SERT KİLLERDE TEKRARLI DEPREM YÜKLERİ ALTINDA KAZIK-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ : P-Y EĞRİLERİ

Dr.Özgür Kuruoğlu [1], Atilla Horoz [2] ve Dr.Orhan Erol [3]

[1] *İnşaat Yük. Mühendisi, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara*
[2] *İnşaat Yük. Mühendisi, Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara*
[3] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: ozgurk@yukselproje.com.tr

ÖZET:

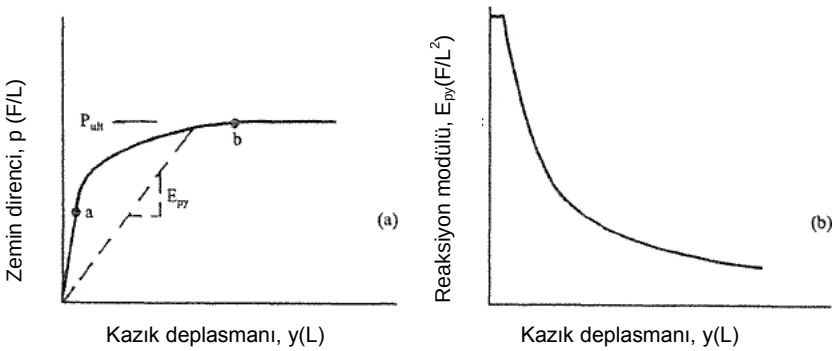
Kazıkların yanal yükler altında davranışlarının analizlerinde yanal yöndeki zemin rijitliği zemin deformasyon modülü veya yanal zemin yataklama modülü ile temsil edilmektedir. Kazık zemin etkileşiminin analizinde genellikle yanal zemin yataklama modülü kullanılmaktadır. Yanal zemin yataklama katsayısı değeri zeminde oluşan yatay gerilmenin kazığın yatay deplasmanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu parametre sabit bir değer olmayıp zeminin yanal taşıma gücü, derinlik, zemin cinsi, yükün statik veya tekrarlı olmasına ve yanal birim deformasyonunun mertebesine bağlı olarak değişik değerlerle temsil edilmektedir. Yanal yatak katsayısının derinlik, yanal gerilme ve taşıma gücü ve yanal deformasyon mertebesine bağlı olarak değişimi literatürde "p-y" eğrileri ile tanımlanan yarı ampirik grafiksel çözümlerle belirlenmektedir. Yanal yatak katsayısı değerleri özellikle sert killerde tekrarlı yükler altında önemli ölçüde azalmaktadır ve sert kilin içerisinde serbest suyun mevcudiyeti durumunda zemin yanal direnci çok küçük değerlere inmektedir. Bu bildiride sert killerde p-y eğrilerinin tanımlanması için önerilen yöntemler tartışılmaktadır. Sert killerde "p-y" eğrilerini oluşturma kriterleri, serbest suyun mevcut olması ve olmaması durumları, hem statik hemde tekrarlı yükler için ayrı ayrı verilmekte ve metodun uygulaması bir örnekle açıklanmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER : p-y eğrileri, reaksiyon modülü, sert kil, tekrarlı deprem yükü altında kazık-zemin etkileşimi

1. GİRİŞ

Kazıklı temellerin yanal yükler altında davranışını modelleyen en önemli parametre reaksiyon modülüdür ve bu modül kazık üzerinde herhangi bir noktada kuvvet cinsinden zemin direncinin kazığın o noktadaki deplasmanına oranıdır. Reaksiyon modülü zemin yüzeyinden olan derinliğe ve kazığın deplasmanına bağlı olarak değişim gösterir.

Yanal yük altında herhangi bir derinlikte tipik zemin direnci – kazık deplasmanı eğrisi Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu eğriler p – y eğrileri olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1(a)' da "b" noktası zeminin nihai yanal direncinine karşıt gelmektedir. Kazığın yanal yük altında davranışını yansıtan reaksiyon modülü E_{py} ise Şek.1(a) p-y eğrisine sekant olan doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır ve küçük kazık deplasmanlarında sabit bir değerdir. Ancak artan kazık deplasmanları ile E_{py} modülü değeri azalmaktadır. Bu davranış Şekil 1(b)'de gösterilmiştir. E_{py} değeri zemin özelliklerine bağlı olmakla birlikte sadece bir zemin parametresi olarak algılanmamalıdır. Hesaplamalarda kullanılan ve yanal yükler altında kazık-zemin ilişkisinin yansıtan bir parametredir. Uygulamada kazık boyunca her noktada E_{py} değerleri iteratif metodla değiştirilerek sonuçta kazık deplasmanı ile zemin yanal direnci arasındaki ilişki seçilmiş olan lineer olmayan p-y eğrisi ile uyumlu hale getirilir.

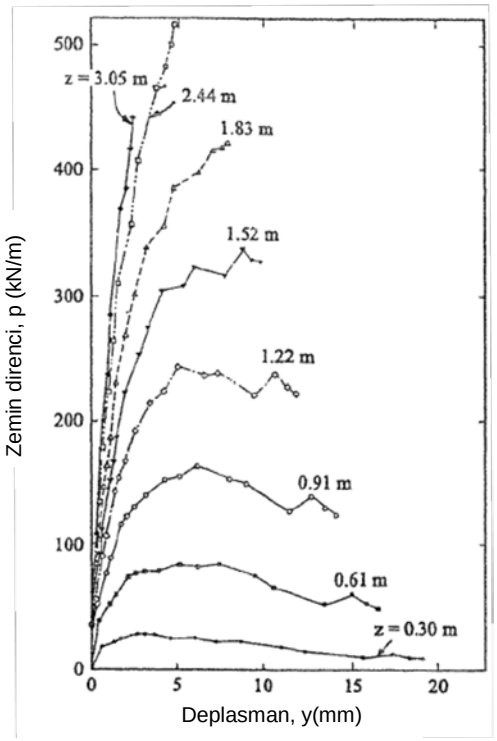


Şekil 1. Tipik p-y (a) ve reaksiyon modülü (b) eğrileri

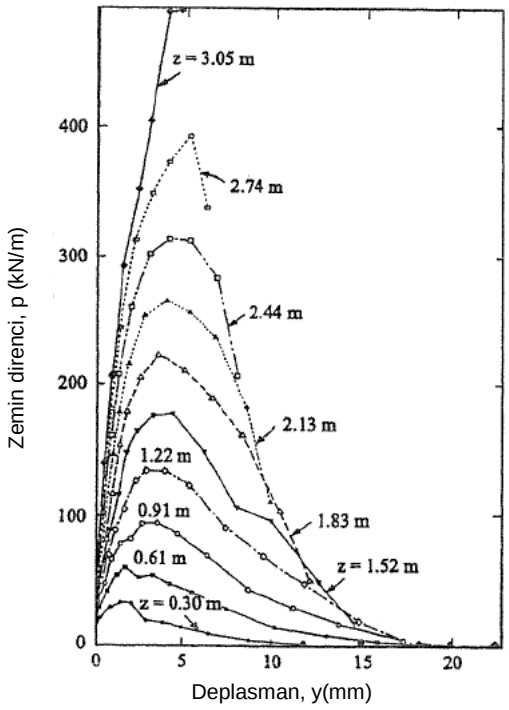
Tasarımda kullanılan p-y eğrileri deneysel verilerden türetilmiştir. Bu amaçla moment ve deplasmanların kazık boyunca ölçüldüğü kazık yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneysel veriler fonksiyonlara dönüştürülerek, gerekli türev ve integraller alınarak, uygulamada kullanılan p-y eğrileri türetilmiştir. Daha sonra bu eğrilerin karakteristik özellikleri zemin özellikleri ile korele edilmiştir ve değişik zemin türleri için, örneğin ıslak kumlar, yumuşak killer, su altında veya kuru sert killer gibi, hem statik hem de tekrarlı deprem yükleri altında zemin-kazık etkileşimlerinin modellenmesinde kullanılabilen p-y eğrileri önerilmiştir.

Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi statik yükleme koşullarında artan kazık deplasmanları ile zemin direnci artmakta ve nihai bir değere ulaşmaktadır. Bu davranış Şekil 2'de gösterilen deneysel verilerle de uyumludur. Ancak tekrarlı deprem yüklemesi koşullarında artan kazık deplasmanları ile zemin yanal direnci önce bir pik değere ulaşmakta, daha sonra ise dramatik bir şekilde azalarak zemin yanal direncini tamamiyle yitirmektedir. Bu davranış Şekil 3'de gösterilmektedir. Literatürde su tablası altında ve üzerinde kum zeminler ile yumuşak doygun killer için verilen p-y eğrileri oldukça kabül görmüş ve oturmuş metodlardır. Ancak sert killer için p-y davranış modeli ile ilgili araştırmalara ve ilave deneysel verilere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tebliğde Welch ve Reese (1972) ve Reese v.d. (1975) tarafından susuz ve su altındaki sert killer için önerilen p-y eğrileri sunulmakta ve statik yükleme ile tekrarlı deprem yükleri altındaki zemin direnci-kazık deplasmanı ilişkileri tartışılmaktadır.



Şekil 2. Örnek bir statik yükleme deneyi sonucu elde edilen p-y eğrileri



Şekil 3. Örnek bir tekrarlı yükleme deneyi sonucu elde edilen p-y eğrileri

2. SU ALTINDAKİ SERT KİLLER İÇİN P-Y EĞRİLERİNİN OLUŞTURULMASI

Aşağıda, Reese v.d. (1975) tarafından su altındaki sert killerin statik yükleme ve tekrarlı deprem yükleri altındaki yanal davranışlarını modellemek amacıyla geliştirilen p-y eğrisi oluşturma prosedürü detayları özetlenecektir.

2.1. Statik Yükleme Altında Su Altındaki Sert Killer İçin p-y Eğrisinin Oluşturulması

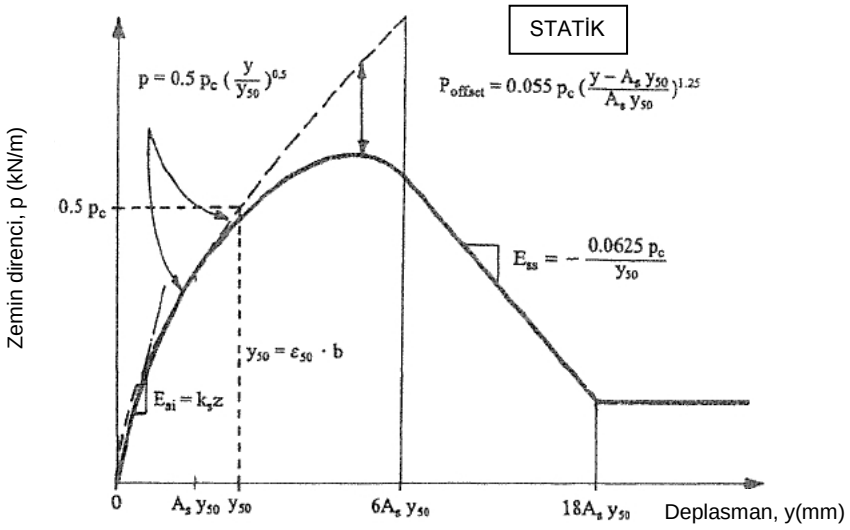
Reese v.d. (1975) tarafından statik yükleme altında su altındaki sert killer için önerilen karakteristik p-y eğrisi Şekil 4'de gösterilmektedir. Eğrinin oluşturulması için gerekli prosedür aşağıda açıklanmıştır.

1) Zeminin drenajsız kesme dayanımı, c_u, ve efektif birim hacim ağırlığı, γ', ile kazık çapı, b, değerleri tespit edilir.
2) z derinliği boyunca zeminin ortalama drenajsız kesme dayanımı, c_a, değeri hesaplanır.
3) Kazığın birim genişliği boyunca nihai zemin direnci değeri aşağıdaki denklemlerden küçük değer vereni kullanılarak hesaplanır.

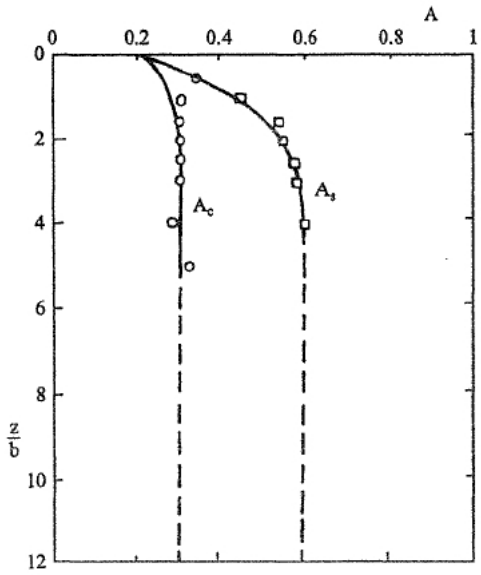
$$p_{ct} = 2c_a b + \gamma' bz + 2.83 c_a z \quad (1)$$

$$p_{cd} = 11 c_u b \quad (2)$$

4) Şekil 5 kullanılarak uygun A_s değeri seçilir.



Şekil 4. Statik yükleme altında su altındaki sert killer için Reese v.d. (1975) tarafından önerilen karakteristik p-y eğrisi



Şekil 5. A_s ve A_c sabitlerinin değerleri

5) p-y eğrisinin ilk lineer kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = (k_s z)y \tag{3}$$

Uygun k_s değeri Tablo 1'den alınabilir.

6) Aşağıdaki denklem hesaplanır.

$$y_{50} = \varepsilon_{50} b \tag{4}$$

Uygun ε_{50} değeri laboratuvar deney sonuçlarından veya laboratuvar deneyleri mevcut değilse Tablo 2'den belirlenir.

Tablo 1. Aşırı konsolide killer için temsili k_{py} değerleri

Ortalama drenajsız kayma dayanımı (kPa)	50 - 100	100-200	300-400
k_{pys} (statik) MN/m^3	135	270	540
k_{pyc} (tekrarlı) MN/m^3	55	110	540

*Ortalama drenajsız kayma dayanımı değeri 5 kazık çapı derinliğe kadar olan zeminin kayma dayanımı değerleri kullanılarak hesaplanmalıdır. Bu değer konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli basınç deneyindeki toplam maksimum asal gerilme farkının yarısı olarak tariflenmelidir.

Tablo 2. Aşırı konsolide killer için temsili ε_{50} değerleri

Ortalama drenajsız kayma dayanımı (kPa)	50 - 100	100-200	300-400
ε_{50}	0.007	0.005	0.004

7) p-y eğrisinin ilk parabolik kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.5 p_c \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{0.5} \tag{5}$$

p_c değeri Denklem 1 veya Denklem 2 kullanılarak hesaplanır. Denklem 5, p-y eğrisinin Denklem 3 ile kesişim noktasından, y değerinin $A_s y_{50}$ değerine eşit olduğu noktaya kadarki kısmını tarif eder.

8) p-y eğrisinin ikinci parabolik kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.5 p_c \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{0.5} - 0.055 p_c \left(\frac{y - A_s y_{50}}{A_s y_{50}}\right)^{1.25} \tag{6}$$

Denklem 6, p-y eğrisinin, y değerinin $A_s y_{50}$ değeri ile $6A_s y_{50}$ değeri aralığında değiştiği kısmını tarif eder. (Madde 10'daki nota bakınız)

9) p-y eğrisinin ikinci lineer kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.5 p_c (6A_s)^{0.5} - 0.411 p_c - \frac{0.0625}{y_{50}} p_c (y - 6A_s y_{50}) \tag{7}$$

Denklem 7, p-y eğrisinin, y değerinin $6A_s y_{50}$ değeri ile $18A_s y_{50}$ değeri aralığında değiştiği kısmını tarif eder. (Madde 10'daki nota bakınız)

10) p-y eğrisinin son lineer kısmı aşağıdaki denklemler kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.5 p_c (6A_s)^{0.5} - 0.411 p_c - 0.75 p_c A_s \tag{8}$$

veya

$$p = p_c \left(1.225\sqrt{A_s} - 0.75 A_s - 0.411\right) \tag{9}$$

Denklem 8, p-y eğrisinin, y değerinin $18A_s y_{50}$ değerinden büyük olduğu kısmını tarif eder. (Aşağıdaki nota bakınız)

Not : Yukarıdaki prosedür anlatımı ve Şekil 4, Denklem 3 ve Denklem 5 arasında bir kesişim varmış gibi hazırlanmıştır. Ancak, gerçekte Denklem 3 ile p-y eğrisini oluşturan diğer denklemler arasında hiç kesişim olmayabilir. Denklem 3, p-y eğrisini diğer denklemlerden birisi ile kesişene kadar veya böyle bir kesişim yoksa sonuna kadar tarifler.

2.2. Tekrarlı Deprem Yüklemesi Altında Su Altındaki Sert Killer İçin p-y Eğrisinin Oluşturulması

Reese v.d. (1975) tarafından tekrarlı deprem yüklemesi altında su altındaki sert killer için önerilen karakteristik p-y eğrisi Şekil 6'da gösterilmektedir. Eğrinin oluşturulması için gerekli prosedür aşağıda açıklanmıştır.

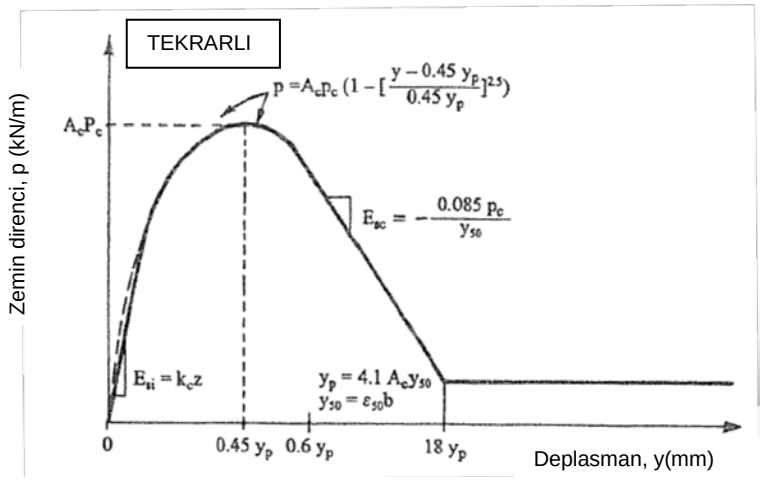
1) Prosedürün 1.,2.,3.,5. ve 6.adımları Bölüm 2.1'de statik yükleme durumu için anlatılan prosedürdekilerin aynısıdır.
4) Şekil 5 kullanılarak uygun A_c değeri seçilir. Aşağıdaki denklem hesaplanır.

$$y_p = 4.1 A_s y_{50} \tag{10}$$

7) p-y eğrisinin parabolik kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = A_c p_c \left[1 - \left[\frac{y - 0.45 y_p}{0.45 y_p}\right]^{2.5}\right] \tag{11}$$

Denklem 11, p-y eğrisinin Denklem 3 ile kesişim noktasından, y değerinin $0.6y_p$ değerine eşit olduğu noktaya kadarki kısmını tarif eder. (Madde 9'daki nota bakınız)



Şekil 6. Tekrarlı deprem yüklemesi altında su altındaki sert killer için Reese v.d. (1975) tarafından önerilen karakteristik p-y eğrisi

8) p-y eğrisinin bundan sonraki lineer kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.936 A_c p_c - \frac{0.085}{y_{50}} p_c (y - 0.6 y_p) \tag{12}$$

Denklem 12, p-y eğrisinin, y değerinin $0.6y_p$ değeri ile $1.8y_p$ değeri aralığında değiştiği kısmını tarif eder. (Madde 9'daki nota bakınız)

9) p-y eğrisinin son lineer kısmı aşağıdaki denklem kullanılarak oluşturulur.

$$p = 0.936A_c p_c - \frac{0.102}{y_{50}} p_c y_p \tag{13}$$

Denklem 13, p-y eğrisinin, y değerinin $1.8y_p$ değerinden büyük olduğu kısmını tarif eder. (Aşağıdaki nota bakınız)

Not : Yukarıdaki prosedür anlatımı ve Şekil 6, Denklem 3 ve Denklem 11 arasında bir kesişim varmış gibi hazırlanmıştır. Ancak, gerçekte Denklem 3 ile p-y eğrisini oluşturan diğer denklemler arasında hiç kesişim olmayabilir. Eğer kesişim yoksa herhangi bir y değeri için en küçük p değerini veren denklem kullanılmalıdır.

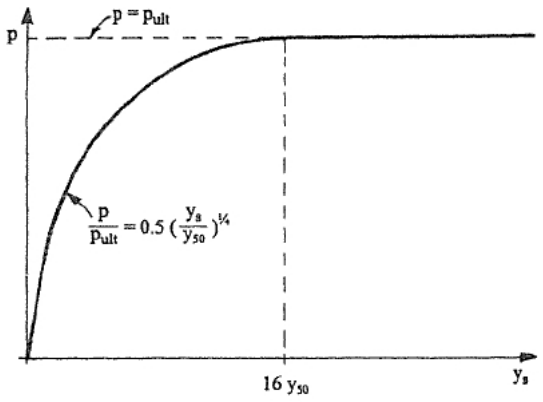
3. SUSUZ ORTAMDAKİ SERT KİLLER İÇİN P-Y EĞRİLERİNİN OLUŞTURULMASI

Aşağıda, Welch ve Reese (1972) tarafından susuz ortamdaki sert killerin statik yükleme ve tekrarlı deprem yükleri altındaki yanal davranışlarını modellemek amacıyla geliştirilen p-y eğrisi oluşturma prosedürü detayları özetlenecektir.

3.1. Statik Yükleme Altında Susuz Ortamdaki Sert Killer İçin p-y Eğrisinin Oluşturulması

Welch ve Reese (1972) tarafından statik yükleme altında susuz ortamdaki sert killer için önerilen karakteristik p-y eğrisi Şekil 7'de gösterilmektedir. Eğrinin oluşturulması için gerekli prosedür aşağıda açıklanmıştır.

1) Zeminin drenajsız kesme dayanımı, c_u, ve efektif birim hacim ağırlığı, γ', ile kazık çapı, b, değerleri tespit edilir. Aynı zamanda eğer üç eksenli basınç deney verisi var ise gerilme birim deformasyon eğrisinden ε_{50} değeri elde edilir. Deney verisi olmaması durumunda ε_{50} değeri Tablo 3.5 de verildiği gibi 0.010 veya 0.005 olarak alınır. Büyük değer konservatif yaklaşımlarda kullanılmaktadır.



Şekil 7. Statik yükleme altında susuz ortamdaki sert killer için Welch ve Reese (1972) tarafından önerilen karakteristik p-y eğrisi

Tablo 3.5.Aşırı konsolide killer için temsili ε_{50} değerleri

Ortalama drenajsız kayma dayanımı (kPa)	50 - 100	100-200	300-400
ε_{50}	0.007	0.005	0.004

2) Kazığın birim genişliği boyunca nihai zemin direnci değeri aşağıdaki denklemlerden küçük değer vereni Bu denklemlerde kayma dayanımı zemin yüzeyi ile dikkate alınan derinlik arasındaki ortalama bir dayanım olarak alınır, ve J değeri 0.5 dir. Zemin birim ağırlığı yeraltı suyu seviyesini yansıtacak şekilde alınmalıdır.

$$p_{ult} = \left[3 + \frac{\gamma'}{c_u} z + \frac{J}{b} z\right] c_u b \tag{14}$$

$$p_{ult} = 9 c_u b \tag{15}$$

3) Nihai zemin direncinin yarısındaki deplasman değeri, y_{50}, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır. :

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} b \tag{16}$$

4) p-y eğrisini tanımlayan noktalar aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{0.25} \tag{17}$$

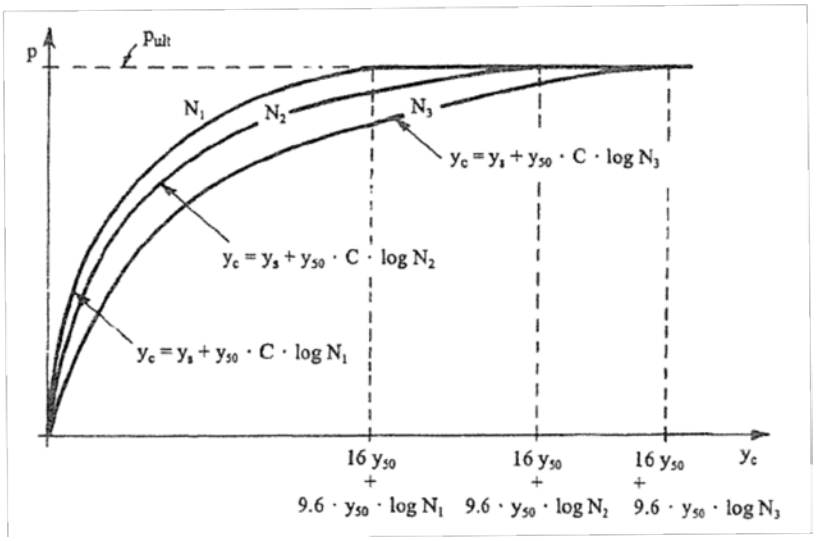
5) $y = 16\ y_{50}$ den daha büyük deplasmanlarda zemin direnci nihai dirence eşit alınır ($p = p_{ult}$)

3.2. Tekrarlı Deprem Yüklemesi Altında Susuz Ortamdaki Sert Killer İçin p-y Eğrisinin Oluşturulması

Welch ve Reese (1972) tarafından tekrarlı deprem yüklemesi altında susuz ortamdaki sert killer için önerilen karakteristik p-y eğrisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Eğrinin oluşturulması için gerekli prosedür aşağıda açıklanmıştır.

1) Bölüm 3.1 de açıklandığı şekilde p-y eğrisi tanımlanır.
2) Deprem tasarım yükünün kazığa etkime tekrar sayısı belirlenir.
3) p/p_{ult} oranının değişik değerleri için tekrarlı yüklerin deformasyona olan etkisini yansıtan "C" parametresi laboratuvar deney verileri kullanılarak belirlenir. Laboratuvar deney verisi olmadığı durumlarda "C" parametresi aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır.

$$C = 9.6 \left(\frac{p}{p_{ult}}\right)^4 \tag{18}$$



Şekil 8. Tekrarlı yükleme altında susuz ortamdaki sert killer için Welch ve Reese (1972) tarafından önerilen karakteristik p-y eğrisi

4) Üçüncü adımda seçilen p/p_{ult} değerine karşıt gelen p değerleri için aşağıdaki bağıntı kullanılarak tekrarlı yükler altındaki y deplasmanları hesaplanır.

$$y_c = y_s + y_{50} C \log N \tag{19}$$

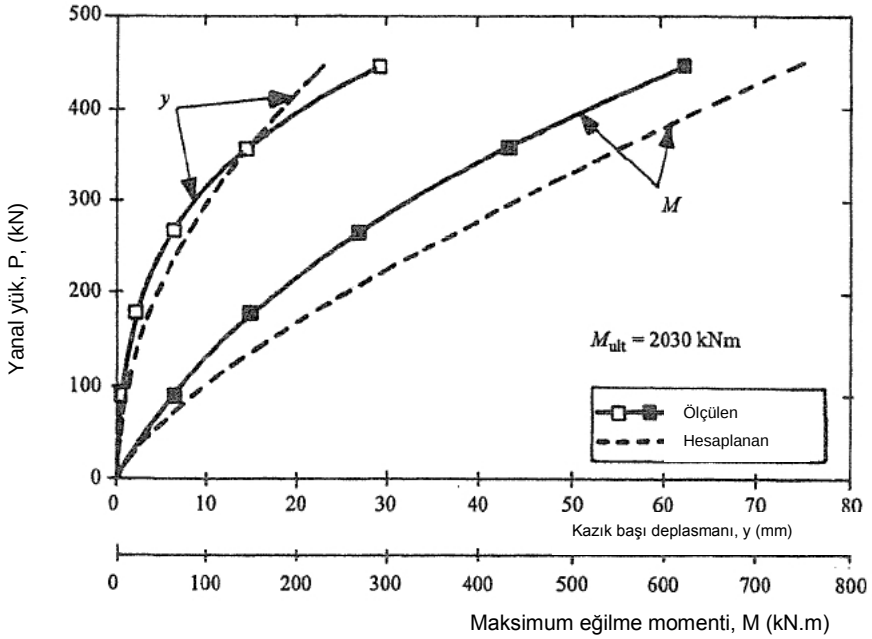
Burada; y_c = N tekrar sayısına karşıt gelen deplasman, y_s = statik yükleme durumundaki deplasman ve y_{50} = statik p-y eğrisindeki nihai direncin yarısına karşıt gelen direnç için tanımlanmış deplasmandır.

5) Şekil 8'deki p-y eğrileri zeminin yükleme tekrar sayısı N olan durum için zemin davranışını yansıtacaktır.

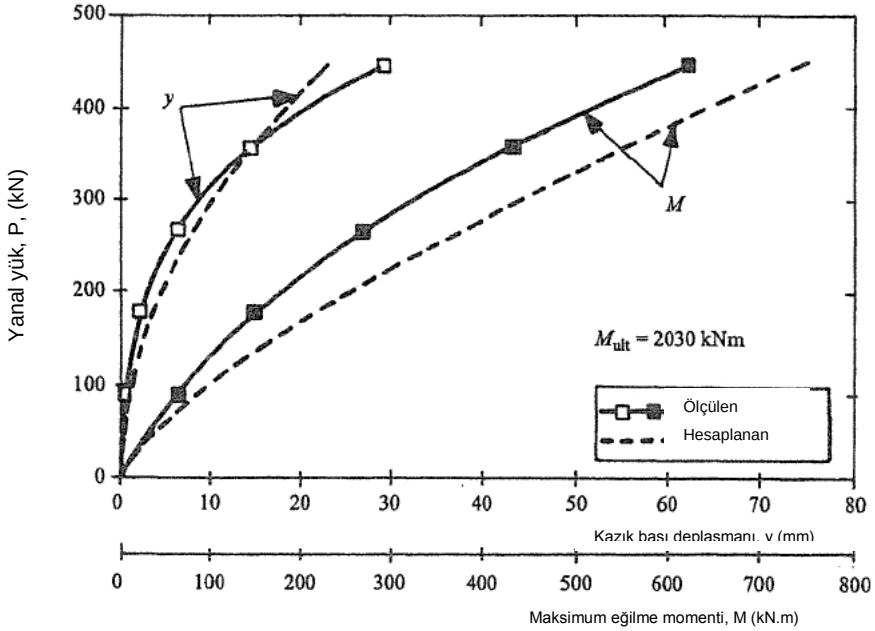
4. METOTLARIN GEÇERLİLİĞİ

Literatürde önerilen p-y eğrileri kullanılarak yapılan analizler deneysel bulgularla karşılaştırılarak metotların geçerliliği tartışılmaktadır. Bu konuda bir çok çalışma vardır. Bu bölümde bu çalışmalardan tipik örnekler sunulmaktadır.

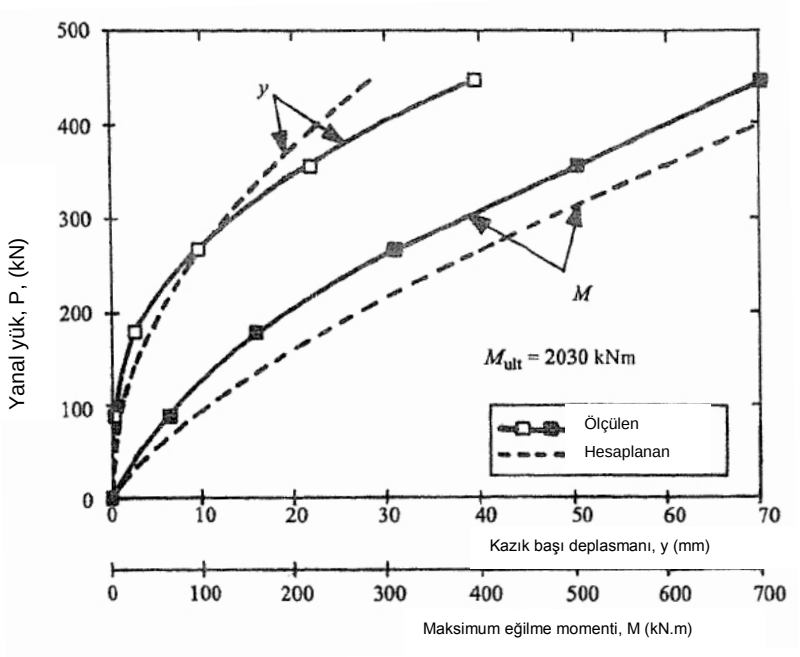
Reese ve Welch (1975) 0.762m çapında ve 12.8m uzunluğunda enstrumente edilmiş bir fore kazığın yanal yük altında davranışını gözlemlemişlerdir. Deney Teksas Karayolları adına Houstonda gerçekleştirilmiştir. Zemin profili aşırı konsolide sert killerden oluşmaktadır ve zemin içerisinde serbest su bulunmamaktadır.Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de p-y eğrileri (Şekil 7 ve Şekil 8) kullanılarak yapılan tahminler kazığın davranışı ile kıyaslanmıştır. Şekil 11'de rapor edilen deney sonuçlarında tekrarlı yük tatbik sayısı N=20 dir. Deney sonuçları incelendiğinde hem deprem hem de statik yükleme durumunda ölçülen yüzey deplasmanları ile p-y eğrileri kullanılarak hesaplanan deplasmanların biribirleri ile uyumlu olduğu, ancak hesaplanan moment değerlerinin bir miktar güvenli tarafta kaldığı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 9. Enstrumente edilmiş bir kazıkta ölçülen ve hesaplanan maksimum eğilme momenti ve kazık başı deplasmanlarının karşılaştırılması, statik yükleme durumu, Houston

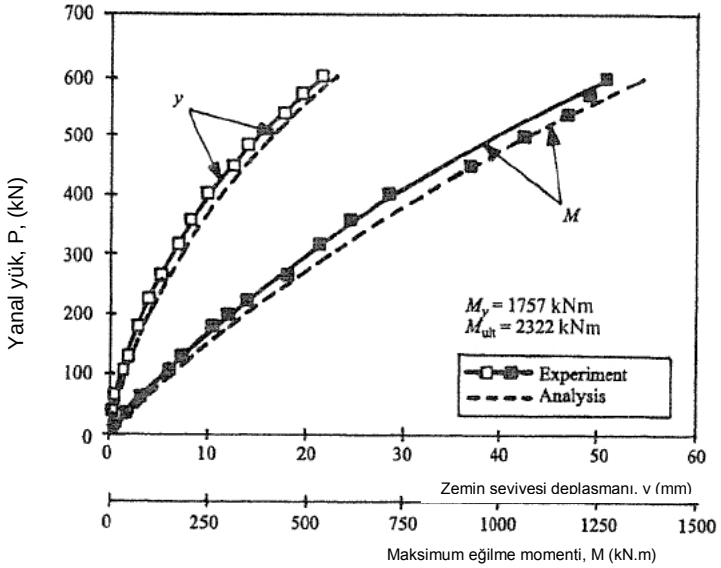


Şekil 10. Enstrumente edilmiş bir kazıkta Pt = 445kN yanal yük altında derinlikle eğilme momenti eğrisinin karşılaştırılması, statik yükleme durumu, Houston

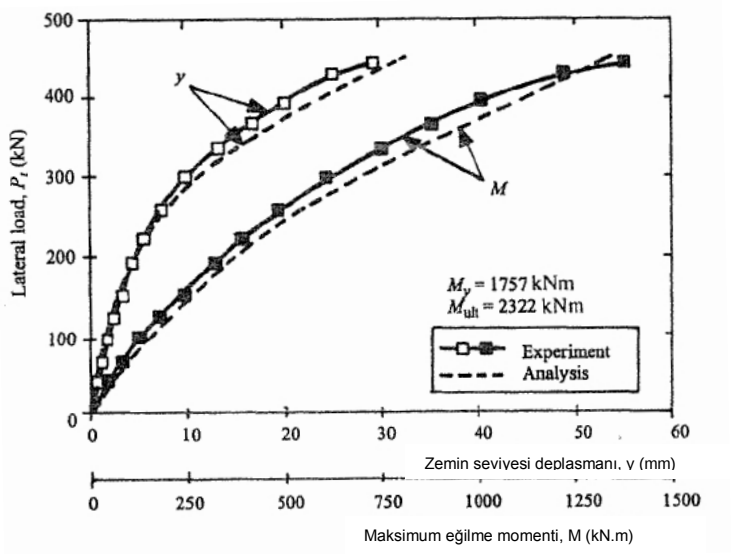


Şekil 11. Enstrumente edilmiş bir kazıkta ölçülen ve hesaplanan maksimum eğilme momenti ve kazık başı deplasmanlarının karşılaştırılması, tekrarlı yükleme durumu, Houston

Reese v.d. (1975) Teksas, Manor kentinde iki adet çelik boru kazık üzerinde yapılan yatay yükleme deney sonuçlarını rapor etmektedir. Kazık çapları 0.65m boyları ise 15.2m dir.Zemin aşırı konsolide kil olup yer altı suyu seviyesi altındadır. Birinci kazığa tedrici olarak arttırılan statik yük tatbik edilmiştir. İkinci kazığa ise tekrarlı yükler etki ettirilmiştir. İkinci deneyde her sabit tutulan yük kademesinde deplasmanlar stabil hale gelinceye kadar yük tekrarlanmıştır, sonra ikinci yük kademesine geçilmiştir. Hesaplanan ve aletsel gözlemlerle tespit edilen değerlerin kıyaslaması Şekil 12 ve Şekil 13'de gösterilmektedir. Deney verileri ile p-y eğrileri ile yapılan analitik çözumlerin kıyaslaması yapıldığında tahmin yöntemleri ile kazığın gerçek davranışının son derece uyumlu olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 12. Enstrumente edilmiş bir kazıkta ölçülen ve hesaplanan maksimum eğilme momenti ve deplasmanlarının karşılaştırılması, statik yükleme durumu, Manor



Şekil 13. Enstrumente edilmiş bir kazıkta ölçülen ve hesaplanan maksimum eğilme momenti ve deplasmanlarının karşılaştırılması, tekrarlı yükleme durumu, Manor

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Sert killerde yanal yüklenmiş kazıkların statik durumda ve tekrarlı deprem yükleri altında davranışı literatürde önerilen p-y eğrileri kullanılarak iteratif çözüm yöntemleri ile hesaplanabilmektedir.

Sert killerde kilin su seviyesi altında veya üzerinde (susuz durum) olmasına bağlı olarak davranış oldukça farklı olabilmektedir. Sert kilin serbest su içermesi durumunda tekrarlı yükler altında kilin yanal yüklere direnci büyük oranda azalmakta hatta tamamen yok olabilmektedir.

Sert killerde gerek sulu ortam, gerekse susuz ortamda yapılan kazık yatay yükleme deney sonuçları ile p-y eğrileri ile tahmin olunan kazık davranışının odukça uyumlu olduğu rapor edilmektedir.

6. REFERANSLAR

Reese, L.C., Cox, W.R. ve Koop, F.D. (1975). Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. *Proceedings of the VII Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas,* 2(OTC 2312), 672-690.

Reese, L.C. ve Welch, R.C. (1975). Lateral loading of deep foundations in stiff clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Houston,* ASCE 10 (GT7): 633-649.

Welch, R.C. ve Reese, L.C. (1972). Laterally loaded behavior of drilled shafts. Research Report 3-5-65-89, Center for Highway Research. University of Texas, Austin.