

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİNE GİRİŞ (Bölüm-5)

Geoteknik Mühendisliği – Temel Tasarımı- Vaka Analizleri

Yrd. Doç. Dr. Banu Yağcı

Kaynaklar;

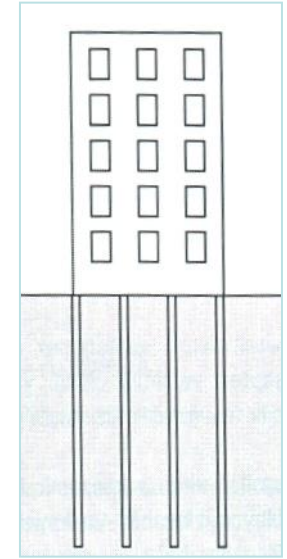
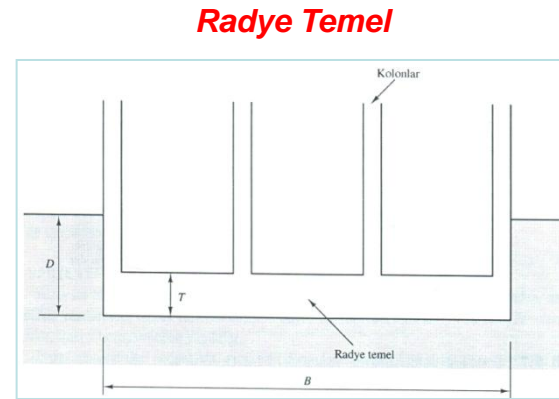
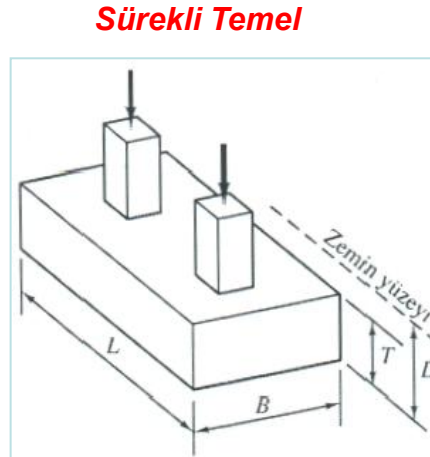
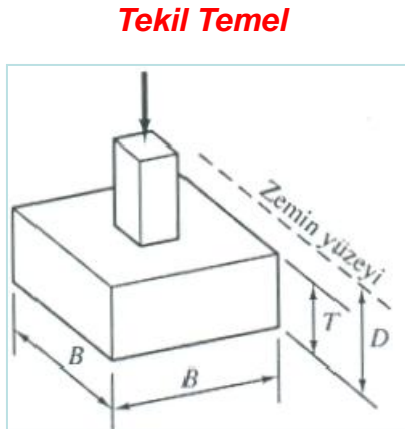
Coduto, D. P., “Temel Tasarımı, İlkeler ve Uygulamalar”, 2005 (çeviri)

TEMEL TASARIMI

▪ Temeller üst yapı yüklerini zemine aktaran yapı elemanlarıdır. Bunu yaparlarken yapısal bütünlüklerini koruma yanında üzerinde buldukları zeminleri de aşırı gerilmelere zorlamamalıdır. Çünkü aşırı gerilmeler zeminde **kayma yenilmesine** ve/veya **aşırı oturmalara** neden olabilir. Bu nedenle temel tasarımları hem **geoteknik** hem de **yapısal** gereksinimleri ekonomik olarak karşılamak zorundadır.

▪ **Geoteknik gereksinimler**, temellerin üzerine oturtulacağı zemin ve/veya kayanın izin verilebilir taşıma gücü tayinine yöneliktir. Dolayısıyla temel altındaki zemin ve/veya kaya katmanlarının geoteknik özelliklerinin sağlıklı bir biçimde tespit edilmesi gerekir. Bu da iyi bir geoteknik etüdün yapılması ve yorumlanması anlamına gelir.

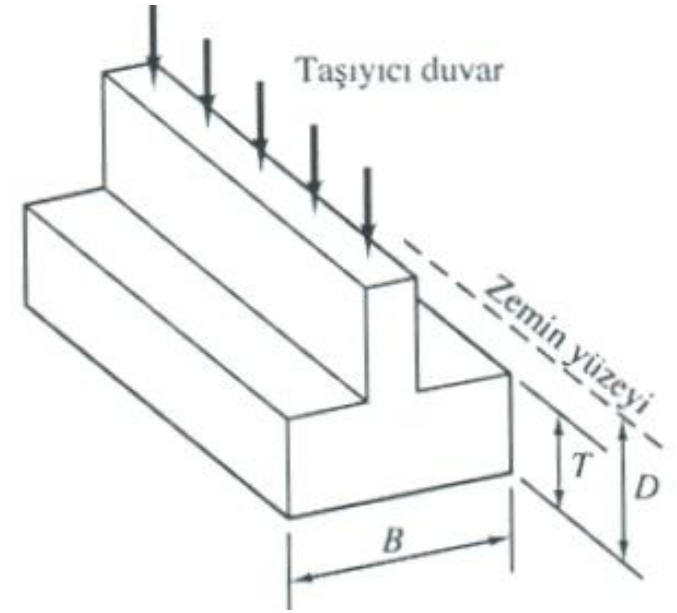
▪ Öte yandan temeller, üst yapı yüklerini yapısal göçme olmadan üzerinde buldukları zemin ve/veya kayaya aktarabilmelidir (**yapısal gereksinim**). Temellerin yapısal tasarımı hiç şüphesiz uygun dayanımlı bir beton ve donatı çeliği seçimini, gerekli temel kalınlığı, donatı çubuklarının boyutu, sayısı ve aralığının belirlenmesini ve üst yapı ile temel arasındaki bağlantının tasarlanmasını içerir.



Kazıklı Temel

Eski temel tasarımları, sadece geçmişteki örneklere, önsezi ve yaygın kaniya dayandırılmaktaydı. Yapıcılar, temellerin boyutlandırılması ve inşası için deneme ve yanılma yoluyla kurallar geliştirmiştir.

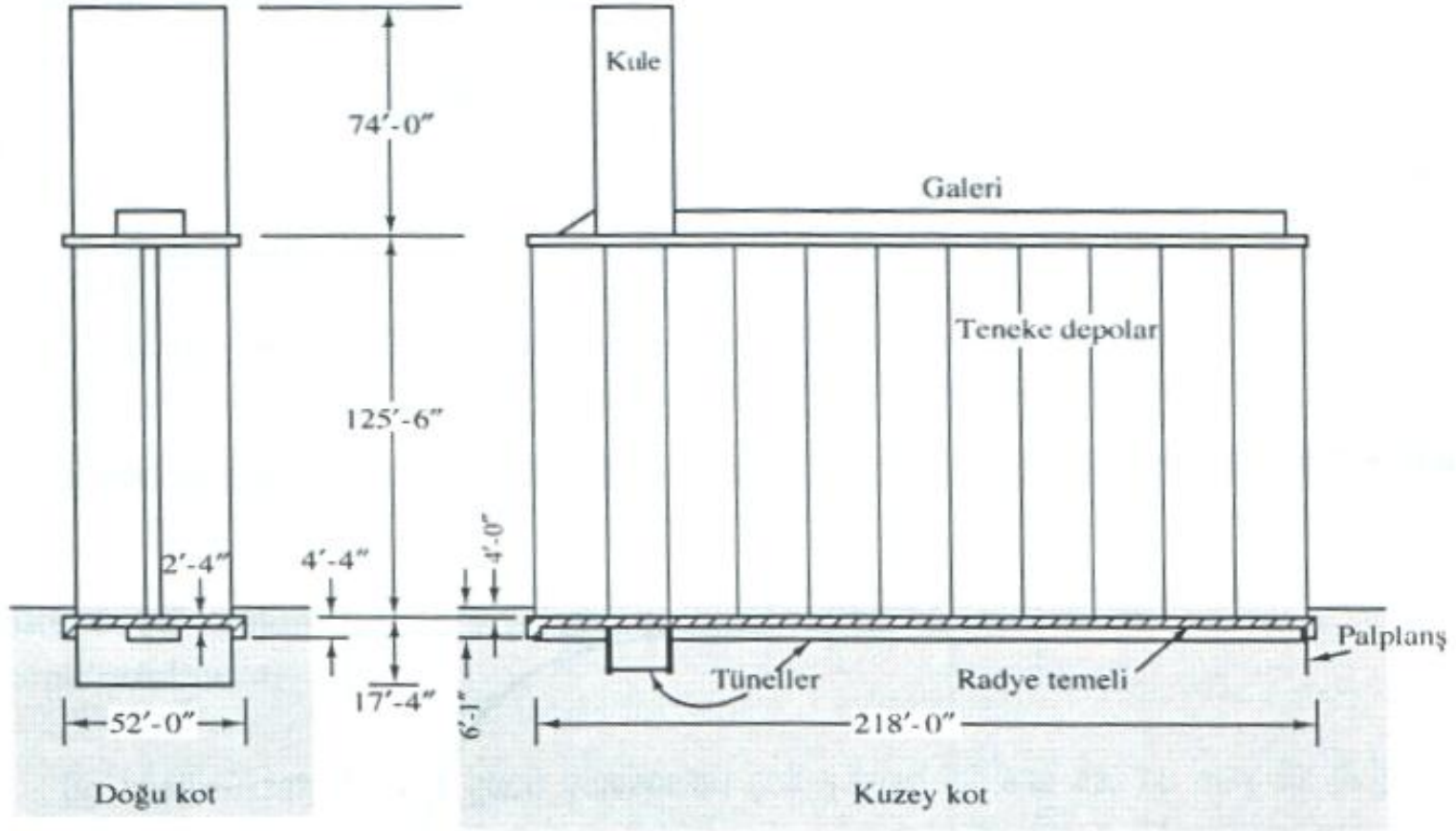
Örneğin, 19. yüzyılda New York şehrinde **sıkı çakıllar** üzerine inşa edilen yük taşıyıcı taş duvarlar, duvar genişliğinin **1,5 katı** genişliğe sahip yüzeysel temeller üzerine inşa edilmişti. **Kum ve sert kil** üzerine inşa edilenler ise **3 katı** idi.



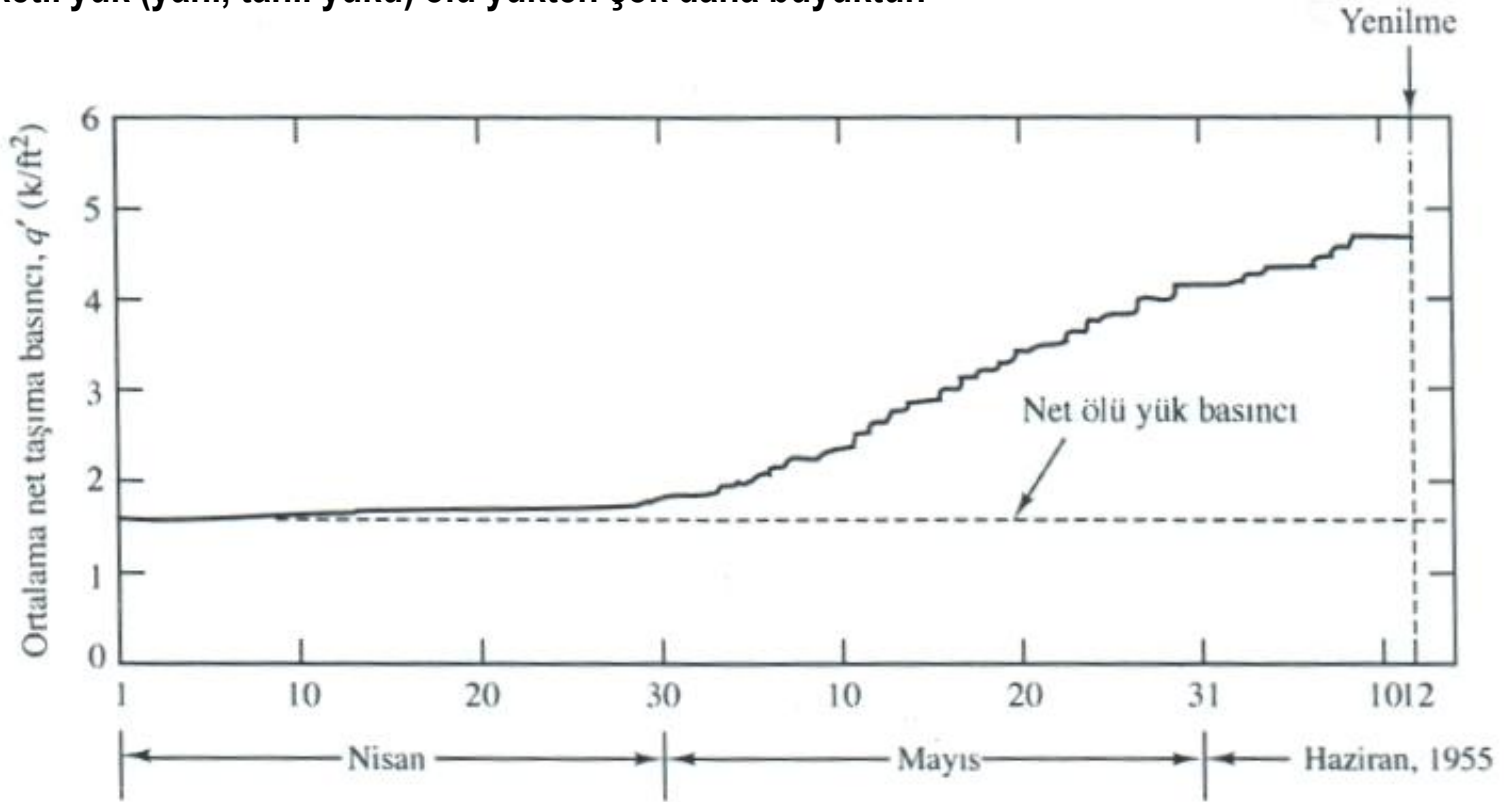
Bu ampirik kurallar, geçmişte karşılaşılan zemin koşulları ve yapılara uygulandığında genellikle kabul edilebilir sonuçlar ortaya koymuştur. Bununla birlikte inşaatçılar kuralları yeni bazı koşullara uyguladığında sonuçlar genellikle yıkıcı olmuştur. Bu problem özellikle 19. yüzyılın sonlarında yeni bina inşaat yöntemlerinin ortaya çıkmaya başladığı zaman sıkıntı verici olmuştur. Çelik ve betonarmenin devreye girmesi; rijit kagir yapılardan uzaklaşarak, daha esnek çerçevesel yapılara bir geçişe yol açtı. Bu yeni materyaller, binaların öncekilerden daha uzun ve ağır olmasına da izin vermiştir. Ayrıca daha yeni sahalar yerleşime açıldıkça, inşaatçılar kötü zemin koşullu sahaları göz önünde bulundurmaya zorlanmış ve bu sahaların temel tasarımı ve inşası daha çok güçleşmiştir. Böylece temel tasarımı için eski kurallar daha fazla uygulanamamıştır.

Fargo Tahıl Asansörünün Göçmesi

Taşıma gücü yenilmeleri konusunda en çarpıcı olaylardan biri, 1955 yılındaki Fargo Tahıl Asansörü'nün göçmesidir. Şekilde görülen bu tahıl asansörü 1954 yılında Fargo (Kuzey Dakota) yakınında inşa edilmiştir. Yirmi adet silindirik varil ve diğer eklentilerden oluşan donatılı bir beton yapı idi. Bu yapıları destekleyen **radye temelin** genişliği 52 ft (15,8 m), uzunluğu 218 ft (66,4 m) ve kalınlığı da 2 ft 4 inç (0,71 m) idi.



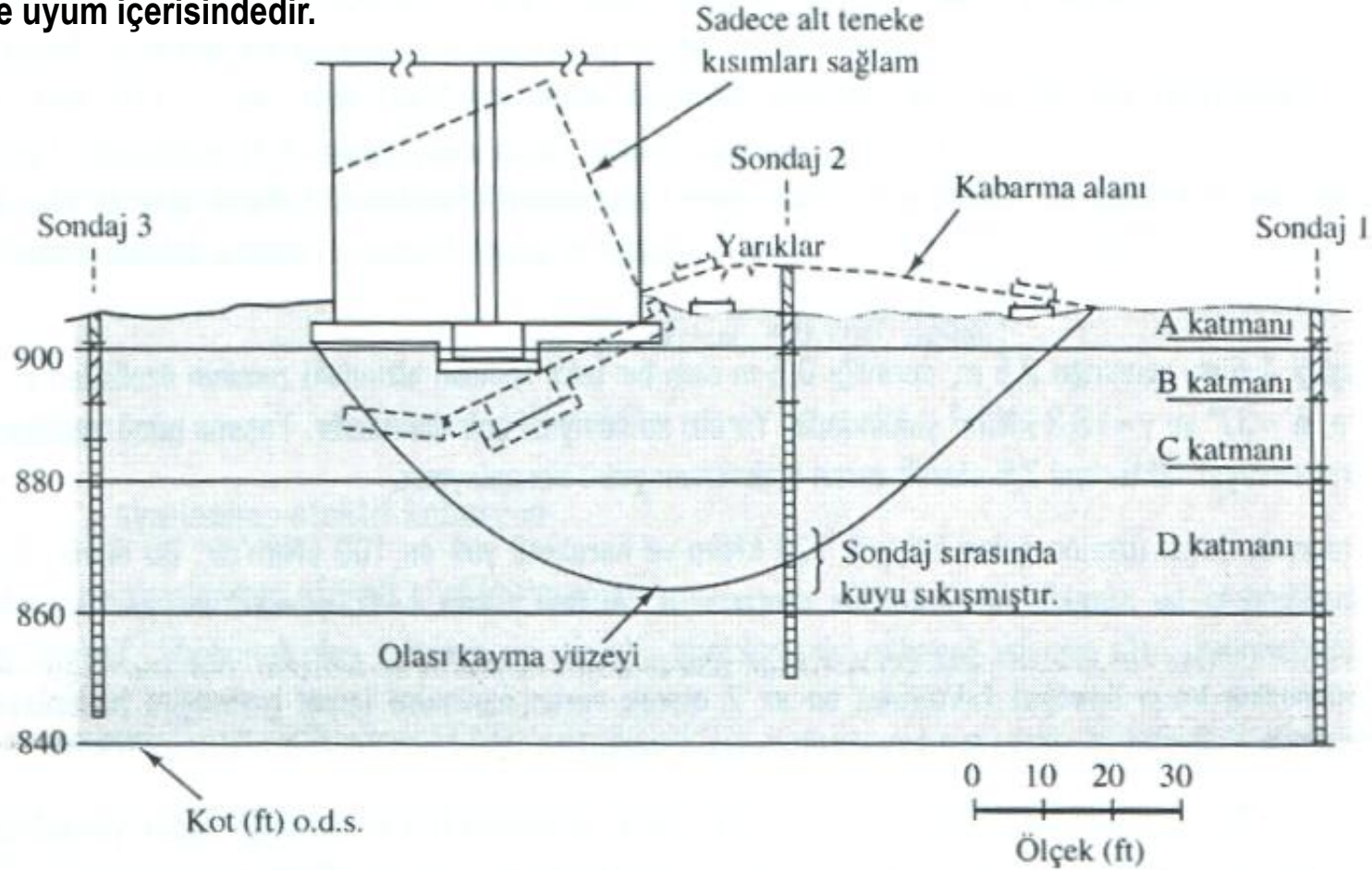
Yapının boş olduğu durumdaki ortalama net temas basıncı $q'=1590 \text{ lb/ft}^2$ (76,1kPa) idi. Nisan 1955'de silolar tahıl ile doldurulmaya başladığında, q' Şekil deki gibi yükselmeye başlamıştır. Bu tür yapıdaki hareketli yük (yani, tahıl yükü) ölü yükten çok daha büyüktür.



Böylece, Haziran ortasına kadar net temas basıncı üç katına çıkmış ve 4750 lb/ft^2 'ye (227 kPa'ya) ulaşmıştır. Ne var ki, temas basıncı yükselirken asansör de giderek artan bir hızda oturmaya başlamıştır.

12 Haziran 1955 günü sabahın erken saatlerinde asansör çökmüş ve tamamıyla kullanılamaz hale gelmiştir. Bu yenilme sonucunda Şekil 'de gösterildiği gibi zeminde (2 m'lik) bir kabarma meydana gelmiştir.

Asansörün inşasından önce herhangi bir geoteknik araştırma yapılmamıştır fakat, Nordlund ve Deere (1970) olaydan hemen sonra kapsamlı bir inceleme yapmıştır. Bu çalışmaya göre zemin, doygun kilden oluşmaktaydı. Bu zemin için taşıma gücü analizleri net nihai taşıma gücünün 4110 ile 6250 lb/ft² (197-312 kPa) arasında olduğunu göstermiş olup, bu değerler yenilme anındaki q' nün 4750 lb/ft² (ortalama) ve 5210 lb/ft² (maksimum) değeri ile uyum içerisindedir.



Fargo Tahıl Asansörü yenilmesini inceleyen çalışma, **taşıma gücü analizlerinin güvenilirliğini** ortaya koymuştur. Orta düzey bir saha incelemesi ve deney programı bile bu yenilmeyi tahmin edebilecek kayma dayanımı değerlerini ortaya koyabilirdi. Böyle bir çalışma yapılmış olsa ve uygun bir emniyet faktörü ortaya koymuş olsaydı bu yenilme olmazdı. Ancak, 1950'lerin başlarında çoğu mühendis taşıma gücü analizi yapmadığı için, tasarımcılar hakkında çok da acımasız olmamak gerekir.

Bu büyüklükteki taşıma gücü yenilmeleri çok yaygın olmasa da, bu olay ilk değildir. Buna benzer bir yenilme, Fargo'nun yaklaşık 320 km kuzeyindeki Winnipeg (Manitoba) yakınındaki bir tahıl silosunda **1913** yılında meydana gelen yenilmedir. Bu asansör, temelin altında bulunan ve q' değeri 4680 lb/ft² (224 kPa) olan zeminin yenilmesiyle birlikte düşeyden 27 sapmıştır. Gerek yenilmedeki q' değeri ve gerekse zemin profili Fargo sahasına çok benzemektedir.

Illinois Üniversitesi mühendisleri **1951** yılında Winnipeg yenilmesini incelemişlerdir. Bu sahada araştırma sondajları açmışlar, laboratuvar deneyleri yapmışlar ve net nihai taşıma gücünü 5140 lb/ft² (246 kPa) olarak hesaplamışlardır. Bir kez daha görülüyor ki, önceden yapılan bir taşıma gücü analizi bu yenilmeyi tahmin eder ve ona göre bir emniyet faktörü uygulayarak bunun önüne geçebilirdi. İşin ilginç tarafı, bu çalışmanın sonuçları **1953** yılında; Fargo yenilmesinden sadece iki yıl önce yayınlanmıştı. **Bu olay, başkalarının hatalarından ders almayı öğrenmeyen mühendislerin klasik bir örneğini teşkil etmektedir.**



Eğik Pisa Kulesi;

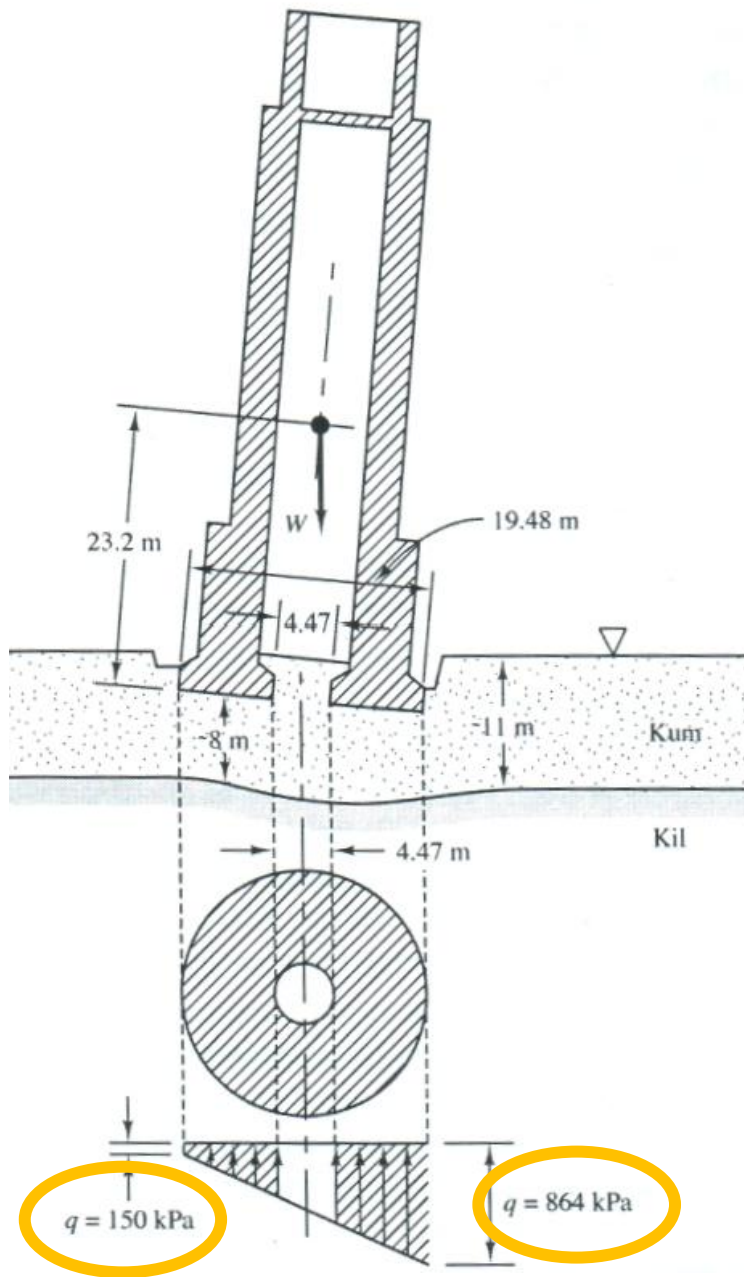
Orta Çağ' da Avrupalılar o zamanki tasarım sınırlarını zorlayarak büyük ve ağır yapılar inşa etmeye başlamıştı. İtalya' daki bir çok cumhuriyet, gücünü göstermek için normal kuleler ve çan kuleleri dikmekteydi. Ancak bu aşamada yapısal bütünlükten çok yaratıcı mimariye yol verilmiş ve bu yapıların çoğu yıkılmıştı. Bu yenilmelerin bazıları kötü yapısal tasarımdan ileri gelse de, çoğu da zeminin aşırı yüklenmesinden kaynaklanmıştı. Bazıları da eğilmiş fakat yıkılmamıştı. Bunların en meşhuru, Pisa' daki çan kulesi, veya daha popüler olarak bilinen adıyla Eğik Pisa Kulesi'dir.

Kulenin inşası Bannano Pisano' nun denetimi altında **1173** yılında başlamış ve **1178** yılına kadar yavaş bir şekilde devam etmişti. Bu eski çalışmada **64,2 ft** çapında halka şekilli bir temel ile birlikte kulenin katlarından dördü inşa edilmişti. Bu aşamaya kadarki temas basıncı (taban basıncı-Temelin hemen altındaki gerilmeler) yaklaşık **330 kPa** idi ve kule daha o zaman eğilmeye başlamıştı. Ülkedeki siyasi ve ekonomik çalkantılardan dolayı kulenin inşası bu seviyede durmuştu. **İnşaattaki bu duraklamanın kuleyi kurtardığını biliyoruz. Zira alttaki zeminin bir miktar daha dayanım kazanması için konsolidasyonuna fırsat vermişti.**

İnşaata yaklaşık bir yüzyıl sonra, **1271'** de yeni mimar Giovanni Di Simone kontrolünde tekrar başlanmıştı. Tamamlanmış kısmı yıkıp yerine yeniden ve daha geniş temelli bir kule inşa etmek daha iyi bir çözüm idiyse de, Di Simone yarım kalan yapıyı devam ettirmeyi yeğlemiş ve eğilmeyi gidermek için yapının çapını yukarı doğru daraltma yoluna gitmiş ve ayrıca kulenin yüksek tarafına ek ağırlık koymuştur. Yapıyı yedinci katın sonunda durdurmuştur.

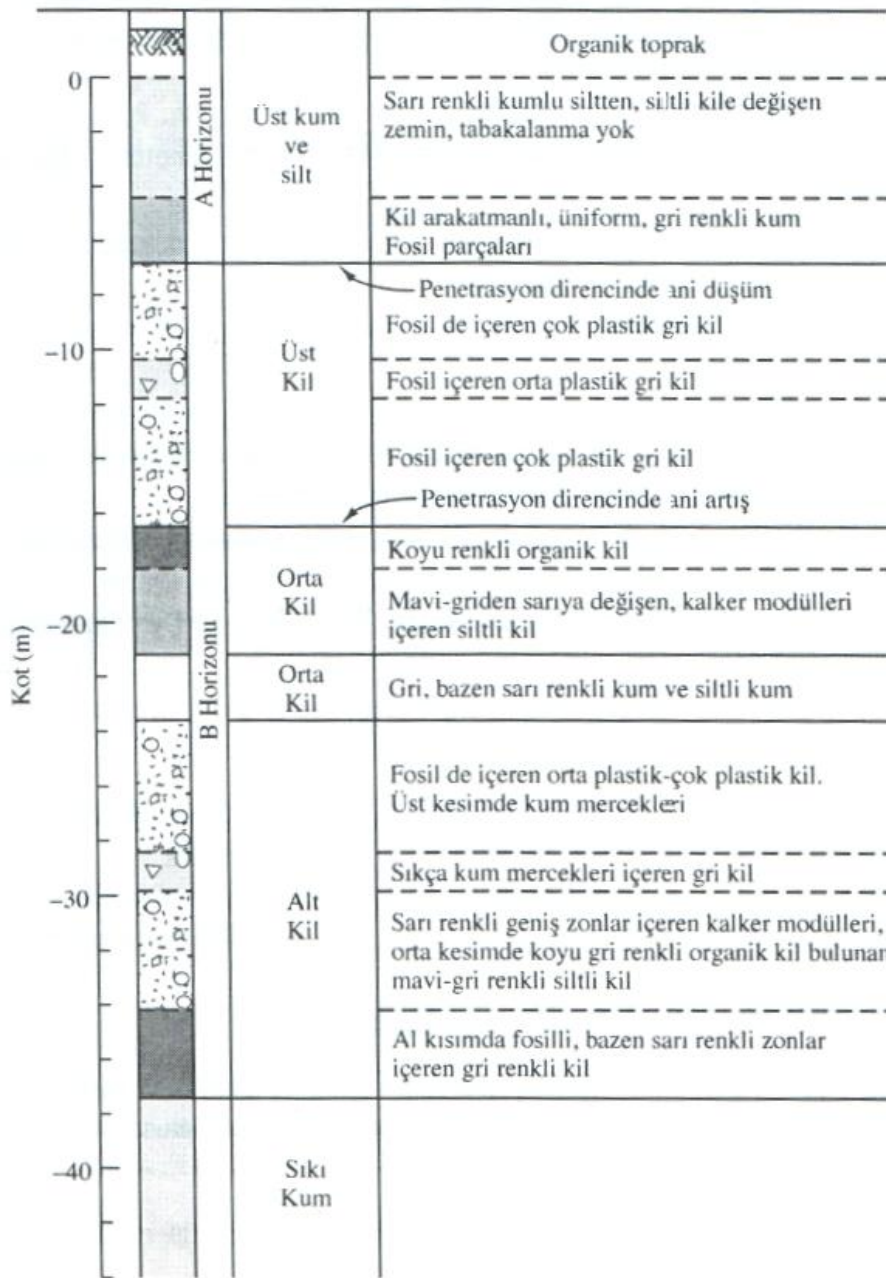
Son olarak üçüncü inşaat dönemi olan **1360-1370** yılları arasında çan evi kısmı inşa edilmişti. Bu kısmın ekseninin kulenin geri kalan kısmı ile yaptığı açı 3 derece idi. Bu miktar muhtemelen o zamanki eğilme açısı idi. Tüm yapım aşamalarıyla birlikte kule inşaatı yaklaşık iki yüzyıl sürmüştü.

Kulenin hem kuzey hem de güney tarafı oturmaya devam etmiş (güney taraf kuzey taraftan daha çok oturduğu için eğilme meydana gelmiş), **19. yüzyılın başlarına** kadar kule 2,5 m kadar oturarak yere gömülmüştü. Kolonların tabanındaki zarif oymalar artık görülemiyordu. Bu problemi gidermek ve kolonların tabanını görünür hale getirmek için, **1838** yılında kulenin etrafında dairesel bir hendek kazılmıştı. Ne var ki, hendek kazısı su tablasının konumunu etkilemiş ve **kulenin etrafındaki yanal desteği ortadan kaldırmıştır**. Sonuçta kule ani bir hareket göstermiş ve tepe kısmında eğimine yarım metre daha eklenmişti. Sürpriz bir şekilde de çökmemişti. İleriki yüzyıllarda kimse başka bir şey yapmaya cesaret edemedi.



1930 larda Benito Mussolini kulenin ülke imajını olumsuz etkilediğine karar vermiş ve tamir edilmesini emretmişti. Mussolini'nin işçileri **kulenin tabanında delikler açmak suretiyle alttaki zemine 200 ton çimento basmış fakat**, bunun sonucunda problem daha da kötüleşmiş ve kule 0,1 derece daha eğilmişti.

20. yüzyılın önemli bir kısmında kule yılda 7 saniyelik yay parçası kadar hareket ediyordu. Bu yüzyılın sonuna kadarki eğilme güney tarafta **5.5 dereceye** çıkmıştı. Bunun anlamı, kulenin tepesinin çökülden **5.2 metre** sapması demektir. Kulenin tabanındaki **ortalama temas basıncı 497 kPa** idi fakat, kulenin eğilmesi ağırlığın eksantrik olarak etkimesine yol açmıştı. Bu yüzden temas basıncı üniform değildi. Şekilde görüldüğü gibi 20. yüzyıla kadar bu temas basıncı **62 ile 930 kPa** arasında idi. Kulenin yıkılmasına ramak kalmıştı. Küçük bir deprem bile kuleyi rahatlıkla devirebilirdi; birtakım önlemlerin alınması kaçınılmaz olmuştu.



← **Kulenin altındaki zemin profili**

1965 yılında İtalyan hükümetinin desteklediği kapsamlı bir program çerçevesinde **yeraltı şartlarının incelenmesine** başlanmıştır. Şekilde görülen profil sahanın tamamında üniform olup, yağlı killer üzerine gelen kum şeklindedir.

Bu problem amatör ve profesyonel kesimden yoğun ilgi görmüş ve yetkililer bazen haftada elliden fazla olmak üzere sayısız çözüm önerileri almıştı. Bir **yapısal destek** sağlama (belki de kuleye yaslanan büyük bir heykel inşa etme?) gibi öneriler teknik açıdan mümkün gibi görünse de, estetik açıdan kabul edilmesi mümkün değildi.



1990 yılında kulenin iç kısmı ziyaretçilere kapatılmış ve **1993** yılında da geçici iyileştirme önlemi olarak kulenin kuzey tarafına **600 tonluk kurşun külçeleri** yerleştirilmişti. **1995** te mühendisler kulenin temeli etrafına betondan bir halka yerleştirmiş ve betonu delerek yaklaşık 40 ft aşağıdaki sıkı kum katmanına bu halkayı ankrajlarla bağlamışlardı.

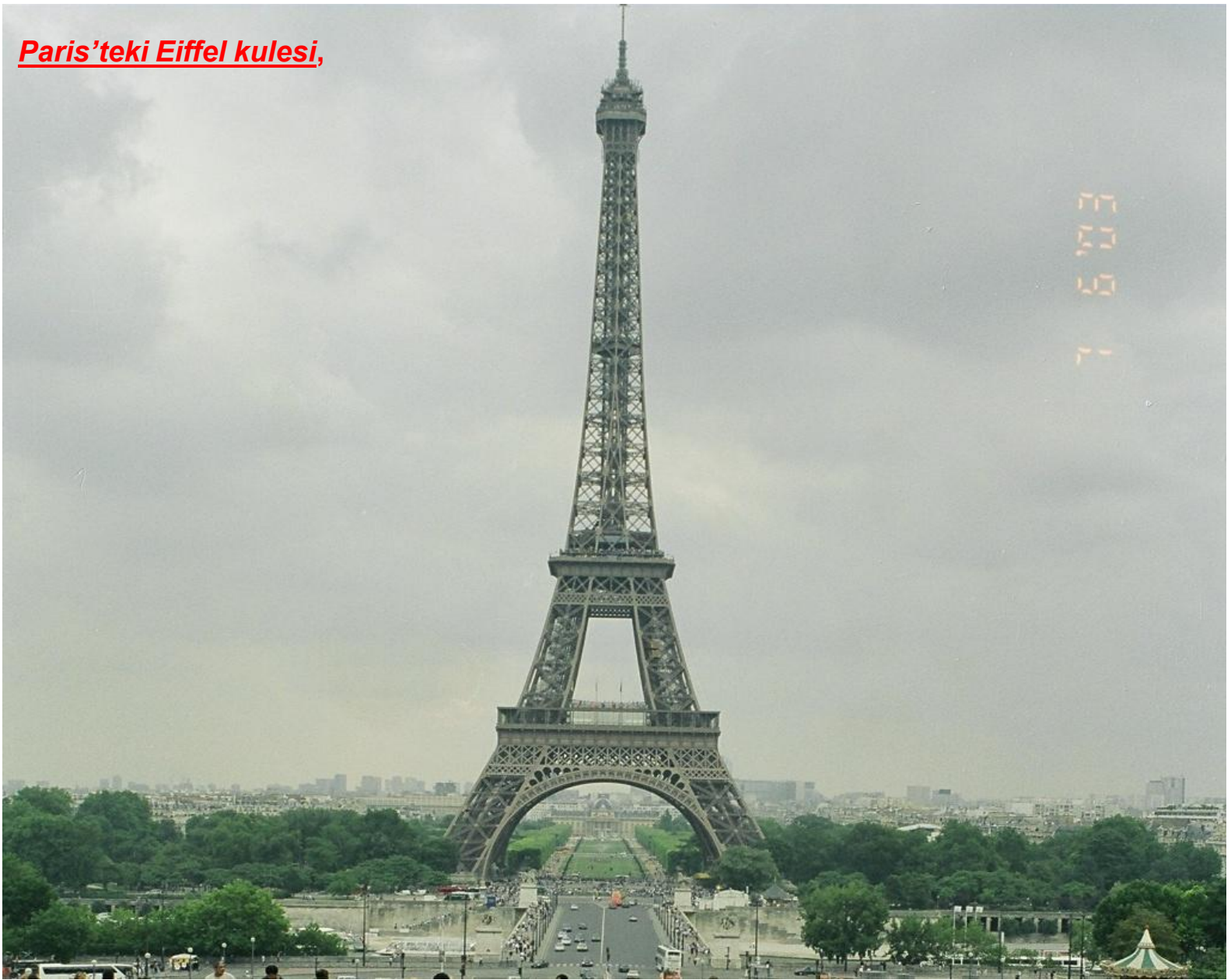
Bu işlem sırasında zemine uygulanan kuvvetler alttaki zeminleri hafifçe sıkıştırmış ve eğilmeyi biraz azaltmıştı fakat, ankrajların yerleştirilmesi zemini örselemiş ve kulenin eğiminde ani bir artışa neden olmuştu. Kule **bir gece** yaklaşık olarak **1.5 mm** hareket etmişti ki, bu değer yaklaşık **1 yıllık normal hareketine** karşılık geliyordu. Sonuçta inşaat işleri durdurulmuş ve kulenin kuzey tarafına daha çok kurşun külçeleri yerleştirilmişti. Bir süre herhangi bir faaliyet olmamıştı fakat, **1997** yılında Assisi yakınındaki bir deprem, aynı şehirdeki bir kulenin yıkılmasına neden olmuştu ki, bu kule eğik bile değildi. Bu olay Pisa kulesinde yeni bir dönemi başlatmış ve izleme komitesi kulenin stabilizasyonu için yeni bir yöntemi onaylamıştı: **zemin çıkarılması.**



Zemin çıkarma yöntemi, kuzey tarafta kulenin altına dikkatli bir şekilde zemine eğik sondaj kuyuları açılması ve bu deliklerden azar azar zemin çıkarılması şeklindeydi. Böyle yapmakla kulenin altı boşaltılmış olacak; kulenin kuzey tarafının oturması sağlanacak ve eğim miktarı da azaltılmış olacaktı. Bu çabaların amacı, kulenin eğimini 5.5 dereceden 5 dereceye indirmektir. Hedeflenen bu eğim miktarı, kulenin 3 yüzyıl önceki durumuna karşılık geliyordu. Kuleyi tam çeküle getirme gibi bir düşünce söz konusu değildi.

Zemin çıkarma işlemi Mexico City' deki yapıları stabilize etmede başarıyla uygulanmıştı ve Pisa kulesi içinde en uygun çözüm gibi görünüyordu. Bu işlemin aylar, hatta yıllar süren bir zaman aralığında, kulenin hareketini de sürekli gözetlemek koşuluyla, yavaşça yapılması gerekiyordu. **Kaynak kitap yayınlandığında (Caduto, 2001) zemin çıkarma işlemi henüz başlamış ve eğimde hafif bir azalma kaydedilmişti. Bu girişimin başarılı olması halinde, kurşun külçelere artık gerek kalmayacak şekilde, kulenin ömrü en az 300 yıl daha uzatılmış olacaktır.**

Paris'teki Eiffel kulesi,





Paris'teki Eiffel kulesi,

temeller için eski kuralların artık uygulanmadığı yeni tip bir yapının mükemmel bir örneğidir. Başlangıçta 1889 Paris Evrensel Sergisi için inşa edilmişti ve dünyadaki en yüksek yapı idi. Tasarımcı ve inşaatçı Alexandre Gustave Eiffel, uygun temeller gereksiniminin bilincinde idi ve açıkça bir başka yana yatan Pisa kulesine neden olmak istemiyordu.

Eiffel kulesi Seine nehrine çok yakın olup; temeli, **sıkıştırılmamış dolgu ve yumuşak alüvyonlu zeminler içeren kötü zemin koşullarından** oluşmaktadır. Alüvyon içine inşa edilen yakındaki Alma köprüsü ayaklarında o zaman itibariyle yaklaşık olarak 1 metre oturma meydana gelmişti. Kule o kadar fazla oturmalara tahammül edemeyebilirdi.

Eiffel zamanın hantal delme ekipmanını kullanarak, yer altı koşullarını araştırmaya başlamış, fakat sonuçlardan tatmin olmamıştı. “Daha çok sulanmış şekilde ve kepçe ile kazılarak yüzeye getirilen birkaç desimetreküp zemin incelemesine dayalı olarak hangi sonuçlar mantıklı bir biçimde elde edilebilirdi ki?” Bu nedenle **basınçlı hava ile doldurulmuş 200 mm çaplı bir borunun çakılmasından** oluşan, zeminleri araştırmanın yeni bir yöntemini planlamıştır. Hava yer altı suyunun boruya girmesini engellemiş ve böylece daha yüksek nitelikli numunelerin çıkarılmasına izin vermiştir.

Eiffel' in çalışmaları, kulenin Seine' e en yakın iki ayak temelini, derin ve çok yumuşak alüvyondan oluştuğunu ve yumuşak silt ile dolmuş eski nehir kanalına çok yakın olduğunu ortaya çıkarmıştır. Temel tasarımı bu zemin koşullarına yer vermeli idi ya da çok yumuşak zeminler üzerinde olan iki ayak, kulenin nehre doğru eğilmesine neden olarak, diğer iki ayaktan daha fazla oturacaktı.

Eiffel, zemin koşulları çalışmasına dayanarak, iki ayak temelini nehirden uzakta yüzeysel fakat sıkı alüvyal zeminler üzerine yerleştirmişti. Bu temellerin tabanı yer altı su seviyesi üzerinde idi. Bu yüzden temellerin yapımı kolayca ilerlemişti. Bununla birlikte, diğer iki ayak için temelleri daha derin yapmış; böylece, onlarda sağlam zeminlere inşa edilmişti. Bu durum zemin yüzeyinden yaklaşık **12 m** derinde (yer altı su seviyesinden 6 m aşağıda) bir kazıyı gerektirmişti. Eiffel' in gayreti sonucu, temeller kuleyi bir yüzyılın üzerinde desteklemiş ve henüz aşırı farklı oturmalar geçirmemiştir.