 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y - 0.124 P - 0.82 V - 0.04 U + 15.99$
	D	$S = +3.17 \times 10^{-4} Y^4 - 1.69 \times 10^{-2} Y^3 + 3.02 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y + 0.01 P + 0 V - 0.44 U + 15.99$
	E	$S = +4.11 \times 10^{-4} Y^4 - 2.21 \times 10^{-2} Y^3 + 3.93 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y - 0.01 P + 0 V - 0.56 U + 15.99$

Tablo 9.14. Model IIA için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RD-ZS R <sup>2</sup> =0,9781	A	$S = -1.01 \times 10^{-5} Y^4 + 6.29 \times 10^{-4} Y^3 - 1.38 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.90P + 22.63V + 1.97U + 15.99$
	B	$S = -7.10 \times 10^{-6} Y^4 + 4.66 \times 10^{-4} Y^3 - 1.09 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 2.36P + 4.34V + 2.12U + 15.99$
	C	$S = +4.62 \times 10^{-6} Y^4 - 1.72 \times 10^{-4} Y^3 - 1.49 \times 10^{-4} Y^2 + 0.077Y - 1.12P - 6.57V + 2.43U + 15.99$
	D	$S = +1.16 \times 10^{-5} Y^4 - 5.49 \times 10^{-4} Y^3 + 7.01 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 7.42P - 24.01V + 2.06U + 15.99$
	E	$S = +1.80 \times 10^{-5} Y^4 - 9.02 \times 10^{-4} Y^3 + 1.32 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 16.84P - 111.09V + 2.03U + 15.99$
S2-RD-ZS R <sup>2</sup> =0,9953	A	$S = -9.23 \times 10^{-5} Y^4 + 5.07 \times 10^{-3} Y^3 - 9.15 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 5.28P + 38.55V + 0.13U + 15.99$
	B	$S = -6.24 \times 10^{-5} Y^4 + 3.46 \times 10^{-3} Y^3 - 6.39 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 3.92P + 7.71V + 0.38U + 15.99$
	C	$S = +4.62 \times 10^{-6} Y^4 - 1.75 \times 10^{-4} Y^3 + 1.49 \times 10^{-4} Y^2 + 0.077Y - 1.12P - 6.57V + 2.43U + 15.99$
	D	$S = +6.77 \times 10^{-5} Y^4 - 3.61 \times 10^{-3} Y^3 + 6.11 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 3.78P - 14.15V + 0.54U + 15.99$
	E	$S = +7.85 \times 10^{-5} Y^4 - 3.93 \times 10^{-3} Y^3 + 6.74 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 7.77P + 86.07V - 0.25U + 15.99$
S3-RD-ZS R <sup>2</sup> =0,9984	A	$S = -4.99 \times 10^{-4} Y^4 + 2.70 \times 10^{-2} Y^3 - 4.72 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 2.91P + 53.70V - 0.38U + 15.99$
	B	$S = -3.56 \times 10^{-4} Y^4 + 1.94 \times 10^{-2} Y^3 - 3.46 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y + 3.39P + 11.70V + 0.07U + 15.99$
	C	$S = +6.24 \times 10^{-6} Y^4 - 2.64 \times 10^{-4} Y^3 + 2.00 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.03P - 0.17V + 0.13U + 15.99$
	D	$S = +3.59 \times 10^{-4} Y^4 - 1.95 \times 10^{-2} Y^3 + 3.42 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 6.06P - 18.87V + 0.17U + 15.99$
	E	$S = +4.67 \times 10^{-4} Y^4 - 2.53 \times 10^{-2} Y^3 + 4.44 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 8.39P - 170.18V + 0.17U + 15.99$

Tablo 9.15. Model IIIA için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
SS-RS-ZS R2=0,9879	A	$S = +9.82 \times 10^{-7} Y^4 + 8.05 \times 10^{-5} Y^3 - 4.39 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.92P + 0V - 65.37U + 15.99$
	B	$S = +1.26 \times 10^{-6} Y^4 + 6.62 \times 10^{-5} Y^3 - 4.13 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.49V - 65.21U + 15.99$
	C	$S = +1.86 \times 10^{-6} Y^4 + 3.49 \times 10^{-5} Y^3 - 3.57 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.44V - 64.86U + 15.99$
	D	$S = +2.47 \times 10^{-6} Y^4 + 3.65 \times 10^{-6} Y^3 + 3.12 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.91V - 64.52U + 15.99$
	E	$S = +3.13 \times 10^{-6} Y^4 - 3.04 \times 10^{-5} Y^3 - 2.38 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0.83P + 0V - 64.14U + 15.99$

Tablo 9.16. Model IVA için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9827	A	$S = -8.42 \times 10^{-6} Y^4 + 4.86 \times 10^{-4} Y^3 - 1.08 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 0.45P + 1.74V + 9.73U + 15.99$
	B	$S = -5.61 \times 10^{-6} Y^4 + 3.42 \times 10^{-4} Y^3 - 8.22 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.59P + 0.41V + 9.92U + 15.99$
	C	$S = +4.71 \times 10^{-6} Y^4 - 1.95 \times 10^{-4} Y^3 + 1.48 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.23P - 0.28V + 10.65U + 15.99$
	D	$S = +1.15 \times 10^{-5} Y^4 - 5.52 \times 10^{-4} Y^3 + 7.96 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 1.34P - 2.25V + 11.15U + 15.99$
	E	$S = +1.75 \times 10^{-5} Y^4 - 8.63 \times 10^{-4} Y^3 + 1.35 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 13.70P + 93.44V + 11.58U + 15.99$
S2-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9981	A	$S = -8.08 \times 10^{-5} Y^4 + 4.32 \times 10^{-3} Y^3 - 8.02 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 3.23P + 23.14V - 0.94U + 15.99$
	B	$S = -5.47 \times 10^{-5} Y^4 + 2.94 \times 10^{-3} Y^3 - 5.62 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 1.66P + 3.22V - 0.64U + 15.99$
	C	$S = +6.77 \times 10^{-8} Y^4 + 9.66 \times 10^{-5} Y^3 - 4.57 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.06P - 0.31V + 0.01U + 15.99$
	D	$S = +5.77 \times 10^{-5} Y^4 - 2.92 \times 10^{-3} Y^3 + 4.98 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.21P - 8.48V + 0.69U + 15.99$
	E	$S = +1.14 \times 10^{-4} Y^4 - 5.81 \times 10^{-3} Y^3 + 7.43 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 78.27P + 826.08V + 0.80U + 15.99$
S3-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9866	A	$S = -4.36 \times 10^{-4} Y^4 + 2.27 \times 10^{-2} Y^3 - 4.02 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 3.46P + 69.65V - 0.98U + 15.99$
	B	$S = -3.06 \times 10^{-4} Y^4 + 1.61 \times 10^{-2} Y^3 - 2.94 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y + 5.67P + 19.13V - 0.67U + 15.99$
	C	$S = +4.17 \times 10^{-6} Y^4 - 1.03 \times 10^{-4} Y^3 - 1.33 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.05P - 0.36V - 0.03U + 15.99$
	D	$S = +3.07 \times 10^{-4} Y^4 - 1.58 \times 10^{-2} Y^3 + 2.84 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 15.19P - 46.27V + 0.59U + 15.99$
	E	$S = +3.98 \times 10^{-4} Y^4 - 2.06 \times 10^{-2} Y^3 + 3.70 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 21.26P - 420.81V + 0.78U + 15.99$

Tablo 9.17. Model VA için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9644	A	$S = -7.73 \times 10^{-6} Y^4 + 4.28 \times 10^{-4} Y^3 - 9.53 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0.80P + 1.91V + 13.77U + 15.99$
	B	$S = -4.96 \times 10^{-6} Y^4 + 2.81 \times 10^{-4} Y^3 - 6.85 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 9.57P + 0.57V + 13.97U + 15.99$
	C	$S = +5.68 \times 10^{-6} Y^4 - 2.73 \times 10^{-5} Y^3 + 3.12 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 3.29P - 0.19V + 14.74U + 15.99$
	D	$S = +1.28 \times 10^{-5} Y^4 - 6.42 \times 10^{-4} Y^3 + 9.88 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 1.74P - 2.29V + 15.26U + 15.99$
	E	$S = +1.65 \times 10^{-5} Y^4 - 4.64 \times 10^{-4} Y^3 + 1.34 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 21.31P + 146.94V + 16.50U + 15.99$
S2-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9980	A	$S = -8.63 \times 10^{-5} Y^4 + 4.64 \times 10^{-3} Y^3 - 8.53 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.33P + 18.01V - 0.14U + 15.99$
	B	$S = -5.75 \times 10^{-5} Y^4 + 3.11 \times 10^{-3} Y^3 - 5.82 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 1.3P + 2.77V + 0.13U + 15.99$
	C	$S = +1.17 \times 10^{-6} Y^4 + 7.96 \times 10^{-6} Y^3 - 2.61 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 0.04P - 0.11V + 0.76U + 15.99$
	D	$S = +6.35 \times 10^{-5} Y^4 - 3.29 \times 10^{-3} Y^3 + 5.66 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 1.56P - 6.06V + 1.42U + 15.99$
	E	$S = +9.32 \times 10^{-5} Y^4 - 5.03 \times 10^{-3} Y^3 + 8.92 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 5.84P - 65.12V + 1.09U + 15.99$
S3-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9752	A	$S = -4.82 \times 10^{-4} Y^4 + 2.59 \times 10^{-2} Y^3 - 4.59 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 2.08P + 39.36V - 0.54U + 15.99$
	B	$S = -3.53 \times 10^{-4} Y^4 + 1.85 \times 10^{-2} Y^3 - 3.33 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 2.53P + 8.94V - 0.34U + 15.99$
	C	$S = +6.04 \times 10^{-6} Y^4 - 2.53 \times 10^{-4} Y^3 + 1.88 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.02P - 0.12V + 0.13U + 15.99$
	D	$S = +3.53 \times 10^{-4} Y^4 - 1.89 \times 10^{-2} Y^3 + 3.33 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 5.09P - 16.12V + 0.54U + 15.99$
	E	$S = +4.58 \times 10^{-4} Y^4 - 2.46 \times 10^{-2} Y^3 + 4.33 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 7.06P - 145.57V + 0.66U + 15.99$

Eksenel yüklü modellerin Çoklu Regresyon Analiz sonucuna göre regresyon katsayıları R<sup>2</sup>min= 0.9644 ve R<sup>2</sup>max= 0.9984 arasında değişmekte ve bu değerler analizin sonuçlarının kabul edilebilir bir uyumluluk gösterdiğini ortaya koymuştur.

## Eksenel Yük Hariç Modellerin Çoklu Regresyon Bağlıları

(Model IB, Model IIB, Model IIIB, Model IVB, Model VB)

Tablo 9.18. Model IB için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9879	A	$S = -1.04 \times 10^{-5} Y^4 - 6.57 \times 10^{-4} Y^3 - 1.46 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y - 13.01 P + 98.22 V - 2.76 U$
	B	$S = -7.16 \times 10^{-6} Y^4 + 4.81 \times 10^{-4} Y^3 - 1.16 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.50 P + 0 V - 2.40 U$
	C	$S = +4.10 \times 10^{-6} Y^4 - 1.19 \times 10^{-5} Y^3 - 1.37 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y - 5.96 P - 35.23 V - 1.75 U$
	D	$S = +9.59 \times 10^{-6} Y^4 - 4.19 \times 10^{-5} Y^3 + 4.59 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y + 0.44 P - 0 V - 3.19 U$
	E	$S = +1.54 \times 10^{-5} Y^4 - 7.32 \times 10^{-4} Y^3 + 1.02 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.68 P + 0 V - 3.46 U$
S2-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9977	A	$S = -8.51 \times 10^{-5} Y^4 + 4.50 \times 10^{-3} Y^3 - 7.95 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y - 24.87 P + 174.47 V - 1.28 U$
	B	$S = -5.80 \times 10^{-5} Y^4 + 3.15 \times 10^{-3} Y^3 - 5.91 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.16 P - 0.06 V + 2.48 U$
	C	$S = +3.09 \times 10^{-6} Y^4 - 1.15 \times 10^{-3} Y^3 + 5.46 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y - 0.08 P - 2.94 V - 0.26 U$
	D	$S = +5.62 \times 10^{-5} Y^4 - 2.91 \times 10^{-3} Y^3 + 4.87 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.13 P + 0 V - 1.64 U$
	E	$S = +8.59 \times 10^{-5} Y^4 - 4.29 \times 10^{-3} Y^3 + 6.90 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 7.84 P + 76.65 V + 0.77 U$
S3-RS-ZS R <sup>2</sup> =0,9836	A	$S = -4.19 \times 10^{-4} Y^4 + 2.07 \times 10^{-2} Y^3 - 3.56 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y - 8.87 P + 1159.83 V - 1.18 U$
	B	$S = -3.21 \times 10^{-4} Y^4 + 1.72 \times 10^{-2} Y^3 - 3.113 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077 Y + 0.03 P + 0 V - 0.34 U$
	C	$S = +3.67 \times 10^{-6} Y^4 - 6.11 \times 10^{-5} Y^3 - 2.43 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077 Y - 0.12 P - 0.82 V - 0.05 U$
	D	$S = +3.15 \times 10^{-4} Y^4 - 1.68 \times 10^{-2} Y^3 + 3.02 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y + 0.01 P + 0 V - 0.45 U$
	E	$S = +4.22 \times 10^{-4} Y^4 - 2.26 \times 10^{-2} Y^3 + 4.05 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077 Y - 0.012 P + 0 V - 0.25 U$

Tablo 9.19. Model IIB için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RD-ZS R <sup>2</sup> =0,9781	A	$S = -1.01 \times 10^{-5} Y^4 + 6.29 \times 10^{-4} Y^3 - 1.38 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.90P + 22.58V + 1.76U$
	B	$S = -7.10 \times 10^{-6} Y^4 + 4.66 \times 10^{-4} Y^3 - 1.09 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 2.36P + 4.32V + 1.90U$
	C	$S = +4.62 \times 10^{-6} Y^4 - 1.72 \times 10^{-4} Y^3 - 1.35 \times 10^{-4} Y^2 + 0.077Y - 1.12P - 6.59V + 2.20U$
	D	$S = +1.16 \times 10^{-5} Y^4 - 5.49 \times 10^{-4} Y^3 + 6.98 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 7.43P - 24.03V + 1.83U$
	E	$S = +1.80 \times 10^{-5} Y^4 - 9.02 \times 10^{-4} Y^3 + 1.32 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 16.84P - 111.18V + 1.82U$
S2-RD-ZS R <sup>2</sup> =0.9949	A	$S = -9.23 \times 10^{-5} Y^4 + 5.07 \times 10^{-3} Y^3 - 9.15 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 5.28P + 38.55V + 0.10U$
	B	$S = -6.63 \times 10^{-5} Y^4 + 3.58 \times 10^{-3} Y^3 - 6.43 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 4.89P + 10.11V + 2.80U$
	C	$S = +1.09 \times 10^{-6} Y^4 + 1.75 \times 10^{-5} Y^3 - 2.98 \times 10^{-4} Y^2 + 0.077Y - 0.09P - 0.32V + 0.43U$
	D	$S = +6.52 \times 10^{-5} Y^4 - 3.44 \times 10^{-3} Y^3 + 5.75 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 3.87P - 14.80V + 0.42U$
	E	$S = +7.85 \times 10^{-5} Y^4 - 3.93 \times 10^{-3} Y^3 + 6.74 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 7.77P + 86.08V - 0.26U$
S3-RD-ZS R <sup>2</sup> =0,9750	A	$S = -4.99 \times 10^{-4} Y^4 + 2.62 \times 10^{-2} Y^3 - 4.59 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 2.80P + 51.47V - 0.54U$
	B	$S = -3.56 \times 10^{-4} Y^4 + 1.94 \times 10^{-2} Y^3 - 3.46 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y + 3.43P + 11.88V + 0.12U$
	C	$S = +6.23 \times 10^{-6} Y^4 - 2.64 \times 10^{-4} Y^3 + 2.00 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.03P - 0.17V + 0.12U$
	D	$S = +3.59 \times 10^{-4} Y^4 - 1.95 \times 10^{-2} Y^3 + 3.42 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 6.04P - 18.83V + 0.13U$
	E	$S = +4.79 \times 10^{-4} Y^4 - 2.60 \times 10^{-2} Y^3 + 4.57 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 8.56P - 172.96V + 0.32U$

Tablo 9.20. Model IIIB için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
SS-RS-ZS R2=0,9784	A	$S = +9.71 \times 10^{-7} Y^4 + 8.13 \times 10^{-5} Y^3 - 4.41 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.92P + 0V - 65.16U$
	B	$S = +1.25 \times 10^{-6} Y^4 + 6.71 \times 10^{-5} Y^3 - 4.16 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.49V - 65.01U$
	C	$S = +1.85 \times 10^{-6} Y^4 + 3.58 \times 10^{-5} Y^3 - 3.59 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.44V - 64.67U$
	D	$S = +2.46 \times 10^{-6} Y^4 + 4.51 \times 10^{-5} Y^3 - 3.02 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0P - 0.91V - 64.34U$
	E	$S = +3.12 \times 10^{-6} Y^4 - 3.01 \times 10^{-5} Y^3 - 2.42 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0.83P + 0V - 63.98U$



Tablo 9.21. Model IVB için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9807	A	$S = -8.42 \times 10^{-6} Y^4 + 4.86 \times 10^{-4} Y^3 - 1.08 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 0.45P + 1.74V + 9.23U$
	B	$S = -5.61 \times 10^{-6} Y^4 + 3.42 \times 10^{-4} Y^3 - 8.24 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.59P + 0.41V + 9.41U$
	C	$S = +4.71 \times 10^{-6} Y^4 - 1.95 \times 10^{-4} Y^3 + 1.46 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.23P - 0.29V + 10.11U$
	D	$S = +1.15 \times 10^{-5} Y^4 - 5.52 \times 10^{-4} Y^3 + 7.96 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 1.34P - 2.25V + 10.59U$
	E	$S = +1.75 \times 10^{-5} Y^4 - 8.63 \times 10^{-4} Y^3 + 1.35 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 13.70P + 93.37V + 11.01U$
S2-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9985	A	$S = -8.79 \times 10^{-5} Y^4 + 4.32 \times 10^{-3} Y^3 - 8.02 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 3.23P + 23.13V - 0.91U$
	B	$S = -5.65 \times 10^{-5} Y^4 + 2.94 \times 10^{-3} Y^3 - 5.47 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 1.83P + 4.08V - 1.70U$
	C	$S = +5.85 \times 10^{-8} Y^4 + 9.74 \times 10^{-5} Y^3 - 4.59 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.06P - 0.31V + 0.01U$
	D	$S = +5.48 \times 10^{-5} Y^4 - 2.72 \times 10^{-3} Y^3 + 4.61 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.16P - 8.60V - 0.27U$
	E	$S = +1.14 \times 10^{-4} Y^4 - 5.81 \times 10^{-3} Y^3 + 7.43 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 78.27P + 826.19V + 0.74U$
S3-RS-ZA R <sup>2</sup> =0.9867	A	$S = -4.21 \times 10^{-4} Y^4 + 2.21 \times 10^{-2} Y^3 - 3.92 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 3.72P + 66.91V - 1.08U$
	B	$S = -3.11 \times 10^{-4} Y^4 + 1.62 \times 10^{-2} Y^3 - 2.96 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y + 5.74P + 19.40V - 0.60U$
	C	$S = +4.17 \times 10^{-6} Y^4 - 1.03 \times 10^{-4} Y^3 - 1.36 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.05P - 0.36V - 0.031U$
	D	$S = +3.05 \times 10^{-4} Y^4 - 1.57 \times 10^{-2} Y^3 + 2.82 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 15.14P - 46.12V + 0.54U$
	E	$S = +4.09 \times 10^{-4} Y^4 - 2.12 \times 10^{-2} Y^3 + 3.81 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 21.68P - 42853V + 0.91U$

Tablo 9.22. Model VB için denklemler.

Model Adı	Nokta	Denklem
S1-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9754	A	$S = -7.80 \times 10^{-6} Y^4 + 4.28 \times 10^{-4} Y^3 - 9.55 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y + 0.79P + 1.90V + 13.11U$
	B	$S = -4.96 \times 10^{-6} Y^4 + 2.82 \times 10^{-4} Y^3 - 6.87 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 9.56P + 0.57V + 13.31U$
	C	$S = +5.67 \times 10^{-6} Y^4 - 2.71 \times 10^{-5} Y^3 + 3.11 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 3.29P - 0.19V + 14.05U$
	D	$S = +1.28 \times 10^{-5} Y^4 - 6.43 \times 10^{-4} Y^3 + 9.86 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 1.75P - 2.29V + 14.55U$
	E	$S = +1.65 \times 10^{-5} Y^4 - 4.64 \times 10^{-4} Y^3 + 1.34 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 21.30P + 146.88V + 15.73U$
S2-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9984	A	$S = -8.63 \times 10^{-5} Y^4 + 4.64 \times 10^{-3} Y^3 - 8.54 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 2.33P + 18.01V - 0.15U$
	B	$S = -5.92 \times 10^{-5} Y^4 + 3.11 \times 10^{-3} Y^3 - 5.71 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 1.41P + 3.56V + 2.43U$
	C	$S = +1.16 \times 10^{-6} Y^4 + 8.74 \times 10^{-6} Y^3 - 2.62 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 0.04P - 0.10V + 0.70U$
	D	$S = +6.05 \times 10^{-5} Y^4 - 3.18 \times 10^{-3} Y^3 + 5.27 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 1.52P - 6.22V + 0.42U$
	E	$S = +9.32 \times 10^{-5} Y^4 - 5.03 \times 10^{-3} Y^3 + 8.89 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y - 5.84P - 65.13V + 1.02U$
S3-RD-ZA R <sup>2</sup> =0.9750	A	$S = -4.71 \times 10^{-4} Y^4 + 2.52 \times 10^{-2} Y^3 - 4.47 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 2.01P + 37.74V - 0.68U$
	B	$S = -3.53 \times 10^{-4} Y^4 + 1.88 \times 10^{-2} Y^3 - 3.36 \times 10^{-2} Y^2 + 0.077Y + 2.57P + 9.07V - 0.27U$
	C	$S = +6.03 \times 10^{-6} Y^4 - 2.53 \times 10^{-4} Y^3 + 1.87 \times 10^{-3} Y^2 + 0.077Y - 0.02P - 0.12V + 0.12U$
	D	$S = +3.51 \times 10^{-4} Y^4 - 1.88 \times 10^{-2} Y^3 + 3.31 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 5.07P - 16.08V + 0.48U$
	E	$S = +4.76 \times 10^{-4} Y^4 - 2.52 \times 10^{-2} Y^3 + 4.46 \times 10^{-1} Y^2 + 0.077Y - 7.20P - 145.01V + 0.79U$

Eksenel yüklü modellerin Çoklu Regresyon Analiz sonucuna göre regresyon katsayıları R<sup>2</sup>min= 0.9750 ve R<sup>2</sup>max= 0.9985 arasında değişmekte ve bu değerler analizin sonuçlarının kabul edilebilir bir uyumluluk gösterdiğini ortaya koymuştur.

## 10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında; farklı tasarım dalgaları etkisinde, sabit/değişken yoğunluklu deniz ortamında ve zemin sıvılaşması durumunda rıhtım kazıklarının faydalı ömrü içerisinde karşılaşılabileceği dış etkiler için analizler yapılmıştır.

Tasarım Dalgası Etkisi İncelendiğinde; tasarım dalga parametrelerine bağlı olarak değişen dalga teorilerinin farklı hidrodinamik etkiler ortaya çıkardığı ve yüksek mertebe Stokes dalga teorilerin ise düşük mertebe Stokes dalga teorilerine göre daha büyük hidrodinamik kuvvetlere neden olduğu görülmüştür.

Sediment Hareketi Etkisi İncelendiğinde; sediment hareketi deniz tabanında etkili olmakta ve su yüzeyine doğru exponansiyel formda azaldığı, konsantrasyon oranına bağlı olarak rıhtım kazığına etkiyen hidrodinamik basıncı arttığı ve konsantrasyonun en fazla olduğu kısım kazık mesnetine yakın olduğu için etkisi fazla olmadığı görülmüştür

Akıcı Zemin Etkisi İncelendiğinde; deniz tabanında meydana gelebilecek olan belirli bir tabaka kalınlığına sahip zemin akışı rıhtım kazığı üzerine dış kuvvet meydana getirdiği ve akıcı zeminin akış hızı, viskozite değeri ve kıvam indeksi modellemede etkili olduğu görülmüştür.

### 10.1 Eksenel Yüklü Modellerin Değerlendirmesi

**Dalga hızı;** değinilen beş modelde de aynı özellikleri gösterdiğinden dolayı modellerden önce değerlendirilmiştir. Stokes-1, Stokes-2 ve Stokes-3 dalgalarından oluşan dalga hızları, kazık yüzeyinin D/10 kadar uzağında C noktasında en büyük ve mansapta E noktasında en küçük değerlere sahiptir. Deniz yüzeyinde en büyük değere ulaşan dalga parçacık hızları tabana doğru azalmaktadır. Sayısal olarak S1, S2 ve S3 dalgalarının C noktalarındaki en büyük değerleri sırasıyla 0.268 m/sn, 1.743 m/sn, 5.892 m/sn, E noktalarındaki en küçük değerleri ise sırasıyla 0.04 m/sn, 0.184 m/sn, 0.416 m/sn tesbit edilmiştir.

*Model IA / S1-RD-ZS*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B,C,D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $0.49 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-1.54 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. **Hız;** derinlikle azalan parçacık hızları gösterirken su seviyesinde maksimum değerlerine sahiptir. Kazık tepe kesitinin C noktasında maksimum, E noktasında ise minimum parçacık hızları ( $0.268 \text{ m/sn}$ - $0.040 \text{ m/sn}$ ) modelde ortaya çıkmıştır. **Yer değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte)  $0.0355\text{m}$  dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda basınç gerilmesi ( $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) minimum basınç gerilmesi ( $10.94 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), B/C/D noktalarında tedricen yükselerek ( $12.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $19.82 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $24.46 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $28.50 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile noktalardaki basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

*Model IA / S2-RD-ZS*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B,C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $2.51 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-6.142 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte)  $0.2479\text{m}$  dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde çekme değerine (çekme  $-39.31 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-21.15 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ /  $17.80 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ /  $58.77 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $75.72 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

### *Model IA / S3-RD-ZS*

**Basınç;** Dalga; membada (A ) basınç, diğer noktalarda (B,C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $-20.50 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-36.900 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 1.3352m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum çekme değerine ( $-285.11 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-201.97 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 20.83 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 237.97 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $302.92 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

### *Model IIA / S1-RD-ZS*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B,C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $0.49 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-1.540 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme,** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.0361m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde (basınç  $11.16 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $13.09 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 20.22 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 24.95 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $29.07 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek tabandaki memba tarafında tepe noktasına nazaran daha azalmış basınç gerilmelerine mansap tarafında da bu değerlerin daha artmış basınç gerilmelerine sahip oldukları ve tepeden tabana kadar oransal olarak değişim gösterdikleri tesbit edilmiştir.

*Model IIA / S2-RD-ZS*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $2.52 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-6.142 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.2541m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum çekme değerine (çekme  $-40.29 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahipken B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-21.68 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 18.25 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 60.24 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $77.61 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

*Model IIA / S3-RD-ZS*

**Basınç;** membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $20.28 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-36.730 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 1.3374m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde çekme değerine (çekme  $-29.367 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-208.03 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 21.45 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 245.11 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $312.01 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

*Model IIIA / S0-RS-ZA*

**Basınç;** Dalga olmadığından su içinde kalan boru üzerinde hidrodinamik bir basınç/emme kuvvet etkisi görülmemekte buna karşın akıcı zemin tabakasında basınçlar görülmektedir. Taban kesitinde membada (A ) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $0.34 \text{ kN/m}^2$ ), maksimum emme ise C noktasında ( $-0.638 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise B ( $-0.07 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.0022 m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme (basınç  $19.496 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $19.698 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 20.142 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 20.586 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $21.071 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile memba tarafındaki A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen artarak tabandaki gerilmeleri doğurmuştur. Benzer biçimde mansap tarafındaki noktalar tepeden tabana doğru tedrici artmış ve mansaptaki E noktasında maksimum basınç değerine ( $21.071 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır.

*Model IVa / S1-RS-ZA*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $0,49 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-1.540 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de azaldığı görülmüştür. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.0376m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde (basınç  $11.59 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $13.59 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 20.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 25.90 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $30.18 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek tabanda azalmış bir basınç gerilmelerine buna mukabil mansap tarafında da bu değerlerin daha da artan basınç gerilmelerine sahip oldukları ve tepeden tabana kadar oransal olarak değişim gösterdikleri tesbit edilmiştir.

#### *Model IVA / S2-RS-ZA*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $2.52 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-6.142 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.2501m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerde çekme değerine ( çekme  $-39.66 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-21.33 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 17.96 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 59.29 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $76.39 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

#### *Model IVA / S3-RS-ZA*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $20.55 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-36.730 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 1.3766m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerde çekme değerine (çekme  $-285.57 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-202.29 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 20.86 \times 10^3 \text{ kN/m}^2/ 238.35 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $303.44 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.



*Model VA / S1-RD-ZA*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $0.49 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-1.540 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 0.0383 m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde (basınç  $11.81 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $13.86 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 21.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 26.42 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $30.78 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek tabandaki menba tarafında tepe noktasına nazaran daha azalmış basınç gerilmelerine mansap tarafında da bu değerlerin daha artmış basınç gerilmelerine sahip oldukları ve tepeden tabana kadar oransal olarak değişim gösterdikleri tesbit edilmiştir.

*Model VA / S2-RD-ZA*

**Basınç;** Dalga; membada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç A noktasında ( $2.52 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise C ( $-6.142 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40 m yükseklikte) 0.2564 m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde çekme değerine (çekme  $-40.64 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-21.86 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 18.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 60.75 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $78.28 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

### *Model VA / S3-RD-ZA*

**Basınç;** Dalga; menbada (A) basınç, diğer noktalarda (B, C, D ve E) emme biçiminde bir etkiye neden olmuştur. Maksimum basınç C noktasında ( $20.51 \text{ kN/m}^2$ ), minimum ise E ( $-36.900 \text{ kN/m}^2$ ) noktasındadır. Derinlik, tepeden tabana doğru azalırken noktalardaki basınç/emme değerlerinin de oransal olarak azaldığı görülmüştür. Sediment hareketi tabanda yoğunluluk artışı oluşturmuş ve basınç kuvvetini artırmıştır. **Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40m yükseklikte) 1.3787 m dir. **Gerilme;** Tepe kesitinde bütün noktalarda gerilme (basınç  $15.99 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sabittir. Tabanda ise membada (A) gerilme minimum değerinde çekme değerine ( çekme  $-294.12 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) sahip iken, B/C/D noktalarında tedricen değişerek basınç gerilmesine doğru ( $-208.35 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 21.49 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 / 245.49 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) mansapta E noktasında maksimum değerine ( $312.53 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Derinlik değişse bile A ve B noktalarında tepe noktasında basınç gerilmesi tedricen değişerek taban noktalarında çekme gerilmesine dönüşürken diğer noktalarda basınç gerilmesi tepeden tabana kadar oransal olarak artmaktadır.

## **10.2 Eksenel Yük Hariç Modellerin Değerlendirmesi**

### *Model IB / S1-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (40.0 m yükseklikte) 0.0369 m dir. **Gerilme;** Tabanda menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $5.05 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $3.15 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $3.83 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $8.47 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $12.51 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

### *Model IB / S2-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (40.0 m yükseklikte) 0.2623 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $55.30 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $30.83 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $1.81 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $41.02 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $59.73 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IB / S3-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 1.3886 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $292.55 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $219.98 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $4.84 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $220.79 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $294.54 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IIB / S1-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.0375 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $4.83 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $2.90 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $4.23 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $8.96 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $13.08 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IIB / S2-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.2689 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $56.28 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $39.40 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $2.26 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $42.44 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $61.62 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IIB / S3-RD-ZS*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 1.4321 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $300.85 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$  ve  $226.10 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $5.46 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $227.89 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ,  $303.85 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ ) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IIIB / S0-RS-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.0023 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise hem memba hem de mansap taraflarındaki bütün noktalarda (A/B/C/D/E) basınç gerilmesi vardır. Sırasıyla basınç gerilmeleri;  $3.506 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $3.708 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $4.152 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $4.596 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $5.081 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) olarak tesbit edilmiştir. Maksimum gerilme; E (basınç) noktasında ve minimum gerilme; A (basınç) noktasında ortaya çıkmıştır.

*Model IVB / S1-RS-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.0391 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $4.40 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $2.40 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $4.91 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $9.91 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $14.19 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IVB / S2-RS-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.2646 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $55.65 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $39.03 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $1.97 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $41.52 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $60.40 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

*Model IVB / S3-RS-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 1.3916 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $292.99 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $220.30 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $4.87 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $221.18 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $295.03 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

### *Model VB / S1-RD-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.0398 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $4.18 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $2.13 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $5.42 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $10.43 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $14.78 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

### *Model VB / S2-RD-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 0.2713 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $56.63 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $39.60 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $2.45 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $42.94 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $62.29 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

### *Model VB / S3-RD-ZA*

**Yer Değiştirme;** Maksimum yer değiştirme tepe noktasında (tabandan 40.0 m yükseklikte) 1.4339 m dir. **Gerilme;** Tabanda ise menba tarafında A ve B noktalarında çekme gerilmeleri ( $301.29 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup> ve  $226.42 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>), C orta ve D/E mansap tarafında basınç gerilmeleri ( $5.49 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $228.28 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>,  $304.35 \times 10^3$  kN/m<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Maksimum gerilmeler; E (basınç) ve A (çekme) noktalarında ortaya çıkmıştır.

### ***Eksenel Yüklü-Yük Hariç Modellerin Değerlendirilmesi***

**Hız:** Hem Model A'nın hem de Model B'nin alt modellerinde aynı kalmıştır. Hem Model A hem de Model B'nin alt modellerinde su seviyesindeki dalga hızları S1 dalga teorisine göre 0.268 m/sn, S2 dalga teorisine göre 1.74 m/sn ve S3 dalga teorisine göre 5.89 m/sn bulunmuştur.

**Basınç:** Hem Model A'nın hem de Model B'nin alt modellerinde aynı kalmıştır. Ancak RS ve RD alt modellerinde su seviyesinde dalga kökenli hidrodinamik basınçlarda değişiklikler meydana gelmemiştir. Hem sabit yoğunluklu hem değişken yoğunluklu modellerde; su seviyesinde ( $y=35.00$  m) kazığın C noktasında karşılaşılan S1 dalga teorisine göre vakum ( $1.54 \text{ kN/m}^2$ ), S2 dalga teorisine göre vakum ( $6.19 \text{ kN/m}^2$ ) ve S3 dalga teorisine göre vakum ( $36.90 \text{ kN/m}^2$ ) görülmektedir. Ancak tabanda ( $y=10.00$ m) de RS modelleri baz alındığında RD modellerinin S1 dalga teorisi uygulandığındaki C noktasındaki vakum %19, S2 dalga teorisi uygulandığında bu değer %26 ve S3 dalga teorisi uygulandığında ise bu değer %30 artmıştır.

**Yer Değiştirmeler:** hem Model A hem de Model B de dalga teorilerine göre kazığın tepe noktasında ( $y=40.00$  m) ortalama yer değiştirmeler;  $0.037$  m S1 dalga teorisinde,  $0.25$  m S2 dalga teorisinde ve  $1.35$  m S3 dalga teorisinde görülmüştür.

**Gerilmeler:** S1 dalga teorisinin uygulandığı Model A' nın tüm alt modellerinde; kazık etrafında A,B,C,D,E noktalarında basınç gerilmeleri, Model B' nin tüm alt modellerinde; kazık etrafındaki memba tarafının A ve B noktalarında çekme, C orta ve D,E mansap noktalarında basınç gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. S2 ve S3 dalga teorilerinin uygulandığı hem Model A ve hem Model B'nin tüm alt modellerde kazık etrafındaki memba tarafının A ve B noktalarında çekme, C orta ve D,E mansap noktalarında basınç gerilmeleri ortaya çıkmaktadır.

### ***Model A ve Model B Çoklu Regresyon Bağlılarının Değerlendirilmesi***

Model A ve Model B ana modelleri karşılaştırıldığında görülmüştür ki; *ikinci* merteye teorisine göre gerilme analizinin esas alındığı Model A da kazık eksenel basınç yük etkisiyle burkulmakta ve yanal dalga ve zemin yükü ile eğilme momentine maruz kalmaktadır. Model B ise yanal dalga ve zemin yükü etkisiyle eğilme momentine bağlı olarak yer değiştirme yapmaktadır. Her iki ana model kıyaslandığında; her alt model için geliştirilen çoklu regresyon bağıntılarındaki yer değiştirme katsayısı ve sabit sayı değişiklik göstermekte diğer basınç, hız ve konum katsayıları hemen hemen aynı değerler olarak tesbit edilmiştir.

## *Öneriler*

Modellerde dikkate alınan parçacık hızları, ivmeleri, sediment partikül özellikleri ve akıcı zemin özellikleri ait oldukları su ve tabaka kalınlıklarıyla değişmektedir. Dalganın, sedimentin ve akıcı zeminin fiziksel, kinematik ve dinamik özellikleri geniş ölçekli taranarak ortam farklılıklarının entegrasyonu ile rıhtım kazıklarının yer değiştirme, iç kuvvetler ve gerilme gibi yapısal değerleri farklı modeller üzerinde farklı teknikler kullanılarak daha farklı bağıntılarla tanımlanma yoluna gidilmesi mümkündür.

Model A ve Model B nin alt grupları ile birlikte değerlendirilmesinde çoklu regresyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen denklemlerin içeriğinde bulunan derinlik, basınç, hız ve yer değiştirmelere göre gerilmeler hesaplanmaktadır. Değerlendirmelerin daha anlamlı olması için genetik algoritma yönteminin kullanılmasının daha uygun sonuçlar vereceği önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Le-Mehaute, B., Introduction to Hydrodynamics and Water Waves, Vol.1-Fundamentals, Vol. 2- Water Wave Theories, Us Dept. of Commerce ESSA technical Report Erl, U.S. Government Printing Office, 1969, 118 s.
- [2]. Fan, K. and Gazates, G., Seismic Response of Single Piles and Pile Groups, *J.Geotech.Eng.*, 117, 1991, 1860-1879 s.
- [3]. Sadek M., Shahrour I., Three-dimensional Finite Element Analysis of The Seismic Behavior of Iclined Micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6) 2004, 473-485 s.
- [4]. Sadek M., Shahrour I., Influence of the Head and Tip Connection on the Seismic Performance of Micropiles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 2005, 461-468 s.
- [5]. Tamiş, O., Rıhtım Kazıklarının Statik ve Dinamik Analizi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Manisa, 2006, 137 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [6]. Cimen, O., Korkmaz, K.A., Keskin, S.N., Ay, Z., Carhoğlu, A.I., Farklı Zeminlerdeki Kazıkların Deprem Davranışının İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 25(1-2), 2009, 223-226 s.
- [7]. Şahin, E., Batık Jet Akımı Etkisinde Bir Kazık Etrafındaki Akım Alanının Hidrodinamiği, *Kıyı ve Liman Mühendisliği*, YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL, 2011.
- [8]. Ghoreishy, M.H.R., Nouri, M.R., A Three-dimensional Finite Element Analysis of a Power-law Fluid in an Extrusion Die, *Iranian Polymer Journal*, Volume 7, Number 4, 1998, pp.1026-1263
- [9]. Gedik, N., Kazıklı İskelelerde Dalga Kuvvetleri Ve Etkilerinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998, (Yüksek Lisans Tezi)
- [10]. Marn, J., Delic, M., Zunic, Z., Non-Newtonian Fluid Flow Analysis with Finite Difference and Finite Volume Numerical Models, *Applied Rheology* 11, 2, 2001, pp: 325-335. DOI: 10.1515/arh-2001-0019
- [11]. Dhiman, A. K., Chhabra, R. P., Eswaran, V., Steady Flow Of Pomer-Law Fluids Across A Square Cylinder, *Chemical Engineering Research and Design*, 2006, pp: 300-310. April 2006, doi: 10.1205/cherd05017
- [12]. Bharti, R.P. Chhabra, V. Eswaran, Steady forced convection heat transfer from a heated circular cylinder to power-law fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, 2007, pp: 977-990.
- [13]. Janela, J., Mouraa, A., Sequeira, A., A 3D non-Newtonian Fluid Structure Interaction Model for Blood Flow in Arteries I , *Journal of Computational and Applied Mathematics* ,234, 2010, pp: 2783-2791
- [14]. Mehmood, S., Nawaz M., and Ali, A., Finite Volume Solution of Non-Newtonian Casson Fluid Flow in A Square Cavity, *Communications in Mathematics and Applications*, Vol. 9, No. 3, pp. 459-474, 2018, DOI: 10.26713/cma.v9i3.795
- [15]. Azhdari, M., Riasi, A., Tazraei, P., Numerical Study of Non-Newtonian Effects on Fast Transient Flows in Helical Pipes, eprint arXiv:1703.06877, ARXIV, 2017.



- [16]. Haza, Z. F., The Drag Forces Exerted by Lahar Flows on a Cylindrical Pier: Case Study of Post Mount Merapi Eruptions, *Materials Science and Engineering*, 2018, doi:10.1088/1757-899X/316/1/012041
- [17]. Gücüyen, E., Dağlı, B.Y., Gökkuş, Ü., “Çelik Rıhtım Kazıklarının Dalga Yükleri Altında Dinamik Davranışının Modellenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, ISSN: 1305-1385, Cilt: 6, No: 2, 2010, pp. 161-170.
- [18]. Ordu, E., Ozkan, M. T., Kazıklı Temellerin Deprem Performanslarının Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, *İTÜ Dergisi*, Cilt:5(2), 2006, s. 27-34.
- [19]. Uzuoka R., Sento N., Kazama M., Zhang F., Yashima A., Oka F., Threedimensional Numerical Simulation Of Earthquake Damage To Group-Piles In A Liquefied Ground, 27, 2007, 395-413 s.
- [20]. Avcı,G., Kazıklı Temellere Etki eden Dinamik Yüklerin Statik Yükler Cinsinden Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi. Eskisehir, 2008, 256 s.
- [21]. Bozkurt, H., Suya Doygun Kil Zeminlerdeki Kazıklara Etki Eden Dinamik Yüklerin Statik Yükler Cinsinden Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ESKİŞEHİR. 2011, (Yüksek Lisans Tezi).
- [22]. Abebe, A. ve Smith, I. GN., *Pile Foundation Design: A Student Guide.*, 1999, <http://sbe.napier.ac.uk/projects/piledesign/guide/index.htm>.
- [23]. Kıyı Yapıları ve Limanlar Planlama ve Tasarım Teknik Esasları, T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Demiryolları, Limanlar, Havameydanları İnşaatları Genel Müdürlüğü, Yüksel Proje, Ankara, 2007
- [24]. Clough, R.W. ve Penzien, J., *Dynamics of Structures ( 2nd edition )*. Singapore: Mc Graw–Hill, Inc, 1993.
- [25]. Celep, Z ve Kumbasar N.,Yapı Dinamiği ( üçüncü baskı ). İstanbul Teknik Üniversitesi, Rehber Matbaacılık, İstanbul, 2001.
- [26]. Gücüyen, E, Gökkuş, Ü., Zemin Gömülmüş Tekil Rıhtım Kazıklarının Dinamik Davranışı, Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları 8. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, ISBN 978-605-88990-5-6, 2010. pp. 1323- 1334.
- [27]. Yiğit, M.E., Gücüyen, E., Gökkuş, Ü., Lineer Dalga Etkisindeki Açık Deniz Rüzgar Türbini Çelik Kolonunun Tek Serbestlik Dereceli Sisteme Göre Dinamik Analizi”, 3. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı, ISBN 978- 9944-89-775-4 2009, pp. 251-263.
- [28]. Prakash, S. ve Sharma, H.D., *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
- [29]. Karaturp, F., Kıyı Hidrodinamiğine İlişkin Dalga Denklemlerinin Çözümlemesinde Kısmi Diferansiyel Denklem Uygulamaları, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Manisa, 2007, 193 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [30]. Sarpkaya, T., Isaacson, M., *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981.
- [31]. Yamagoucci, M., Tsuchiya, Y., Relation Between Wave Characteristics of Cnoidal Wave Derived by Laitone and Chappellear, *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 24, , 1974, pp:214-231.
- [32]. Wilson, J. F., Muga, B. J., Reese, L. C., *Dynamics of Offshore Structures* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

- [33]. Wiegel, R. L., A Presentation of Cnoidal Wave Theory for Practical Application, *Jour. Fluid Mech.*, Vol 7, 1960, pp 273-286.
- [34]. Wiegel, R. L., *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1964.
- [35]. Russel, J. S., Report of the Committee on Waves, Meeting of the British Association for Advancement of Science, 1845.
- [36]. Wiegel, R. L., *Gravity Waves, Tables of Functions*, Univ. of Calif., Council on Wave Res., The Engr. Found., Berkeley, CA, 1954.
- [37]. Chakrabarti, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Springer Verlag, Berlin, 1987.
- [38]. Stokes G. G., *On The Theory of Oscillatory Waves*, *Mathematical Physics Papers*, Cambridge University Press, 1, 1980.
- [39]. Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü., “Irregular Wave Effects on Dynamic Behavior of Piles”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 38, Issue: 5, 2013, pp. 1047-1057.
- [40]. Gücüyen, E., Erdem, R.T., Şeker, S., Gökkuş, Ü., “Dynamic Analysis of a Singular Steel Pile due to Wave Loads”, 2 nd International Symposium on Computing in Science & Engineering Proceedings, pp. 735-741, June 1-4 2011, Kusadasi, Aydin, Turkey.
- [41]. Tsuchiya, Y., and Yasuda, T., A New Approach to Stokes Wave Theory, *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, vol: 31(1), 1980, pp: 17-34
- [42]. Morison, J. R., O'Brien. M. P., Johnson, J. W., and Scaaf, S. P., The Forces Exerted by Surface Waves on Piles," *Petroleum Trans., AIME*, Vol. 189, 1950, pp. 149-157.
- [43]. Quinn, A.DeF., *Design and Construction of Ports and Marine Structures ( 2nd edition )*, Mc Graw–Hill, Inc, New York, 1972
- [44]. McCamy, R., Fuchs, R., Wave forces on piles: a diffraction theory. Tech. Memo No. 69, U.S. Army Corps of Engrs, 1954.
- [45]. Kırca, V.Ş.Ö., *Dalga Kırılma Bölgesi Dışında Katı Madde Hareketi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Ders Notu, İstanbul, 2013,
- [46]. Einstein, H.A., The bed-load function for sediment transport in open channel flows. Technical Bulletin 26, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C., 1950
- [47]. Engelund, F., and Fredsoe. J., A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 1976, 293–306 s.
- [48]. Fredsoe J. and Deigaard, R., *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, volume 3 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, New Jersey, 1992.
- [49]. Wilson K.C. and Nnadi, F.N., Behaviour of mobile beds at high shear stress. In *Behaviour of mobile beds at high shear stress*. In *Proceedings of 22th ICCE*, volume 3, New York, ASCE, 1990, pages 25–36.
- [50]. Luque R.F. and Beek. R., Erosion and transport of bed load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 1976, 127–144 s.
- [51]. Meyer-Peter E., Müller, R., Formulas for bed load transport. In *rep. 2nd Meet. Int.. Assoc Hydraul. Struct. Res.*, Stokholm, 1948, pages 39–64
- [52]. Grant W.D. and Madsen. O.S., Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 469–481 s.
- [53]. Soulsby. R., *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford Pub., London, 1997.

- [54]. Soulsby R. L. and Damgaard, J. S., Bedload Sediment Transport in Coastal Waters, *Coastal Engineering*, 52, 2005, pp: 673–689.
- [55]. Sumer, B.M., Lecture Notes on Turbulence. DTU, Mechanical Engineering, Copenhagen. downloadable from, <http://www.external.mek.dtu.dk/personal/bms>. 2007.
- [56]. Nielsen, P., Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport, Series Paper No. 20, ISVA, Techn. Univ. Den., 1979.
- [57]. Nielsen, P., Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport. Advanced Series in Ocean Engineering. World Scientific, Singapore, 1992.
- [58]. Rijn, L.C., Sediment transport, part ii: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(11), 1984, pp:1613–1641.
- [59]. Wilson, K.C., Frictional behaviour of sheet flow. Progress Report 67, Institution of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1988.
- [60]. Amoudry, L.O., and Souza, A.J., Deterministic Coastal Morphological and Sediment Transport Modeling: A Review and Discussion, *Reviews of Geophysics*, 49, 2011, p: 1 of 21, DOI: 10.1029/2010RG000341
- [61]. Amoudry, L.A., Two-Phase Modeling Of Granular Sediment For Sheet Flows and Scour, Cornell University, 2008.
- [62]. Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F., Zeminlerde Sıvılaşma, Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi, Türkiye, 2006.
- [63]. Yağcı, B., BAÜ Müh-Mim Fak., Geoteknik Deprem Mühendisliği Dersi, Bölüm-7, 2013.
- [64]. Seed H.B., Idris, I.M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”, *J. Of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 97(9) , 1971, p:1249-1273.
- [65]. Seed HB, Martin PP. and Lysmer J., The generation and dissipation of pore water pressures during soil liquefaction” Rep.No. UCB/EERC 75-26. Earthquake Engineering Research Center, UC Berkeley, California, 1975.
- [66]. Seed H.B., Idris, I.M., Arango, I., Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.109, No.3, 1983, pp: 458-482.
- [67]. Poulos, S.J., Castro, G., and France, W., Liquefaction evaluation procedure". *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 11(6) 1985, pp: 772-792.
- [68]. Yoshimi, Y., Takiatsu, K., Hosoka, Y., Evaluation of Liquefaction Resistance of Dense Niigata Sand. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanisc and Foundation Engineering, Vol. 29, No.1, , 1989, pp: 93-104.
- [69]. Youd, T.L., Gilstrap, S.D., Liquefaction and Deformation of Silty and Fine-Grained Soils", *Proceeding pf the Second International Conference on Eartquake Geotechnical Engineering*, Vol.3, 1999, pages 1013-1020.
- [70]. Nguyen, Q.H., Nguyen, N.D, Incompressible Non-Newtonian Fluid Flows Continuum Mechanics, Progress in Fundamentals and Engineering Applications, chapter 3, DOI: 10.5772/26091, Edited by Yong X. Gan, Published by InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2012, 47-73 s.
- [71]. Balmforth, N.J., Provenzale, A., Geophysical Aspects of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Lecture Notes in Physics-Geomorphological Fluid Mechanics LNP 582, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001, pp. 34–51, DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-45670-8>

- [72]. Sawko, R., Mathematical and Computational Methods of non-Newtonian, Multiphase Flows School of Engineering, Cranfield University, 2012, (PhD Thesis)
- [73]. Málek, J., Introduction to non-Newtonian Fluid Mechanics, October, 2012, <http://ssdnm.mimuw.edu.pl/pliki/wyklady/skrypt-malek.pdf>,
- [74]. Chhabra R.P., Non-Newtonian Fluids: An Introduction. In: Krishnan J., Deshpande A., Kumar P. (eds) Rheology of Complex Fluids. Springer, <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6494-6-1>, New York, NY, 2010.
- [75]. Abaqus/CAE 6.10, [www.3ds.com](http://www.3ds.com), Dassault Systèmes, 2010.
- [76]. Abaqus Analysis User's Manual, Volume IV: Elements, "Viscosity," Section 26.1.4, [www.3ds.com](http://www.3ds.com), Dassault Systèmes, 2011, [http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf\\_books/ANALYSIS\\_4.pdf](http://130.149.89.49:2080/v6.11/pdf_books/ANALYSIS_4.pdf)
- [77]. Gücüyen, E., İç ve Dış Akış Etkisinde Deniz Deşarj Sistemlerinin Tasarımı, , Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa , 2013, 91 s. (Doktora Tezi).
- [78]. Search Continuum Mechanics Website; <https://www.continuummechanics.org/vonmisesstress.html>
- [79]. Von Mises, R., Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, 1913, pp. 582–592.
- [80]. Huber, M.T., Czasopismo Techniczne, Lemberg, Austria, Vol. 22, 1904, pp. 181.
- [81]. Carcione J.M., Polatto, F., Sound Velocity of Drilling Mud Saturated With Reservoir Gas, GEOPHYSICS, VOL. 65, NO. 2, Italy, 2000, p: 646-651, DOI: 10.1190/1.1444761
- [82]. Lee, S.HH, Huang, JH. Widjaja, B. and Chang, DW, The Phase Concept for Liquefaction in Both Sandy and Clayey Soils, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 16, No. 1, 2013, p: 15-22
- [83]. Widjaja, B. and Pratama, I.T., Determination Of The Viscosity Value Based On The Influence Of The Sliding Plane By Using A Flume Channel", International Journal of Technology, ISSN 2086-9614, 2015, p: 800-808

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muhammet Ensar YİĞİT

Doğum Yeri ve Yılı : Erzurum,1986

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ensar.yigit@cbu.edu.tr

### Eğitim Durumu

Lise : Erzurum Lisesi, 2003

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, 2007

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, 2010

### Mesleki Deneyim

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2011- (halen)

### -Yayınları