

KÖPRÜLERİN EKONOMİK TASARIMINDA TEMEL ZEMİNİ GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNİN ÖNEMİ ve BİR VAKA ÖRNEĞİ

Uğur Şafak ÇAVUŞ

SDÜ Teknoloji Fak. İnşaat Müh. Böl. E-12 Blk. Batı Kampüsü – Isparta/Türkiye
Tel: 246 211 1430 E-mail: ugurcavus@sdu.edu.tr

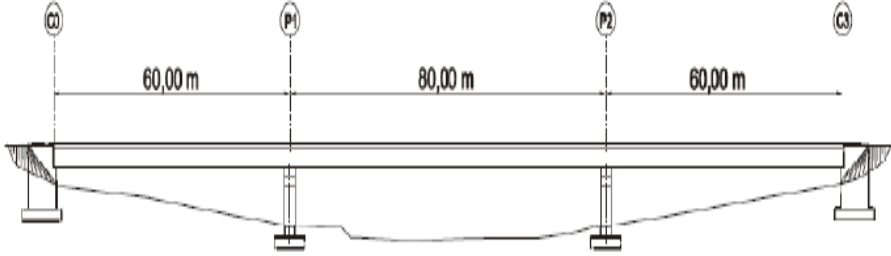
Özet

Köprü tasarımında güvenli tasarım kadar köprülerin ekonomik olması çok önemlidir. Ekonomik ama aynı zamanda yeterince güvenli bir köprü tasarımı güzel bir optimizasyon problemidir. Yani tasarım optimum olmalıdır. Ne kadar güvenlik veya nereye kadar ekonomi olması gerektiği projelerin büyüklüğüne, uygulama yerine ve kullanım amacına bağlıdır. Bir köprünün taşıyıcı tabliye ve kirişleri kadar, köprüyü taşıyan ayakları ve bu ayakların doğru tasarımı çok önemlidir. Köprü ayaklarının tasarımında üst yapıdan yani köprü mesnetlerinden aktarılan yükler ve ayakların oturduğu zemin şartları etkindir. Zemin şartları ve taşıma gücü değerleri, ayakların ve bunların temellerinin boyutlarına ve dolayısıyla köprünün emniyeti ile maliyetine doğrudan etki etmektedir.

İşte bu çalışmada, farklı zemin özelliklerine bağlı olarak, köprü ayaklarının tasarımında nelere dikkat edilmesi gerektiği, taşıma gücü değerlerinin nasıl değerlendirileceği, kabul edilebilir oturmaların ne olması gerektiği ve temel zemini ıslah metotları özetlenmiştir. Ayrıca Afyonkarahisar da Akarçay üzerinde yapılan 25 m uzunluğundaki bir köprünün ayaklarının ekonomik tasarımı ve zemin taşıma gücü değerlerinin doğru olarak değerlendirilmesinin proje maliyeti üzerindeki tasarrufu bir örnek olarak tartışılmıştır.

Giriş

Köprü ayakları ve temelleri (Şekil 1), bir köprünün bütün ağırlığını ve düşey trafik yüklerini taşıdıkları gibi rüzgar, deprem ve fren yükleri gibi yatay kuvvetlere de maruzdurlar. Bu nedenlerle köprü ayaklarının ve temellerinin tasarımı kritik olup dikkatli mühendislik çalışmalarını gerektirmektedir. Ayrıca, köprü ayakları her zaman temel kayası üzerine oturtulamamakta özellikle akarsu yatakları üzerine yapıldıklarında, akarsu yatağının jeolojik tarihçesi boyunca taşıdığı çok çeşitli zemin depositleri ve alüvyon temeller üzerine yerleştirmek zorunda kalmaktadırlar.



Şekil 1. Kenar, orta ayak ve tabliyesi ile bir köprü tip boy kesiti (Frank and Bouassida, 2010)

Alüvyon tabakası, eğer gevşek kum ve silt gibi suya doymuş malzemelerden oluşuyorlar ise yeraltı su seviyesi yüksek olan bölgelerde deprem sarsıntılarında sıvılaşma riski taşırlar. Killi zeminler ise uzun süren konsolidasyon oturmalarına maruzdurlar. Gevşek yumuşak zeminlerde ayrıca taşıma güçleri yeterli olmadığından köprü temellerinin maliyetlerinde artışa sebep veren ilave temel iyileştirme tedbirlerinin alınması zorunlu olmaktadır. Bazı pit gibi organik zeminlerin olduğu yerlerde ise primer ve sekonder konsolidasyon oturmalarının ötesinde daha ileri oturmalar olduğu gibi ayrıca taşıma gücü değerlerini yükseltmek için bu tür zeminlerde de mutlaka zemin iyileştirmesine gidilmek zorunluluğu vardır. Temellerin tasarımında öncelikle üst yapı yüklerinin dikkatlice analiz edilerek belirlenmesi sonra zemin koşullarının arazi ve laboratuvar testleri ile belirlenmesi bundan sonra temel zemini şartlarına bağlı olarak temel tipine karar verilmesi ve temelin statik ve dinamik stabilite, taşıma gücü ve oturma analizlerinin birlikte yapılarak boyutlandırmaya geçilmesi gereklidir.

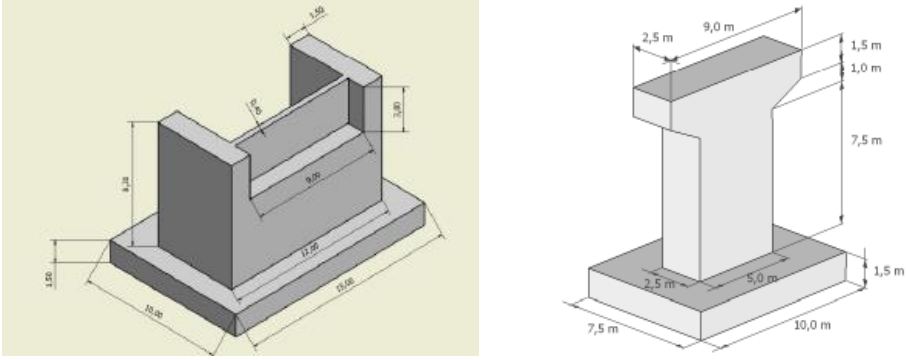
Köprü Temelleri

Köprü ayaklarının temelleri genellikle şu iki kısma ayrılır:

- Yüzeysel tekil temeller (Şekil 2)
- Derin temeller

Derin temeller daha ziyade gevşek üst zemine köprü yüklerini taşıtmayarak daha derinde yer alan sağlam zemine veya ana temel kayasına yükleri taşıtan kazıklı temellerdir. Bunlarda iki kısımda değerlendirilir:

- Çakma kazık temeller (Şekil 3a)
- Fore kazık temeller (Şekil 3b)



Şekil 2. Köprü ayakları ve yüzeysel temelleri (Frank and Bouassida, 2010)



(a)

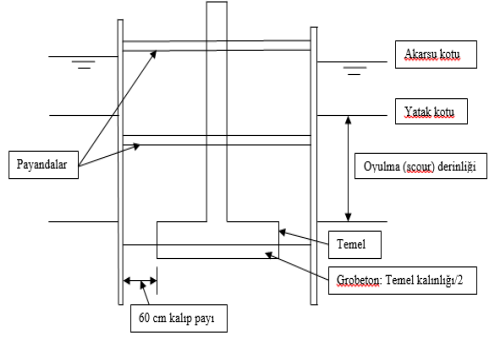
(b)

Şekil 3. a) Çakma kazıklı köprü temeli b) Fore kazık köprü temeli
(Oregon Department of Transportation, 2014)

Köprü temeli kazısı iki şart altında gerçekleştirilir:

- Yeraltı su seviyesi sığ olan yerlerde, su altında
- Yeraltı su seviyesi derin olan yerlerde kuruda

Su altında yapılan kazılarda kullanılan yöntemler, daha ziyade pompaj ile suyun kazı çukurundan dışarı atılması ve uzaklaştırılmasıdır. Diğer bir yöntemde, palplanş çakılması ile kazı çukuru etrafı çevrilir. Böylece sızan sular, kazı çukuruna kazı çeperlerinden girmesine mani olunur. Tabandan da suyun sızma boyu, palplanş uygun bir derinliğe kadar çakılarak uzatıldığından suyun daha az sızmasını temin edilir ve tabandan sızan azaltılan su miktarı pompajla dışarı atılır (Şekil 4). Palplanş batardo derinliği akarsuyun yatak taban kotu altında hidrolik olarak hesaplanan oyulma (scour) derinliğinin daha da altına incek şekilde belirlenmelidir.



Şekil 4. Palpaş batardo teşkili ile köprü temeli kazı çukurunun korunması
(Oregon Department of Transportation-ODOT, 2014)

Köprü Temellerinin Tasarımında Dikkat Edilmesi Gereken Başlıca Esaslar

Köprü temellerinin tasarımında başlıca iki adım takip edilir: i) Zemin cinsine ve üst yapıdan zemine temel vasıtasıyla aktarılacak yük şiddetine ve yatay ve düşey yüklerin büyüklüklerine bağlı olarak temel tipine karar verilmesi, ii) Köprü temelini boyutlandırılması, donatı çaplarının ve miktarlarının belirlenmesi. Zemin cinsi, veya temel kayasının mukavemet değerleri üst yapıdan gelen yükleri emniyetle taşımalıdır. Eğer üst yapıdan gelen yükler zemin emniyetli taşıma gücü değerlerini aşıyorsa bu durumda iki tür işlem yapılabilir:

Köprü temelini boyutları büyütülerek yükün zemine aktarıldığı gerilme şiddetinin düşürülmesi suretiyle temel zemininin emniyetle taşıyabileceği sınırlara çekilmesi

Derin temel tipi seçilerek örneğin kazıklı temel vasıtasıyla üst yapı yükünün zemindeki daha sağlam ve taşıma gücü değerleri fazla olan zemin veya kayaya aktararak taşıtırılması. Kazıklı temellerde başlıca iki tür kazık dreni vardır. Bunlar sırasıyla kazık uç dreni ve kazık çeperleri boyunca oluşan sürtünme kuvvetleridir. Kazıklı temel tasarımında köprü yanal yükleri dolayısıyla oluşan yatay itkilerde analizlerde dikkate alınmalıdır.

Bazı zeminler problemlerli zeminler olup eğer köprü temelleri bu tür zeminler üzerine oturuyorsa özel önlemler almak gereklidir. Bu açıdan temel zemini etütleri çok önemli olup, arazi ve laboratuvar testleri zemin cinslerinin, mukavemet ve taşıma gücü değerlerinin ayrıca yük-oturma davranışlarının doğru olarak ortaya konulması, hem köprü emniyeti hem de tasarımın ekonomik olarak boyutlandırılması ve doğru temel tipine karar verilebilmesi açılarından çok önem arz etmektedir. Problemlerli zeminler başlıca, gevşek suya doymuş kum alüvyonel zeminler, yumuşak kil zeminler, yumuşak organik pitler, şişen killer gibi zeminlerdir. Ülkemizde gevşek suya doymuş kum ve silt zeminler ile bazı yörelerde yumuşak kil zeminler ile sıklıkla karşılaşmaktadır.

Kum depositler suya doymuş olduklarında yer altı su seviyesi yüzeye yakın ise, deprem titreşimleri etkisi ile sıvılaşıma riski içerirler. Ülkemiz deprem kuşağında olup, pek çok bölgesi 1.

veya 2. derece deprem bölgesinde ve aktif fayların etkisindedir. Dolayısıyla köprü temellerinin altında bu tür zeminler zemin etütleri neticesinde tespit edilmişse bir takım tedbirlerin alınması şarttır. Bunlardan tedbirlerden birincisi, köprü temelini kazıklı derin temel olarak seçmek ve kazıklar vasıtasıyla mümkünse sıvılaşma riski olmayan bir veya çok daha az sıvılaşma riski olan zemine kadar kazıkları sürmek veya kaya üzerine yükü aktarmak olabilir. İkinci bir yöntem ise, temel zeminini örneğin jet grout gibi bir takım yöntemlerle ıslahına gitmektir. Yumuşak killi zeminlerde ise, zemin primer ve sekonder oturmaların ötesinde üçüncül devam eden oturmalar etkisinde olacaktır. Bu tür zeminlerde yapılabilecek başlıca işlemler şöyle olabilir:

i)Ekonomik ise, yumuşak zemin kazılarak temel altından uzaklaştırılması, ve yerine daha sağlam, oturma problemi oluşturmayacak zemin veya kaya getirilmesi ve serilerek sıkıştırılması,

ii)Yumuşak zemin kazılarak atılması ve kazı taban kotuna kadar, köprü temelini indirilmesi,

ii)Problemlili zemin, ön yükleme ile birlikte kum drenler veya geomembran düşey drenler ile oturmasının hızlandırılması ve kabul edilir mertebelere kadar oturmaların tamamlanmasının sağlanması.

Oturmaları uzun yıllar devam eden bir zeminin, rijit köprü üst yapısına, mesnet ve kirişlerine her zaman zarar verme olasılığı vardır. Bu sebeple killi zeminlerde de primer ve sekonder oturma analizlerin yapılarak köprü temelini oturma miktarlarının kabul edilebilir mertebeleri aşp aşmadığı tahkik edilmelidir. Kazıklı derin temellerin maliyetleri, yüzeysel temlere göre her zaman daha fazla olup, aynı zamanda kazık çakma ve yükleme deneyleri gibi işlemler inşaat süresinde gecikmelere sebebiyet verir. Bu sebeple, köprü üst yapısından zemine, zemin taşıma gücünden daha fazla yük gelmesi durumlarında, problemlili olmayan zemin koşullarında olmak kaydıyla, öncelikle temelden zemine aktarılan yüklerin (temelin adım adım büyütülmesi ile tahkik edilerek) azaltılması ve böylece yüzeysel temel inşasının tercih edilmesi ekonomik olması açısından tavsiye edilir. Ancak problemlili zeminler ile sıvılaşma riski olan zeminlerde yukarıda bahsedilen türden iyileştirmelerin yapılması şarttır.

Köprü Temel Tasarımı ve Kriterler

Köprü temel tasarımı öncesi ve tasarım aşamasında yapılması gereken bazı mühendislik çalışmaları vardır. Bunlardan bir kısmı geoteknik etüt ve analizler bir kısmı ise yapısal analizlerdir. Özetle ve sırasıyla, bu çalışmalar:

- Köprü temeli altındaki zemin ve temel kayası cinslerinin ve mukavemet koşullarının arazi ve laboratuar araştırma metotları ile (sondaj, sismik araştırma, zemin ve kaya numune testleri vs) belirlenmesi
- Köprü ayağına ve temeline etki eden üst yapıdan gelen statik ve dinamik yükler ile ayak arkası zemin yanal basınçların hesaplanması
- Temel boyutlarının ve derinliklerinin analiz edilerek belirlenmesi
- Derin temellerde kazık boylarının ve sayısı ile konfigürasyonunun belirlenmesi

Geoteknik çalışmalar temel tipine bağlı olarak aşağıdaki tabloda özetlenmiştir:

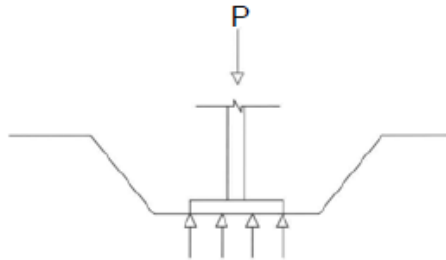
Tablo 1. Köprü temeli geoteknik çalışmaları ve analizleri
(WSDOT Geotechnical Design Manual, 2013)

Temel tipi	Mühendislik analiz ve değerlendirmeler	Analizler için gerekli veri	Arazi testleri	Laboratuvar testleri
Yüzeysel, sığ temel	<ul style="list-style-type: none"> Taşıma gücü analizi Oturma miktarı ve oranı Zeminin şişme sıkışma oranı Don neticesinde temel altı kaldırma basıncı Köprü temeli akarsu oyma miktarı Sıvılaşma nalizi Toplam zemin veya şev kayma analizi 	<ul style="list-style-type: none"> Zemin yüzey altı profili (YAS, zemin cinsleri, katman kalınlıkları) Sıkışma, şişme ve konsolidasyon parametreleri Don derinliği Zeminin gerilme geçmişi Mevsimsel zemin su içeriğinin değişimi Zemin birim hacim ağırlığı Jeolojik harita ve ana kaya özellikleri 	<ul style="list-style-type: none"> Sondaj SPT CPT PMT Dilatometer RQD Jeofizik metotlar 	<ul style="list-style-type: none"> Oedometer testi Kayma mukavemet testleri Atterberg Limitleri Spesifik birim hacim ağırlığı Birim hacim ağırlığı Su içeriği Organik zemin içeriği Çökme/şişme potansiyel testleri Kaya elastik modülü Dane dağılımı

Derin temel	<ul style="list-style-type: none">• Kazık uç taşıma gücü• Kazık sürtünme miktarı• Oturma analizi• Yatay zemin basıncı analizi• Zemin ve kazık kimyasal uyum analizi• Kazıkların zemine sürülebilirliğinin analizi• Sıkı zeminlerin ve büyük kaya parçalarının zeminde varlığının tespiti• Kazık çakımında oluşan titreşimin civar yapılara olan etki analizi• Sıvılaşma ve genel zemin kayma stabilitesi	<ul style="list-style-type: none">• Zemin yüzey altı profili (YAS, zemin cinsleri, katman kalınlıkları)• Sıkışma, şişme ve konsolidasyon parametreleri• Zemin mukavemet parametreleri• Yatay toprak basıncı katsayısı• Zemin birim hacim ağırlığı• Jeolojik harita ve ana kaya özellikleri• Zemin permabilite değeri• Kazık korozyon riski	<ul style="list-style-type: none">• Sondaj• SPT• CPT• PMT• Dilatometer• RQD• Jeofizik metotlar• Piezometreler• Vane kayma testi• Şaft yükleme testi• Kazık yükleme testi	<ul style="list-style-type: none">• Oedometer testi• Kayma mukavemet testleri• Atterberg Limitleri• Spesifik birim hacim ağırlığı• Birim hacim ağırlığı• Su içeriği• Organik zemin içeriği• Çökme/şişme potansiyel testleri• Kaya elastik modülü• Dane dağılımı• pH drenji testi• permabilite testi• zemin kazık sürtünme testi• kazık uç drenaj testi
--------------------	--	---	--	---

Yüzeysel tekil temelerde başlıca iki kritik tahkik vardır:

Temelden zemine aktarılan basınç, zeminin emniyetli taşıma gücü değerinden küçük olmalıdır (Şekil 5):



Şekil 5. Taşıma gücü analizi (ODOT, 2014)

$$\sigma = P/A < \sigma_{zem}$$

Burada;

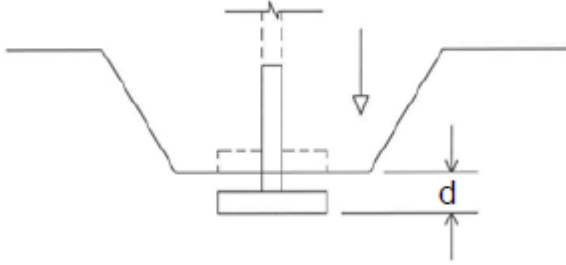
(1)

P: üst yapıdan temele etki eden toplam düşey yük,

A: Temel alanı ve

σ_{zem} : emniyetli zemin taşıma gücü

- Temelin toplam oturması, izin verilen oturma miktarından küçük olmalıdır:
d< her bir proje için izin verilen oturma miktarı (Şekil 6):



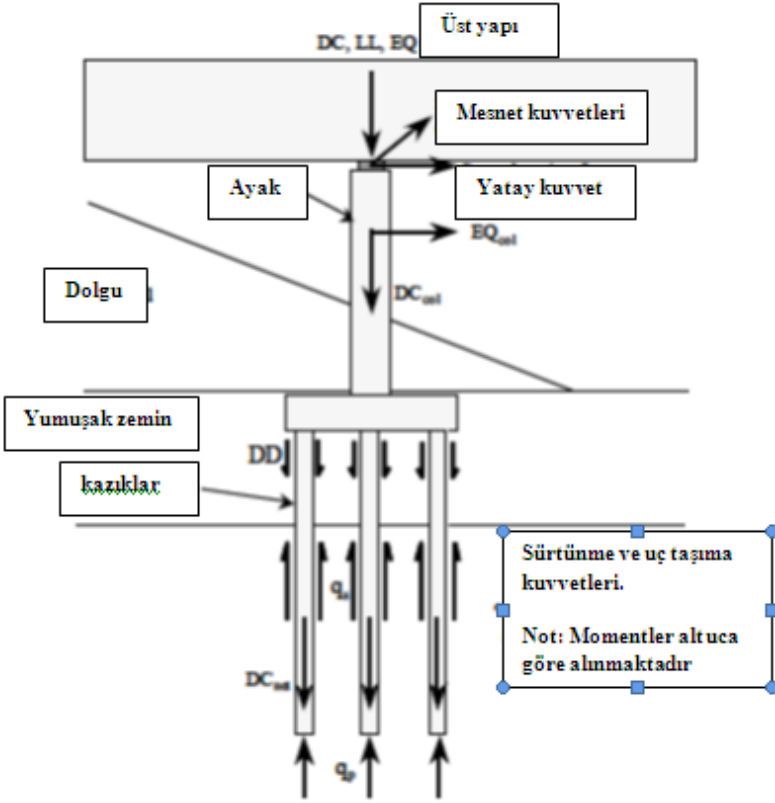
Şekil 6. Temel oturma analizi (ODOT, 2014)

Aşağıdaki tabloda temelde izin verilebilir oturma miktarları görülmektedir:

Tablo 2. Köprü temellerindeki ve kenar ayakları arasındaki izin verilebilir oturma ve diferansiyel oturma değerleri (WSDOT, 2013)

Köprü ayağı veya temelindeki toplam oturma (cm)	30 m nin üzerindeki açıklıktaki köprü ayakları arasındaki diferansiyel oturma (cm)	Faaliyet
$\Delta H \leq 2.5$	$\Delta H_{30} < 1.9$	Tasarla ve İnşa et
$2.5 < \Delta H \leq 10$	$1.9 < \Delta H_{30} \leq 7.6$	Köprünün bu oturmayı tolere edip etmeyeceğini analiz et
$\Delta H > 10$	$\Delta H_{30} > 7.6$	Tasarıya ve inşaata devam edip etmemek için izin al

Aşağıdaki şekilde ise yumuşak zemini geçen derin bir köprü temeli için yük durumu ile kazık sürtünme ve uç kuvvetleri görülmektedir.



Şekil 7. Kazıklı köprü temeli ve ayak ile temel yükleri (WSDOT, 2013)

Burada,

DC_{col} = Ayak yükü (ağırlığı)

EQ_{col} = Deprem yatay itkisi

q_p = maksimum kazık uç taşıma dreni

q_s = maksimum kazık sürtünme dreni

DD = maksimum yumuşak zeminin düşey oturmadan dolayı kazıkta oluşturacağı aşağı çekme kuvveti

DC_{net} = kazık beton birim hacim ağırlığı ile zemin birim hacim ağırlığı farkı

Afyonkarahisar Akarçay Islah Projesi Sanat Yapıları

2006-2007 seneleri içerisinde Afyonkarahisar Akarçay ıslah projesi kapsamında DSİ tarafından üç adet köprü, karayolu geçişini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır (Şekil 8). Bunlardan tek açıklıklı gerber kirişli bir köprü 30 m açıklıklı olup, daha önceki yapılan bir proje den örnek alınarak köprü ayakları fore kazık olarak yapılması ilk aşamada planlanmıştır. Daha sonra arazi yerinde yapılan Akarçayın alüvyon yapısı üzerindeki gözlemlere ve aynı zamanda köprü ayakları temel kısmında yapılan sondaj çalışması neticesinde (Şekil 9) köprü temeli daha ziyade killi kumlu zeminden oluştuğu görülmüş SPT deney sonuçlarına istinaden emniyetli taşıma gücü değerinin 30 KPa olacağı hesaplanmıştır. Köprü üst yapısından gelen temele gelen yükler hesaplandıktan sonra kazıklı tip temel projesini uygulamadan önce yüzeysel bir temelin 30 kPa zemin emniyet gerilmesini taşıyıp taşıyamayacağını tahkik edilmesine karar verilmiştir. Ön boyutlandırma önce temel boyutları zemin emniyet gerilmesini aşacak şekilde zemine gerilme aktardığı görülünce kazıklı temel yapmaktan ise temel boyutlarının biraz büyütülmesi neticesinde durumun ne olacağı analiz edildiğinde sonuçta az bir temel boyutlarında büyütme ile zemine yükler emniyetli bir şekilde taşıtılmıştır (Şekil 10). Temel boyutlarının bu son hali ile kazıklı temel projesi mukayese edildiğinde yüzeysel temelin daha ekonomik olduğu aynı zamanda işçilik kolaylığı ve inşa süresinin daha kısa olması gibi avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Proje nihayet bu bulgulara göre yüzeysel temelli ve daha ekonomik olarak inşa edilmiş olup daha sonra ikinci Akarçay ıslah projesi tamamlanana kadar başarı ile zeminde önemli bir oturma olmadan trafiğe açık hizmet vermiştir. Yeni proje kapsamında ise, köprü tipleri kemer tarza çevrildiğinden köprüler için proje revizyonu yapılmıştır.

Sonuç

Bu çalışmada köprü temellerinin köprü projelerinin boyutlandırılması ve tasarımında hem köprü güvenliği açısından hem de ekonomisi açısından önemi üzerine durulmuş. Köprü temel tipleri verilmiş. Köprü temellerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken temel esaslara değinilerek tasarım öncesi gerekli olan geoteknik çalışmalar özetlenmiştir. Ayrıca köprü ayakları ve temelleri için kabul edilebilir oturma oranları sunulmuş. Derin temelli bir köprü ayağının ve temeli üzerine etkileyen yükler gösterilmiştir. Son olarak Akarçay ıslahı projesi kapsamında tasarlanan ve inşa edilen bir köprünün ayak temeli tasarımı esnasındaki proje çalışmaları ve ekonomik boyutlandırma örnek olarak anlatılmıştır.

Kaynaklar

1. Frank, R. and Bouassida, Y. 2010, "Geotechnical Aspects of Bridge Design (EN 1997)", EUROCODES, Dissemination of Information for Training, Vienna,
2. ODOT, 2014, "Introduction to Bridge Structures" Oregon Department of Transportation,
3. WSDOT, 2013, " Bridge Foundation Design" Wisconsin Geotechnical Design Manual, USA

Anahtar Sözcükler: Köprü temeli, tasarım, geoteknik çalışmalar, ekonomi