KESON TEMELLERDE TASARIM VE SAHA ÖLÇÜMLERİ: JAPONYA'DAN VAKA ÇALIŞMALARI

DESIGN AND IN-SITU MEASUREMENTS IN CAISSON FOUNDATIONS: CASE STUDIES FROM JAPAN

Feyzullah GÜLŞEN[1], Makoto TONE[2]

ÖZET

Bu bildiri, kentsel altyapı projelerinde yüksek taşıma kapasitesi ve rijitliği sebebiyle sıkça tercih edilen açık ve pnömatik keson yöntemlerinin Japonya'daki tarihsel gelişimini, tasarım ilkelerini ve gerçek zamanlı saha ölçüm sistemlerini içermektedir. Çalışma kapsamında, derin keson batırma operasyonlarında karşılaşılan geoteknik zorluklar; Johoku Chuo Parkı ikiz pnömatik kesonları ve 102,2 metre derinliğindeki Shirokita açık kesonu vaka analizleri üzerinden değerlendirilmiştir. Geleneksel ampirik formüllerle hesaplanan batırma ve direnç kuvvetleri ile sahada ölçülen gerçek kuvvetler (hidrostatik kaldırma, cidar sürtünmesi, uç direnci) karşılaştırılarak, özellikle 35-40 metrenin altındaki derinliklerde tasarım öngörülerinin yetersiz kalabildiği ve sapmaların oluştuğu gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, derin keson mühendisliğinde güvenli bir indirme işlemi için gerçek zamanlı ölçüm sistemlerinin bir gözlem aracı değil, dinamik operasyon yönetiminin zorunlu bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır.
Anahtar Kelimeler: *Keson, pnömatik keson, açık keson, gerçek zamanlı izleme.*

ABSTRACT

This paper examines the historical development, design principles, and real-time in-situ monitoring systems of open and pneumatic caisson methods, which are frequently preferred in urban infrastructure projects due to their high bearing capacity and rigidity in Japan. Geotechnical challenges encountered in deep caisson sinking operations are evaluated through case studies of the Johoku Chuo Park twin pneumatic caissons and the 102.2-meter-deep Shirokita open caisson. By comparing driving and resisting forces calculated with conventional empirical formulas against actual forces measured in the field (hydrostatic uplift, skin friction, tip resistance), it is demonstrated that design predictions can fall short, especially at depths below 35-40 meters, leading to deviations in resistance. The findings reveal that for a secure sinking process in deep caisson engineering, real-time monitoring systems are not merely observation tools but a mandatory component of dynamic operation management.
Keywords: *Caisson, pneumatic caisson, open caisson, real-time monitoring.*

1. GİRİŞ

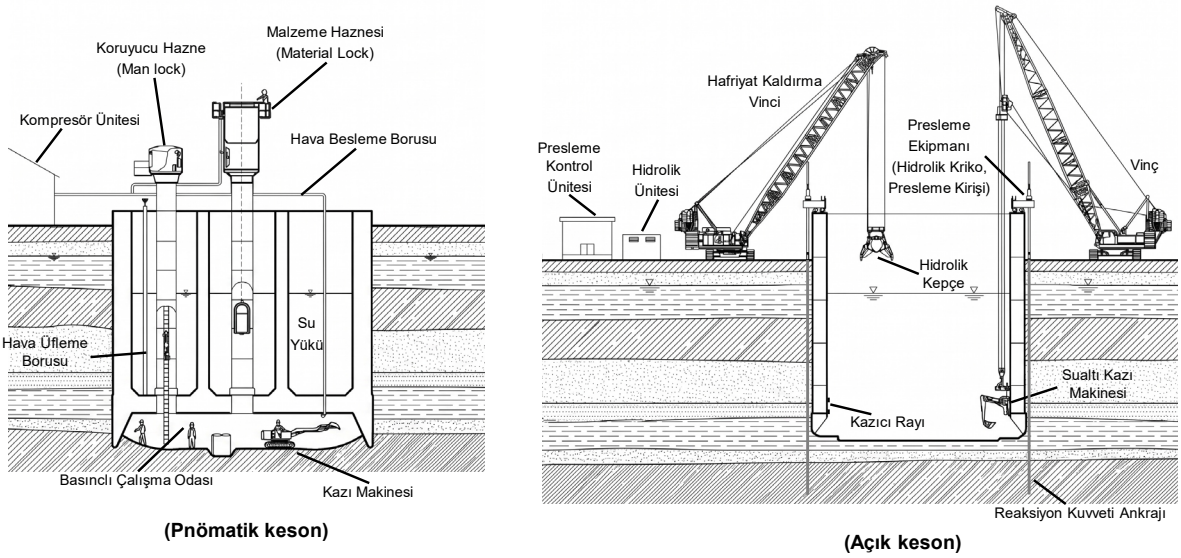
Nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu kentsel alanlarda, yeraltı yapılarının verimli kullanımı ve taşkın kontrolü gibi kritik altyapı ihtiyaçları, devasa boyutlu derin temel sistemlerinin inşasını zorunlu kılmaktadır. Yüksek taşıma kapasitesi, sismik dayanım ve yapısal rijitlik sunan keson temeller, bu zorlu mühendislik projelerinde sıklıkla tercih edilmekle birlikte; zemin içerisine kontrollü bir şekilde batırılması aşamasında karmaşık zemin-yapı etkileşimlerinden kaynaklanan ciddi geoteknik riskler barındırmaktadır. Bu bildirinin amacı,

[1] Dr. Bölüm Şefi, TODA CORPORATION, feyzullah.gulsen@toda.co.jp (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Bölüm Müdürü, TODA CORPORATION, makoto.tone@toda.co.jp

açık ve pnömatik keson yöntemlerinin temel prensiplerini ve Japonya'daki tarihsel gelişimini özetleyerek; devasa derinliklerde sahada uygulanan gerçek zamanlı ölçüm sistemlerinin önemini ortaya koymaktır. Bu kapsamda, Japonya'da inşa edilmiş mühendislik rekorlarını temsil eden Johoku pnömatik kesonu ve Shirokita açık kesonu vaka çalışmaları üzerinden, tasarım aşamasında geleneksel ampirik formüllerle öngörülen batırma kuvvetleri ile arazide ölçülen gerçek değerler karşılaştırmalı olarak analiz edilmektir.

2. KESON İNŞA YÖNTEMLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ

Kesonlar; genelde yüzey kotunda inşasına başlanarak kendi ağırlığı, su yükü ve presleme ekipmanlarıyla istenilen derinliğe batırılan, yüksek rijitliğe sahip derin temel inşa yöntemidir. Yeraltı alanlarının kullanımını artırmak amacıyla geliştirilen bu yapılar; zemin koşullarına, yer altı su seviyesine, iş güvenliğine, teslim süresine ve maliyet gereksinimlerine göre açık veya pnömatik keson seçilebilir. Şekil 1'de her iki yöntemin uygulama açısından sahip olduğu farklılıklar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Pnömatik ve açık keson yöntemlerinin şematik gösterimi.

Açık keson, üst ve taban kısmı tamamen açık olan dairesel veya dikdörtgen kesitli içi boş gövdelerdir. Bu gövdeler tasarım gereksinimlerine göre farklı tiplerde üretilebilmekte olup; betonarme, öngermeli betonarme veya çelik yapılardan oluşabilmektedir. Yapı, zemin üzerinde inşa edildikten sonra, içindeki zemin hidrolik kepçeler veya su altı kazıcılar vasıtasıyla kazılır. Zemin boşaltıldıkça, keson; yanal zemin sürtünmesi ve uç direnci aşılarak, hidrolik presleme krikoları ve kendi ağırlığı altında kademeli olarak batırılır. Kazı işlemi, yer altı su seviyesinin üzerinde kuru koşullarda yapılabileceği gibi, yüksek su tablası altında taban kabarmasını ve göçmeleri önlemek amacıyla keson içi suyla dolu tutularak su altında uzaktan kumandalı ekipmanlarla da yürütülebilir.

Pnömatik kesonlarda ise taban kısmında sızdırmaz bir döşeme plakası teşkil edilir ve bu plakanın altında kazı için bir çalışma odası oluşturulur. Bu yöntemde, yer altı suyunun kazı odasına dolmasını önlemek amacıyla odaya dışarıdaki hidrostatik su basıncına eşdeğer veya biraz daha yüksek basınçlı hava pompalanır. Basınçlı hava, suyu tamamen çalışma alanından uzaklaştırarak kazı işlemlerinin kuru ve güvenli koşullarda yapılmasını sağlar.

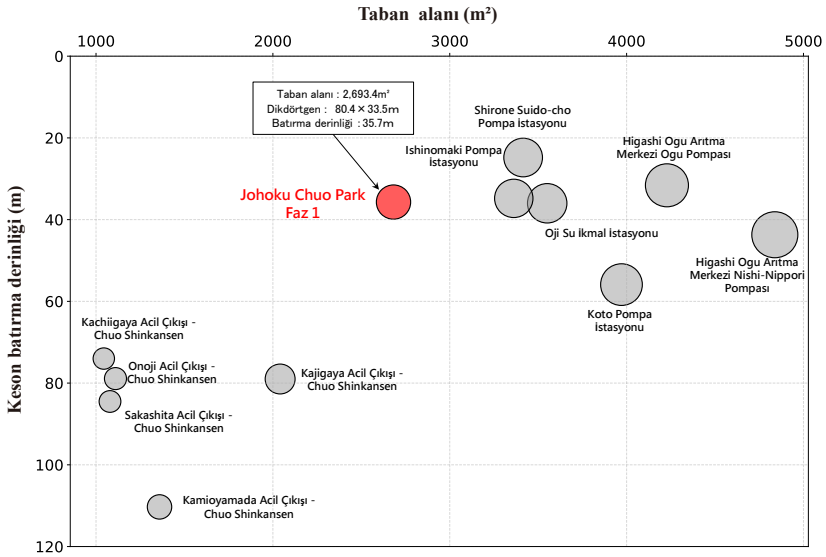
2.1. Keson Yöntemlerinin Tarihsel Gelişimi

Kesonların tarihi süreçte ilk olarak ne zaman kullanıldığı kesin olarak bilinmese de, ilk örneklerin ahşap kasa tipi olduğu düşünülmektedir. İlk uygulamalardan biri 1738 yılında Westminster Köprüsü projesinde Charles Labelye tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk dönemlerde su altı kazılarının dalgıçlarla elle yapılması derinliği sınırlamıştır. Ancak 19. yüzyılın sonlarında çamur pompaları ve mekanik kepçelerin geliştirilmesiyle açık kesonların derinlik kapasitesi artırılmıştır. Katı ve sıkı zeminlerde karşılaşılan yüksek cidar sürtünmesi ile keson pabuç kısmındaki uç direncini aşmak, kazı kalitesini artırmak ve yüksek yer altı su seviyelerinde çalışabilmek amacıyla pnömatik keson teknolojisi geliştirilmiştir. Basınçlı hava kilitlerine dayanan bu yöntemin patenti 1830'da İngiliz mühendis Sir Thomas Cochrane tarafından alınmıştır. İlk saha uygulaması ise 1841 yılında Fransız mühendis Jacques Triger tarafından alüvyal kumlu bir kömür madeni şaftında başarıyla gerçekleştirilmiştir (West, 1988; Cushing ve Sokol, 2007).

2.2. Japonya'daki Keson Uygulamaları

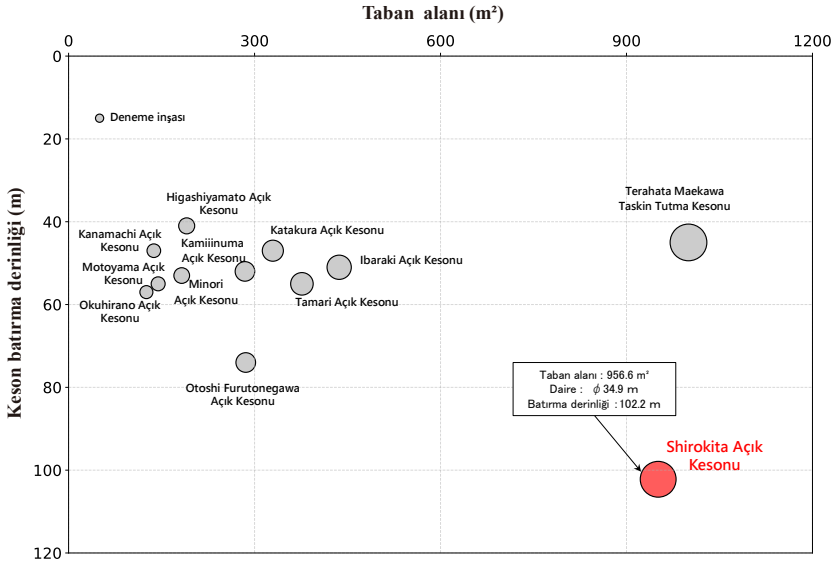
Japonya'nın zorlu zemin koşulları ve yüksek sismik aktivitesi, keson kullanımını yaygınlaştırmıştır. Kesonlar; yüksek rijitlikleri, yanal kuvvetlere karşı dirençleri ve yüksek taşıma kapasiteleri nedeniyle sıkça tercih edilmiştir. 1995 Kobe depremi sonrası yapılan incelemelerde, keson temellerin sismik etkilere karşı kazık temellerden çok daha üstün performans gösterdiği saptanmıştır (Matsui, 1998).

Japonya'daki pnömatik keson uygulamaları ilk kez 1899'da Yokohama Limanı'nda başlamıştır. 1923 Büyük Kanto Depremi sonrası yeniden inşa sürecinde pnömatik kesonlar sistematik olarak kullanılmıştır. 20. yüzyılın sonlarında katı iş güvenliği kuralları ve zorlu zeminler, yüksek otomasyonu zorunlu kılmıştır. 1971'de Minato köprüsü'nde kesonunda tavan raylı ekskavatörlerin kullanımıyla mekanizasyon başlamıştır. Vurgun riskini ortadan kaldırmak için geliştirilen insansız kazı sistemleri, 1990'da Kuramae kesonunda dünyanın ilk tam insansız pnömatik keson uygulaması örneğidir (Hirakawa, 1987). Şekil 2'de görüldüğü üzere son otuz yılda keson boyutları ve derinlikleri oldukça artmıştır. 110 m derinliği ile Japonya'nın en derin pnömatik kesonu olan Kamioyamada acil çıkış şaftı ve Johoku Chuo Park Faz 1 projesinde ise ikiz kesonların toplam 5.386,8 m² taban alanı ile en geniş pnömatik kesondan biri olmuştur (Japan Pneumatic Caisson Association, 2026).



Şekil 2. Taban alanı ve batırma derinliklerine göre Japonya'daki bazı pnömatik keson örnekleri.

Diğer bir uygulama olan açık keson teknolojisi de Japonya'da kritik bir yer tutar. İlk betonarme açık keson 1911'de Kobe limanı inşasında kullanılmıştır. Ancak mekanik kepçelerle yapılan geleneksel kazı yöntemi; yüksek cidar sürtünmesi ve uç direnci nedeniyle uzun süre yaklaşık 50 metre mertebeleriyle sınırlı kalmıştır. Bu engelleri aşmak için 1990 yılında otomatik açık keson yöntemi (SOCS) geliştirilmiştir (Tani vd., 1996). İnsansız su altı kazı makineleri, üç boyutlu sonar ve GPS sistemlerinin entegre edildiği bu yöntem, ilk kez 1995'te Kasumigaura Su İletim Projesi Tamari açık kesonunda (22,0 m çap, 53,5 m derinlik) kullanılarak geleneksel derinlik sınırlarını aşmıştır. Şekil 3, Japonya'daki bazı açık keson örneklerini içermektedir. Bu alandaki en büyük örneklerden biri olan Shirokita açık kesonu, 956,6 m² taban alanı ve 102,2 m derinliği ile Japonya'nın en derin açık kesonudur (PC Well Construction Method Study Group, 2026).



Şekil 3. Taban alanı ve batırma derinliklerine göre Japonya'daki bazı açık keson örnekleri.

3. KESON BATIRMA ANALİZLERİ

Kesonların düşey doğrultuda, sapma yapmadan ve emniyetli bir şekilde batırılabilmesi için inşaatın her aşamasında (lot bazında) batırma denge hesaplamaları gerçekleştirilir. Genel amaç; yapıyı aşağı doğru iten düşey kuvvetler ($\sum W$) ile batmaya karşı koyan zemin ve akışkan dirençleri ($\sum R$) arasındaki statik dengesini kurarak, yapının ani bir şekilde göçmesini veya askıda kalmasını engellemektir (Japan Road Association, 2012).

$$\sum W > \sum R \tag{1}$$

Kesonu, zemin içerisine doğru hareket ettiren aşağı yönlü aktif düşey kuvvetler Eşitlik 2 ile hesaplanır:

$$\sum W = \sum W_c + W_s + W_L + W_w + W_p \tag{2}$$

Burada; W_c her döküm aşamasında artan betonarme gövdenin kendi (lot) ağırlığını, W_s ve W_L keson üzerindeki toprak dolgu ve şantiye ekipmanlarından kaynaklanan sürşarj yüklerini, W_w ise keson hücrelerine kontrollü olarak doldurulan su yükünü ifade eder. Pnömatik ve geleneksel açık kesonlarda ağırlık temel itici güç iken; preslemeli açık keson uygulamalarında sistemin batmasını sağlamak için zemin ankrajları ve reaksiyon blokları yardımıyla sisteme ilave edilen ankraj presleme kuvveti (W_p) de bu kuvvetlere dahil edilir (Japan Road Association, 2012).

Kesonun ilerlemesine karşı koyan ve yukarı yönlü etkiyen kuvvetlerinin hesaplanması, Eşitlik 3'deki gibidir.

$$\sum R = U + F_s + R_b \tag{3}$$

Burada; U kaldırma kuvvetini, F_s dış çeper ile zemin arasındaki cidar sürtünme direncini, R_b ise keson pabucunun altındaki zemin taban direncini ifade eder.

Kaldırma Kuvveti (U): Pnömatik kesonlarda en belirleyici direnç, çalışma odasına basılan havanın oluşturduğu yukarı yönlü kuvvettir (U_a). Açık kesonlarda ise hava basıncı odası bulunmadığı için U_a = 0 alınır; ancak su altında kazı yapılıyorsa gövdeye hidrostatik su kaldırma kuvveti (U_w) etki eder.

Cidar Sürtünme Kuvveti (F_s): Her iki yöntemde de sürtünme direnci eşitlik 4 ile kümülatif olarak hesaplanır.

$$F_s = \mu \times S \times \sum(f \times l_i) \tag{4}$$

Burada; μ, sürtünme azaltma katsayısını (örneğin bentonit enjeksiyonu gibi kaydırıcı sıvılar kullanıldığında hesaplamaya dahil edilen düzeltme değeri); S, kesonun zeminle temas eden dış çevre uzunluğunu (m); f, ilgili zemin katmanının birim yanal sürtünme direncini (kN/m²); l_i ise o zemin katmanının kalınlığını (m) ifade etmektedir. Birim yanal sürtünme direnci (f), zeminin türüne ve kesonun derinliğine (x) bağlı olarak Tablo 1'de önerilen değerler ile hesaplanmaktadır (Japan Road Association, 2012). Derin kesonlarda, sürtünmeyi düşürmek için bentonit enjeksiyonu kullanılması zorunludur.

Tablo 1. Zemin türlerine ve keson derinliğe (x) göre birim yanal sürtünme direnci (f) değerleri (Japan Road Association, 2012)

Keson derinliği	8 m	16 m	25 m	30 m	40 m	Yaklaşık Formül
Killi Zemin	5	6	7	9	10	$f = 0{,}167\,x + 3{,}32$
Kumlu Zemin	14	17	20	22	24	$f = 0{,}319\,x + 11{,}81$
Kum-Çakıl	22	24	27	29	31	$f = 0{,}296\,x + 19{,}53$

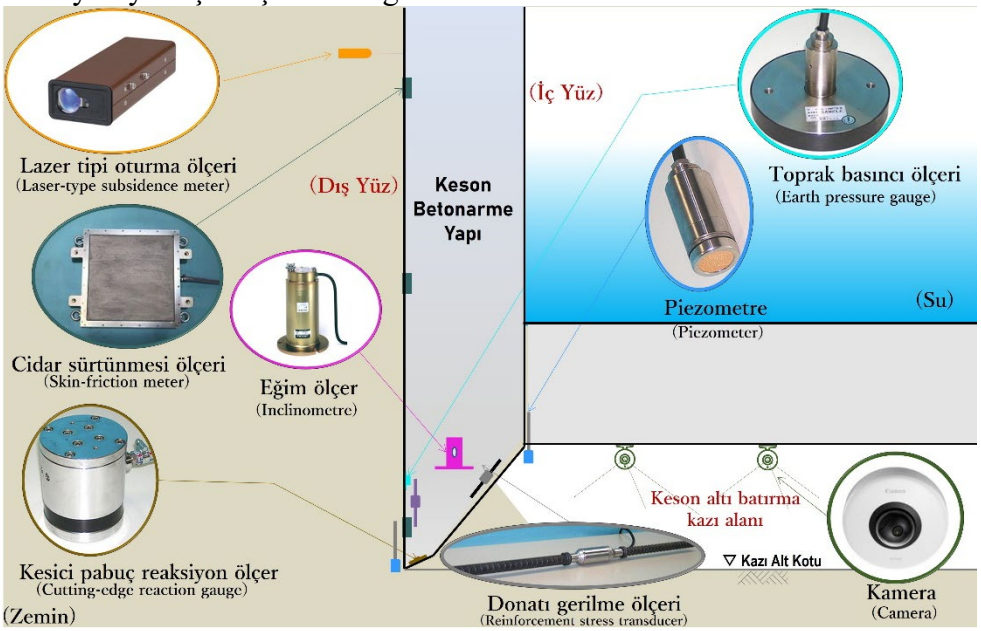
Pabuç Uç Direnci (R_b): hesaplanırken zemin mekaniğindeki geleneksel nihai taşıma gücü formülü (q_d) kullanılır. Ancak keson batırma işlemi sırasında tabanın tamamı zeminle tam temas halinde olmaz. Bu noktada Japonca literatürde "kazı açıklık oranı" (kazılan alanın keson toplam taban alanına oranı) terimi devreye girer. Kesonun batış anındaki gerçek taban direnci (R_b); hesaplanan limit taşıma gücünün, kazılmadan bırakılan ve zeminle teması devam eden "kalan alan" ile çarpılmasıyla elde edilir. Açık kesonlarda ise kazı işlemi su altından, mekanik ekipmanlarla kör noktalardan yürütüldüğü için net taban direncini belirlemek oldukça güçtür. Bu yüzden, açık keson hesaplamalarında taban direnci için daha muhafazakâr güvenlik katsayıları kullanılır.

Ancak ampirik yöntemlere dayanan bu teorik hesaplamalar, çoğu zaman sahadaki gerçek verilerle tam olarak uyuşmamaktadır. Keson ağırlığı ve presleme yükü gibi aşağı yönlü kuvvetler yüksek hassasiyetle hesaplanabilse de özellikle cidar sürtünmesi ve pabuç uç direnci gibi reaktif kuvvetler zemin koşullarına ve kesonun eğimi gibi birçok parametreye bağlı olarak büyük sapmalar gösterebilmektedir. Bu belirsizlikler nedeniyle, keson inşaatlarında güvenli ve kontrollü bir batırma teşkil edebilmek için sahadaki gerçek kuvvetlerin yerinde, anlık olarak ölçülmesi ve değerlendirilmesi elzemdir.

4. KESONLARDA ÖLÇÜM EKİPMANLARI

Kesonlar indirilirken; değişken zemin dirençleri ve eksantrik yükler nedeniyle riskler barındırır. Kontrolsüz oturmalar veya aşırı doğrultu sapmaları yapıda kalıcı hasarlara yol açabileceğinden, batırma aşamasında gövdeye etkiyen geoteknik parametrelerin ve yapısal iç kuvvetlerin kesintisiz ölçümü zorunludur.

İmalat ve batırma sürecindeki izleme faaliyetleri; yapısal tepkiler, zemin-yapı etkileşimi ve doğrultu kontrolü olmak üzere üç temel kategoride toplanabilir. Yapısal güvenliği denetlemek için beton içi donatı gerilme ölçerler (reinforcement stress transducer) kullanılır. Zemin-yapı etkileşimi kapsamında, yanal toprak basıncı ölçerler (earth pressure cell), boşluk suyu basınç ölçerler (piezometer) ve cidar sürtünme ölçerler (skin-fiction meter) mevcuttur. Ayrıca, pabuç kısmına entegre edilen reaksiyon ölçerler (cutting-edge reaction gauge)ile uç dirençleri ölçülür. Yönsel sapmaları engellemek amacıyla sisteme eğim ölçerler (inclinometer) dahil edilir. Pnömatik uygulamalarda, çalışma odası hava basıncı ayrıca kontrol edilir. Tipik bir keson batırma operasyonunda kullanılan ölçüm ekipmanları ve enstrümantasyon yerleşimi Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Tipik bir keson ölçüm ekipmanları şematik gösterimi.

Özellikle pnömatik kesonlarda insanlı kazı yapıldığı durumlarda, sızdırmaz çalışma odasındaki hava basıncının sürekli ölçümü ve kontrolü iş güvenliği açısından elzemdir. Bunun yanı sıra, doğrultu kontrolünü sağlamak için anlık eğim ve kesona etkiyen kuvvetler elde edilip, gerçek ölçüm verileri tekrar işlenerek, kazı ilerleme hassasiyeti optimize edilir.

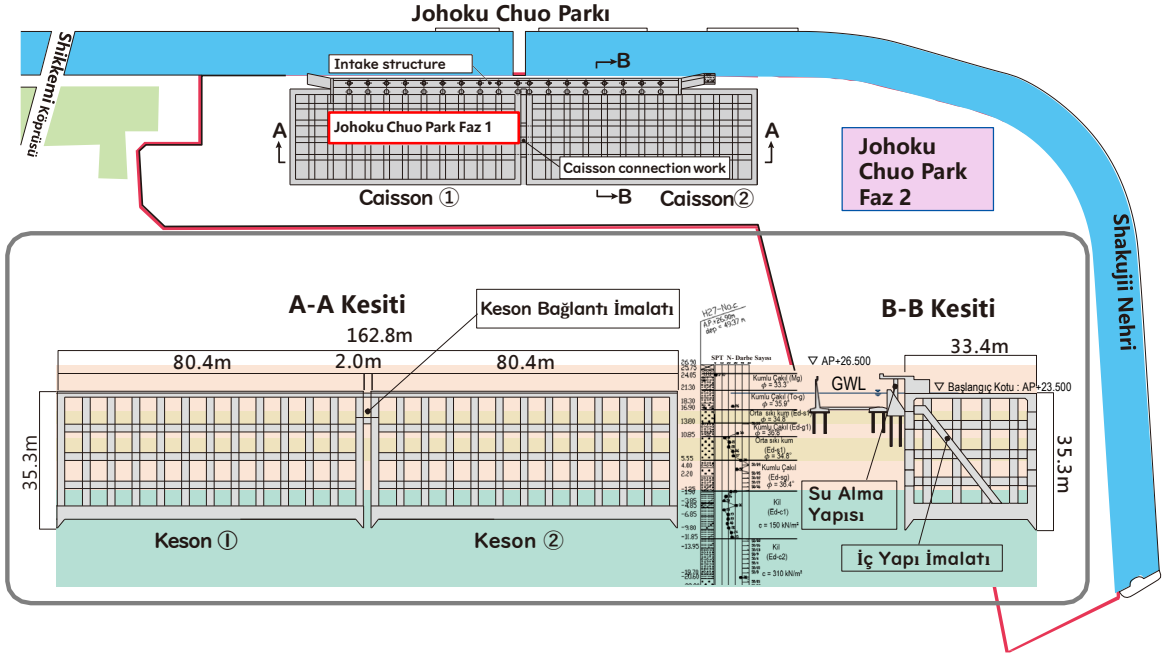
5. VAKA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, Japonya'da inşa edilmiş, kendi alanlarında önemli mühendislik örneklerinden olan iki farklı keson projesinin geoteknik ölçüm sistemleri özelinde incelenecektir.

5.1. Johoku Pnömatik Kesonu

İlk örnek Johoku pnömatik kesonlarıdır. Shakujii nehri boyunca yoğun yağışlara (75 mm/saate kadar) dayanacak şekilde tasarlanan Johoku Chuo parkı düzenleme göleti

içerisindeki yeraltı taşkın kontrol tesisidir. Proje, Şekil 5'te yerleşim planı gösterilen ve aralarında bağlantı bulunan ikiz kesonlardan oluşmaktadır. Batırma işlemi A.P. +23,50 m kotundan başlamış ve A.P. -11,8 m derinliğinde tamamlanmıştır. İkiz pnömatik kesonların her biri 2.693,4 m² taban alanına sahip olup; 33,5 m genişlikte, 80,4 m uzunlukta ve 35,3 m yüksekliktedir. Yapısal yükleri karşılamak için iç iskelet, 2,0 m x 2,0 m ızgara düzeninde kolon ve kirişlerle güçlendirilmiştir. Projedeki en kritik geoteknik kısıtlama, kesonlar arasındaki yalnızca 2,0 m'lik dar açıklıktır. Bu bağlamda, iki yapı arasındaki düşey indirme kot farkının maksimum bir metre olması gerektiği belirlenmiş ve inşaat bu tasarımla yürütülerek, gerçek zamanlı sıkı bir izleme icap etmiştir (Kato ve Watanabe, 2022).



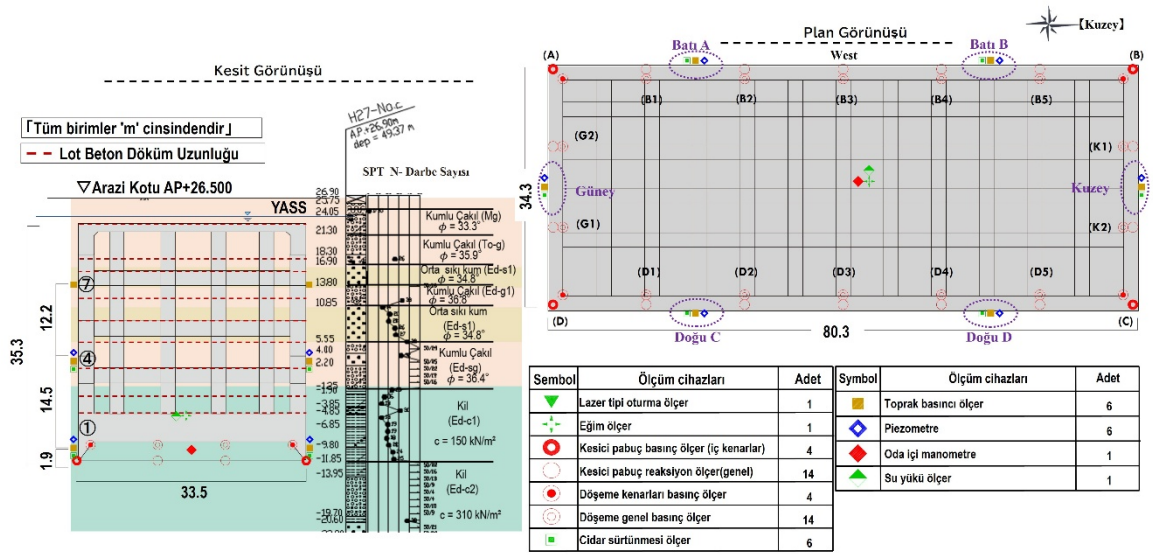
Şekil 5. Johoku Chuo Parkı ikiz pnömatik kesonlarının plan ve kesit görünümleri.

Şantiye alanı, Pleistosen alüvyal ve dilüvyal çökellerden oluşmaktadır. Şekil 5'teki zemin profilinde detaylandırıldığı üzere, üst katmanlarda ince bir dolgu (B) ve A.P. +24,05 m kotuna kadar uzanan düşük kohezyonlu (c = 11,8 kN/m²) yumuşak kil tabakası (Lc) bulunmaktadır. Yüzey tabakasının altında, Standart Penetrasyon Testi (SPT) N değerleri 16 ile 50'nin üzerinde değişen ve içsel sürtünme açıları 33,3° ile 36,8° arasında olan iri daneli tabakalar (Musashino Çakılı, Tokyo Çakılı ve Edogawa Grubu katmanları) yer almaktadır. Taşıyıcı zemin, kohezyonu 150,0 kN/m² olan aşırı konsolide Edogawa killidir (Ed-c1) ve her iki kesonun kesici pabucu A.P. -11,80 m derinliğinde bu tabakaya oturtulmuştur. Yapısal stabilite değerlendirmelerinde sükunetteki toprak basıncı katsayısı (K_0) tüm tabakalar için 0,50 olarak kabul edilmiştir.

Gövdeye etki eden kuvvetleri izlemek için her kesona Şekil 6'da detaylandırılan 58 adet sensör entegre edilmiştir. Uç dirençleri için, 18 adet kesici pabuç reaksiyon ölçeri, tabandan itibaren 1,856 m üzerinde yer alan Lot 1 seviyesinde altı farklı yatay konuma dağıtılmış dış cidar sürtünmesi ölçerleri, toprak basıncı ölçerleri ve boşluk suyu basıncı ölçeri (piezometer) bulunmaktadır. Kesici pabucun 14,50 m üzerindeki Lot 4 seviyesi de sürtünme, toprak basıncı ve boşluk suyu basıncı ölçerleri; 26,70 m yüksekliğindeki Lot 7 seviyesine sığ yatay basınçları izlemek için sadece toprak basıncı ölçerleri eklenmiştir. Lazer mesafe ölçerler ve inklinometre kesonun düşey hizalamasını sürekli olarak takip etmiştir. Gerçek zamanlı veri toplama sistemi, operasyonel müdahalelere olanak tanıyarak batırma stabilitesini sağlamış ve farklı oturmaları önlemiştir.

5.2. Shirokita Açık Kesonu

İkinci örnek olarak da Japonya'daki şimdiye kadar inşa edilmiş en derin açık kesonu olan Shirokita açık kesonunu incelenmiştir. Neyagawa Havzası İyileştirme Projesi kapsamında Osaka'da inşa edilen bu yapı; 34,90 m dış çapa, 28,00 m iç çapa ve 102,20 m derinliğe sahiptir. Neyagawa nehri havzası, Uemachi platosu ve Ikoma dağları ile çevrili olup alanın dörtte üçü nehir seviyelerinin altında kaldığı için taşkınlara karşı oldukça hassastır. Bu riski azaltmak amacıyla 14,3 km'lik derin bir drenaj ağı olan Neyagawa kuzey yeraltı nehri projesi başlatılmıştır. Shirokita kesonu, bu projede düzenleme rezervuarlarının kazılması için bir başlangıç şaftı olarak hizmet vermektedir. Birleşim tünel güzergahının 70 m derinlikte olması nedeniyle, kesonun 102,2 m gibi olağanüstü bir derinliğe batırılması gerekmiştir. Çevredeki yoğun kentsel yerleşim alanlarında 33 cm'ye varabilecek tehlikeli zemin oturmalarına yol açabilecek yeraltı suyu seviyesi düşürme işlemlerinden kaçınmak için pnömatik keson yerine açık keson yöntemi seçilmiştir. Yapı, 3,4 m duvar kalınlığına sahip, 1000 kPa dan fazla su basınçlarına dayanacak şekilde tasarlanmış ve betonarme inşası 16 lot ile tamamlanmıştır (Gülşen ve Tone, 2026).

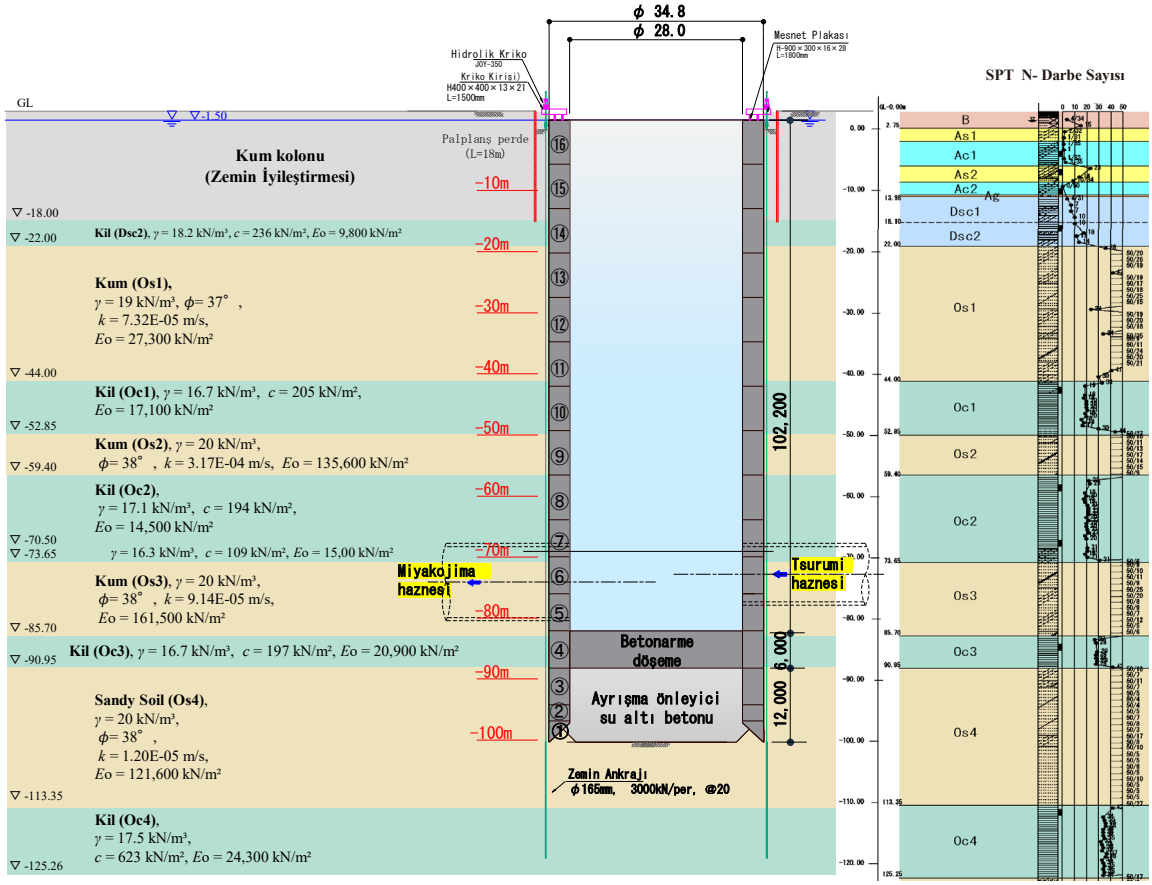


Şekil 6. Johoku projesi ikiz kesonların ölçüm cihazları yerleşim planı.

Şekil 7'de gösterildiği gibi, zemin profili sığ alüvyal çökellerden (0-15 m) başlayarak Pleistosen formasyonlarına geçiş yapmaktadır. Sığ alüvyal tabakalar oldukça yumuşak ve sıkışabilir olduğundan (SPT N < 5), keson başlangıç aşamasında kontrolsüz batma ve aşırı eğilme olabileceği düşünülmüş ve yaklaşık 18 m derinliğe kadar kum kolonu zemin iyileştirmesi uygulanmıştır. Bu iyileştirilmiş kısmın altında yer alan Pleistosen tabakaları; oldukça sert kil (SPT N: 20-35; c : 194-205 kN/m²) ve çok sıkı kum (SPT N > 50; içsel sürtünme açısı 37°-38°) katmanlarından oluşmaktadır. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 1,5 m aşağıdadır. Yapı nihai olarak son derece sıkı kum bir taşıyıcı tabakaya (ϕ : 38°) oturmaktadır. Derin ve sert kili kazmak, sıkı kumlardaki devasa cidar sürtünmesini aşmak ve batırma boyunca boşluk suyu basınçlarını yönetmek, uygulamanın başlıca geoteknik zorlukları olmuştur.

Şekil 8'de sunulan 78 sensörlü entegre sistem batırma sürecini yönetmiştir. Açık kesonun düşeyliğini takip etmek için 2 adet lazer tipi oturma ölçer ve Lot 2 seviyesine 2 adet eğimölçer (±2° aralıklı) yerleştirilmiştir. Pabuca 8 adet kesici pabuç reaksiyon ölçer (25 MPa kapasiteli) yerleştirilmiştir. Kesonun dış yüzeyinde kesici pabucun 1,5 m (Lot 1), 17,5 m (Lot 4), 50,0 m (Lot 9) ve 78,5 m (Lot 13) üzerindeki yüksekliklere simetrik olarak toplam

32 adet cidar sürtünme ölçer (300 kPa kapasiteli) monte edilmiştir. Dış reaksiyonları ve boşluk suyu basınçlarını değerlendirmek için kesici pabucun 1,5 m üzerinde 8 adet toprak basıncı ölçer (5,0 MPa) ile 10 adet boşluk suyu basıncı ölçer (dış yüzeyde 8 adet 2,0 MPa, iç yüzeyde 2 adet 1,0 MPa) konumlandırılmıştır. Ayrıca, uygulamanın yapısal iç gerilmelerini izlemek üzere Lot 1 seviyesindeki donatılar içerisine 16 adet donatı gerilme ölçeri (300 N/mm² kapasiteli) entegre edilmiştir. Tüm bu sensörler otomatik bir veri kayıt sistemine bağlanarak, su altı kazı sistemi ile hidrolik presleme yüklerinin dinamik olarak senkronize edilmesini sağlamıştır.

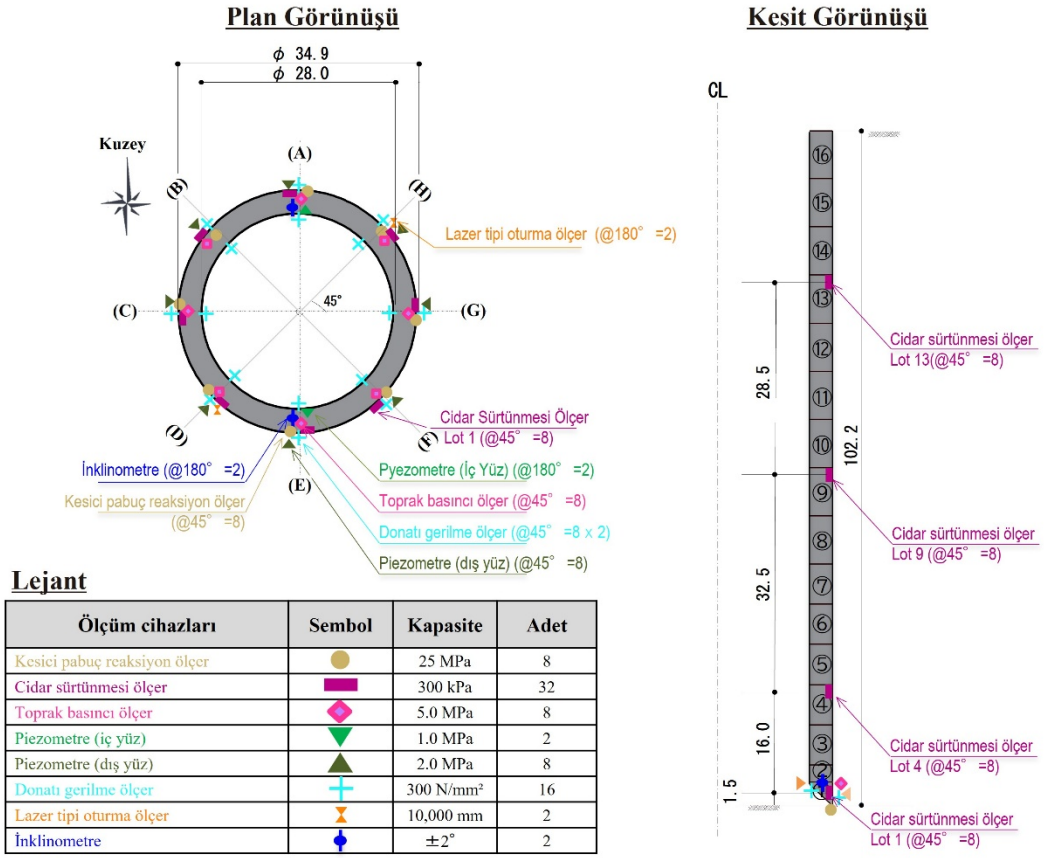


Şekil 7. Shirokita kesonu inşa alanı zemin koşulları ve yapım kesiti.

6. TASARIM VE SAHA ÖLÇÜMLERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

Johoku projesine ait batırma işlemleri sırasında kesona etki eden kuvvetlerin derinliğe bağlı değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere, kesonun nihai derinliği olan yaklaşık -35 metreye inildiğinde, toplam ağırlık (W) ilave su ağırlığı (W_w) ile birlikte 1.100.000 kN seviyelerine ulaşmıştır. Ölçüm verileri incelendiğinde, hidrostatik kaldırma kuvveti (U) için hesaplanan tasarım değerleri (kesikli mavi çizgi) ile sahada ölçülen gerçek değerlerin (kareli mavi çizgi) neredeyse birebir örtüştüğü görülmektedir.

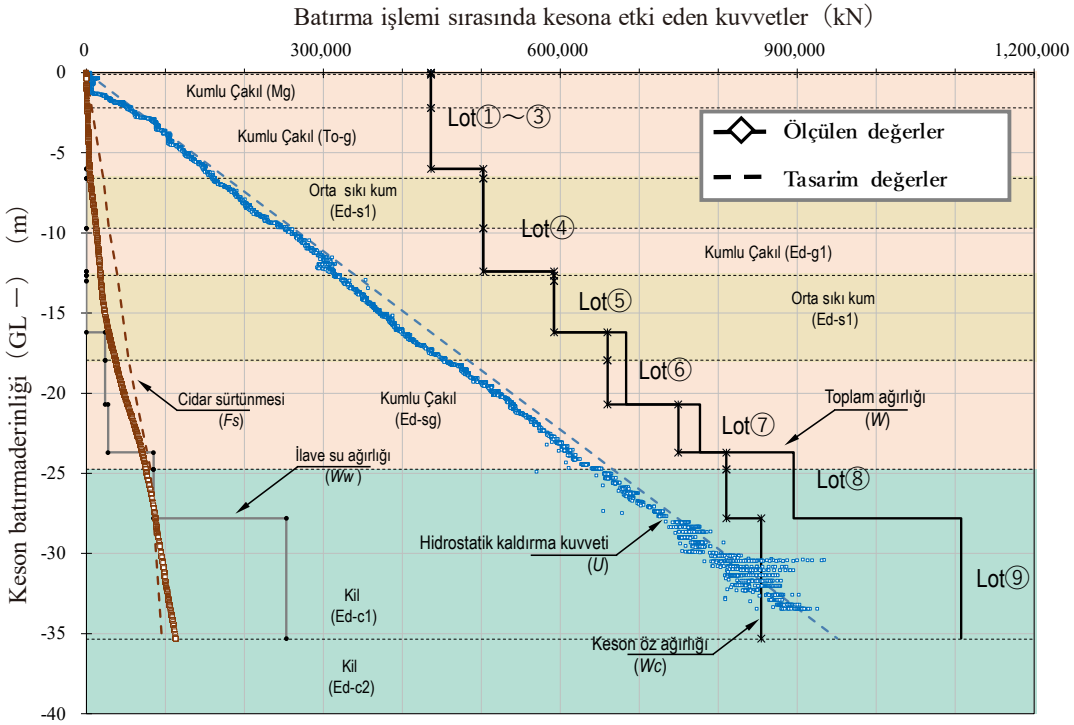
Cidar sürtünmesi (Fs) eğrilerinde ise her ne kadar tasarım değerleri ve ölçüm değerleri birebir uyuşmasa da birinci ve dördüncü lottaki ortalama ölçüm sonuçlar kullanılarak elde edilen genel toplam sürtünme kuvveti, tasarımda öngörülen kuvvetlerle uyumlu olduğu söylenebilir. Bu durum, sürtünme kesici (friction cut) sistemlerin ve bentonit bazlı kaydırıcı enjeksiyonların cidar sürtünme kuvvetlerini dengelediği ve 40 metreye kadar önerilen standart değerlerin, uygulama sonuçları ile tutarlı olduğunu gösterir.



Lejant

Ölçüm cihazları	Sembol	Kapasite	Adet
Kesici pabuç reaksiyon ölçer		25 MPa	8
Cidar sürtünmesi ölçer		300 kPa	32
Toprak basıncı ölçer		5.0 MPa	8
Piezometre (iç yüz)		1.0 MPa	2
Piezometre (dış yüz)		2.0 MPa	8
Donatı gerilme ölçer		300 N/mm²	16
Lazer tipi oturma ölçer		10,000 mm	2
İnklinometre		±2°	2

Şekil 8. Shirokita açık kesonu ölçüm cihazları yerleşim planı.

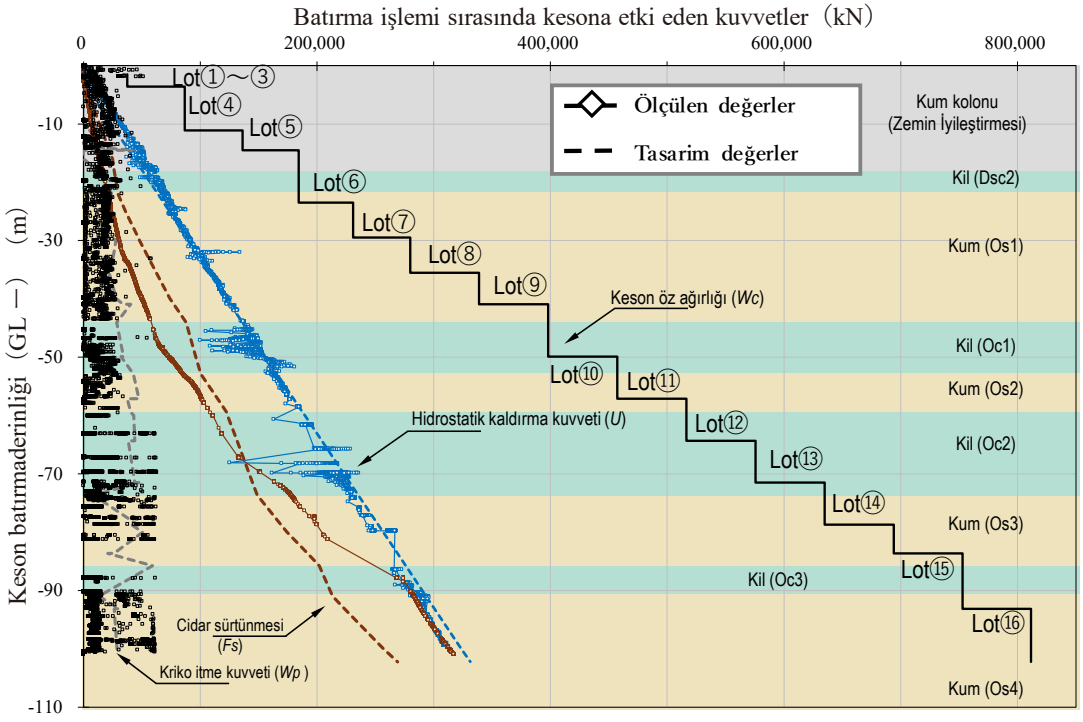


Şekil 9. Johoku pnömatik kesonu tasarım ve yerinde ölçüm kuvvetlerinin derinliğe bağlı değişimi.

Şekil 10'da verilen Shirokita açık kesonu verileri ise, ultra derin kesonlarda zemin davranışının ampirik yaklaşımlardan saptığını göstermektedir. Hidrostatik kaldırma kuvveti

(U) genel eğilim olarak tasarım değerlerini takip etse de özellikle -50 m ve -70 m derinliklerindeki sert kil (Oc1, Oc2) katmanlarından geçişler sırasında ani yatay dalgalanmalar sergilemiştir. Bu durum, meydana gelen ani göçme olaylarının, boşluk suyu basıncına etkisini yansıtmaktadır.

En çarpıcı fark ise cidar sürtünmesi (Fs) değerlerinde ortaya çıkmıştır. Sığ derinliklerde, tasarım ve ölçüm değerleri uyumlu seyrederken, derindeki kum ve kil katmanlarına girildikçe ölçülen cidar sürtünmesi (sürekli kahverengi çizgi), tasarım öngörülerini (kesikli kahverengi çizgi) aşmıştır. Nihai -100 metre kotunda sahada karşılaşılan gerçek sürtünme direnci, teorik tasarım öngörülerini yaklaşık %135'ine ulaşmıştır. Bu durum, 40 metreye kadar önerilen geleneksel hesaplamaların, sahadaki gerçek davranışı tam olarak yansıtmadığını göstermektedir. Ortaya çıkan bu aşırı direnci yenebilmek ve kesonu batırmaya devam edebilmek için, grafiğin en solunda siyah veri noktalarıyla gösterilen hidrolik kriko itme kuvveti (W_p) devreye sokulmuştur. Bu kapsamda 60.000 kN'a varan maksimum tasarım değerlerinde aktif presleme yükleri uygulanmış, gerektiğinde kazı alanı genişletilerek keson indirme işlemi başarıyla tamamlanmıştır.



Şekil 10. Shirokita açık kesonu tasarım ve yerinde ölçüm kuvvetlerinin derinliğe bağlı değişimi.

7. SONUÇLAR

İki projeden elde edilen bu saha verileri, derin keson mühendisliğinde çok net bir gerçeği ortaya koymaktadır: Sığ katmanlarda geleneksel taşıma gücü ve sürtünme formülleri işlevsel olsa da 35 metrenin üstündeki derinliklerde karşılaşılan yüksek yanal gerilmeler ve sıkışma etkileri, zemin direncini teorik sınırların çok ötesine taşımaktadır. Johoku projesinde alınan aktif önlemlerle sürtünme baskılanırken; Shirokita gibi ultra derin projelerde ortaya çıkan devasa direnç sapmaları, gerçek zamanlı ölçüm sistemlerinin salt bir "gözlem" aracı olmadığını, aksine presleme krikoları gibi aktif yapısal müdahaleleri yönlendiren zorunlu bir "dinamik operasyon yönetim" aracı olduğunu kanıtlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu projelerin hayata geçirilmesi sürecinde gösterdikleri özveri ve teknik sahadaki yüksek dirayetleri sebebiyle TODA Şirketi mühendislik kadrolarına kalbî teşekkürlerini ve minnetlerini sunmayı bir vazife addederler.

KAYNAKLAR

Cushing, A.G. ve Sokol, N.K. (2007), "History of subaqueous tunneling in New York City", Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, CO.

Gülşen, F. ve Tone, M. (2026), "In-situ monitoring and sinking behavior of a 102 m giant caisson: A case study of the Shirokita open caisson", ARMS14-The 14th Asian Rock Mechanics Symposium, Japanese Society for Rock Mechanics.

Hirakawa, S. (1987), "Historical study of pneumatic caisson method in Japan (Part 2)", 7th Annual Conf. on Historical Studies in Civil Engineering, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Tokyo, Japan, 215-220.

Japan Pneumatic Caisson Association (2026), "Construction records", Erişim adresi: https://www.pneumatic.gr.jp/construction/ (Erişim tarihi: 18 Ağustos 2026).

Japan Road Association (2012), "Specifications for Highway Bridges, Part IV: Substructures", Tokyo, Japan.

Kato, H. ve Watanabe, N. (2022), "国内最大級の平面積を有するニューマチックケーソンの同時沈設", 基礎工, 50(11), 18-21.

Matsui, T. (1998), "Foundation Damage of Structures in Kobe Earthquake and Remediation", Proceedings of the Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri S&T, Paper No. SOA-8, 1-28.

PC Well Construction Method Study Group (2026), "Super Open Caisson System", Erişim adresi: https://www.pc-well.gr.jp/socs.php (Erişim tarihi: 18 Ağustos 2026).

Tani, Y., Nakano, M., Okoshi, M., Maeda, S., Isa, H. (1996), "Research & Development of Automatic System for Open Caisson Method", Proceedings of the 13th ISARC, Tokyo, Japan, 323-332.

West, G. (1988), "Innovation and the Rise of the Tunnelling Industry", Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
c	Kohezyon değeri	F_s	Cidar sürtünme direnci
f	Zemin birim yanal sürtünme direnci	K_o	Sükunetteki toprak basıncı katsayısı
l_i	İlgili zemin tabaka kalınlığı	q_d	Nihai taşıma gücü
R_b	Keson pabuç direnci	S	Kesonun dış çevre uzunluğu
SPT-N	Standart penetrasyon testi darbe sayısı	U	Toplam kaldırma kuvveti
U_a	Hava basıncı kaldırma kuvveti	U_w	Hidrostatik su kaldırma kuvveti
W	Kesona etkiyen toplam düşey kuvvet	W_c	Keson (betonarme) öz ağırlığı
W_p	Ankraj presleme (kriko itme) kuvveti	W_s, W_L	Sürşarj yükleri
W_w	İlave su ağırlığı	x	Keson indirme derinliği
μ	Sürtünme azaltma katsayısı	ΣR	Yukarı yönlü karşı koyan bileşenler
ϕ	İçsel sürtünme açısı	SOCS	Otomatik açık keson yöntemi
GPS	Global konumlama sistemi		