

Avrasya Denizaltı Tüneli için Üretilen Öndökümlü Betonarme Tünel Segmentlerinin Değerlendirilmesi*

Orhan Manzak¹, Giray Arslan², Olcay Ural³,
Hasan Burak Gökçe⁴, Ergin Arioğlu⁵

Özet

Avrasya Tüneli, İstanbul'un Avrupa ve Asya yakalarını, deniz tabanının altından geçen bir karayolu tüneli ile bağlamaktadır. Toplam uzunluğu 14,6 km olan projenin 3,4 km'lik kısmı, en derin noktası deniz yüzeyinden -106,4 m'den (**~11,0bar**) geçen ve karışık kalkanlı tünel açma makinesi (**TBM**) ile inşa edilen denizaltı tüneldir. TBM tünel için 1.673 ring ve bu ringleri oluşturan 15.057 adet öndökümlü betonarme segment üretilmiştir. 60 cm kalınlığındaki segmentlerin üretiminde, C50/60 beton sınıfında ve en az 100 yıllık servis ömrü esasına göre tasarımı yapılmış olan yüksek performanslı beton kullanılmıştır. Bildiri kapsamında; bağımsız danışmanlarca servis süresi en az 141 yıl olarak kestirilen ve şartnamede tanımlanan maksimum 0,2mm çatlak genişliği sağlanan segmentlerin tasarımı, üretim süreci ve bu süreçteki kalite denetim uygulamaları ile elde edilen verilerin istatikselsel değerlendirme sonuçları konu edilecektir.

1. Giriş

Avrasya Tüneli Projesi, İstanbul'un Avrupa ve Asya yakalarını, deniz tabanının altından geçen bir karayolu tüneli ile bağlamaktadır. İstanbul'da araç trafiğinin yoğun olduğu Kazlıçeşme-Göztepe hattında hizmet verecek olan Proje, toplam 14,6 km'lik bir güzergâhı kapsamaktadır. Sadece hafif araçların (**otomobiller, minibüsler**) geçişine yönelik tasarlanan tünelden günde çift yönde 120.000 aracın geçişi öngörülmektedir.

Projenin 3,4 km'lik bölümü, deniz tabanının altına Tünel Açma Makinesi (**TBM**) ile inşa edilen ve en derin noktası deniz yüze-

Evaluation of Precast Concrete Segments Produced for Eurasia Subsea Tunnel

Eurasia Tunnel connects Istanbul's Europe and Asia sides via a highway underneath Bosphorus. 3,4 km part of 14,6 km Project was constructed with a mixed shield tunnel boring machine (TBM) passing through at deepest -106,4 m (-11,0bar) below sea level. A total of 15,057 precast concrete segments that constitutes 1,673 rings were produced for the TBM subsea tunnel. High performance concrete was used for the production of these 60cm thick segments that requires strength class of C50/60 and a service life of minimum 100 years. In the scope of this paper, design and production phases of the segments that can resist at least 141 years according to international independent verifiers and secure the maximum 0,2mm crack width criteria are explained and quality control applications and obtained results were presented in a statistical manner.

yinden -106,4 m'den geçen bir tünelden oluşmaktadır. Bu kısımda, proje için özel tasarlanmış 13,7 m kazı çaplı makine hem kaya hem de zemin formasyonlarını kazabilecek şekilde karışık kalkanlı **-mixshiled-** tipinde tasarlanmıştır. Üretilen makine; 12,0 bar (**120t/m²**) tasarım basıncı ile dünyada 2. sırada, 13,7 metre kazı çapı ile de dünyada 6. sırada ve kazı çapı ile arın (**ayna**) basıncı birlikte değerlendirildiğinde 1. sırada yer almaktadır. TBM denizaltı tüneli projesi kapsamında 1.673 bilezik ve bu bilezikleri oluşturan 15.057 adet ön dökümlü betonarme segment Yapı Merkezinin Paşaköy Tesislerinde üretilmiştir. Günlük ortalama üretim 4 bilezik, yoğun dönemlerde ise 6 bilezik olarak gerçekleştirilmiş ve 17 ayda tamamlanmıştır.

2. Tünel Bileziğinin (Ring) Temel Özellikleri

TBM ile açılan tünelde kaplama olarak kullanılan ringin dış ve iç çapı sırasıyla 13,2 m ve 12,0 m (Şekil 1), genişliği 2,0 m ve kalınlığı 0,6 m'dir. Bilezikler 6 adet

standart, 1 adet kilit ve 2 adet de kilit yanı olmak üzere toplam 9 adet öndökümlü betonarme segmentten oluşan universal düzene sahiptir. Dış çaptaki koniklik sağ ve solda ± 15 mm, toplamda 30mm'dir. Tünelin güzergâhındaki sağ ve sol kurp dönüşleri bu universal düzene içinde; sağ ve sol olarak adlandırılan ve boyutları birbirinden görece farklılaşan bileziklerin kullanımı ile düşey kurp oluşumu da kilit segmentinin konumunun değişimi ile sağlanmıştır. Üretilen bileziklere ilişkin geometrik boyutlar ve tasarıma ilişkin teknik bilgiler topluca Tablo 1'de takdim edilmiştir.

^{1,2)} orhan.manzak@ym.com.tr , giray.arslan@ym.com.tr , Yapı Merkezi Prefabrikasyon, İstanbul

³⁾ Yapı Merkezi ve SK E&C Adi Ortaklığı, İstanbul

^{4,5)} burak.gokce@ym.com.tr , ergin.arioglu@ym.com.tr , Yapı Merkezi Ar-Ge Bölümü, İstanbul

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.



Şekil 1: Avrasya Tünelinin içten görünümü ve kimi geometrik boyutları

Tablo 1: Üretilen segment/bileziklerin geometrik ve teknik özellikleri

Parametre	Değer
Tünel Kazı / Dış / İç Çapları	$D_k = 13,7 \text{ m} / D_d = 13,2 \text{ m} / D_i = 12,0 \text{ m}$
Tünel Kazı / İç Alanı	$A_k = 147,34 \text{ m}^2 / A_i = 113,04 \text{ m}^2$
Ring Düzeni	8 segment + 1 kilit taşı
Ring Uzunluğu	$L_s = 2,0 \text{ m}$ (iç çapın %16,6'sı)
Segment Kalınlığı	$t_s = 0,60 \text{ m}$ (iç çapın %5,0'ı)
Koniklik -dış çapa göre-	Sağ: +15 / - 15 mm (30 mm)
Kilit Taşı Açısı	Sol: +15 / - 15 mm (30 mm)
Proje Beton Basınç Dayanımı	$f_b = 50 \text{ MPa}$ -silindir-
Kalıptan Çıkarılma Dayanımı	$f = 15 \text{ MPa}$ (f_b 'nin %30'u)
Ana ve Diğer Donatıların Akma Dayanımı	$f_{\text{ç,ana}} = 420 \text{ MPa} / f_{\text{ç,diğer}} = 480 \text{ MPa}$
Ana Donatı Çapı	12 x Ø 26,0 mm
TBM Patlatma (bursting) Donatı Çapı	3 x Ø 19,2 mm
Beton Hacmi ve Ortalama Donatı Miktarı	47,5 m ³ /bilezik ve 157 kg/m ³
Sızdırmazlık Contası Türü ve Genişliği	EPDM / 37
Radyal ve Çevresel Sapmalar	1 bağlantıda 2 adet, Ø 28,5 mm
En Ağır Segment Ağırlığı	14,13 t (7/8 segment)
Diğer Segmentlerin Ağırlığı	13,97 t (1., 2., 3., 4., 5., 6., 7. segmentler)
Kilit Taşı Ağırlığı / Bileziğin (Ringin) Toplam Ağırlığı	6,66 t / 119 t

(*) Marmara deniz suyunda bulunan değişik iyon konsantrasyonları şöyledir (tüm birimler ppm (mg/t) cinsindedir): Cl⁻ = 12.840; SO₄²⁻ = 1.940; Na⁺ = 8.050; Ca²⁺ = 380 [3]. Marmaray Projesi kapsamında denizsel çökellerden alınan numunelerin (n=14 adet, numune derinlikleri 1 ila 5 m'dir) Cl⁻ iyon konsantrasyonlarının değişim aralığı 1.200-13.000ppm olup ortalama değeri 6.029ppm'dir (değişkenlik katsayısı, V = %45). Avrasya Tüneli Projesinde alınan zemin numune derinlikleri proje gereğince 31,0-55,4m arasında değişmiştir. 4 adet numunenin Cl⁻ konsantrasyonlarının ortalaması 2.625ppm'dir. Sınırlı veri olmasına rağmen, çökeller içindeki Cl⁻ konsantrasyonu artan derinlikle ciddi bir şekilde azalmaktadır [4].

Kimi öndökümlü kaplama boyutları aşağıda ampirik bağıntılarla [1] tahkik edilmiştir.

- $t_s = 0,0399 D_d + 29,644$; $D_d = 13.200 \text{ mm}$ için $t_s = 556 \text{ mm}$, (3.000mm < D_d < 14.200mm)
- $n_s = 0,0003 D_d + 4,8198$; $D_d = 13.200 \text{ mm}$ için $n_s = 8,78$
- $f_b = 0,323 t_s + 34,658$; $t_s = 600 \text{ mm}$ için $f_b \approx 54 \text{ MPa}$
- $\mu_a = 9 \times 10^{-6} t_s + 0,0051$; $t_s = 600 \text{ mm}$ için $\mu_a = \%1,05$, (200 mm < t_s < 650 mm)

(t_s = segment kalınlığı, D_d = tünel dış çapı, n_s = bilezikteki segment sayısı, μ_a = ana -boyuna- betonarme donatı yüzdesi, f_b = segment betonunun norm basınç dayanımı). [2]'ye göre beton segmente karşı gelen "kalınlık/dış tünel çapı" oranı $D_d = 13.200 \text{ mm}$ için yaklaşık %4,3 olup, segment kalınlığı 568 mm elde edilmektedir. Görüldüğü üzere geniş veriye dayanan ampirik bağıntıların sonuçları tasarımda kabul edilen değerlerle çok iyi uyum içindedir.

3. Tünel Bileziğinin Gereklilikleri

Denizaltı tünel bileziklerinde servis ömrü boyunca istenilen gereklilikler şunlardır:

- Etkiyecek tüm yükleri genel stabiliteyi zedelemeyen taşımalıdır (dayanım koşulu).
- Üretilen betonun ısıl genleşmeler, büzülme/sünme, yüklemeler ve alkali-agrega reaksiyonu sonucunda iç yapısında çatlaklar oluşur. Donatı korozyonuna neden olan CO₂ / Cl⁻ konsantrasyonlarının donatıya ulaşmaması için çatlakların genişliği 0,2mm'den küçük olmalıdır (hacim sabitliği koşulu).
- Deniz suyu ve çökellerinden difüzyon yolu ile CO₂ / Cl⁻ (*) gibi donatı korozyonuna yol açacak konsantrasyonların geçişini önleyecek dayanıklılıkta olmalıdır. Diğer bir anlatımla kullanılacak beton yüksek performanslı beton özelliklerini yerine getirmelidir (dayanıklılık koşulu).
- Özellikle beton karışımında kullanılan enerji tüketimi elverdiği ölçüde en az düzeyde olmalıdır (sürdürülebilirlik koşulu). Ayrıca; dayanıklılık koşulunu sağlayan bileziklerin tünelin işletmesi sırasında oluşacak tamir ve bakım masraflarının çok makul düzeylerde gerçekleşmesi beklenen bir olgudur.

Yerli mühendislik literatüründe "Betonarme Yapılarda Kalıncılık" kitabı [5] ve TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası - İstanbul Şubesi'nin 2003'te düzenlediği 5. Ulusal Beton Kongresi [6] betonun dayanıklılığı üzerinedir. Konunun teorik altyapısı için anılan kaynaklar önerilmektedir.

4. Tasarım Ölçütleri

4.1. Ana Tasarım Ölçütleri

Segmentlerin tasarımı, teknik şartname şartlarına uygun bir kaplama oluşturma hedefine yönelik gerçekleştirilmiştir. Dayanıklılık temel alınarak yapılan tasarım sonucunda;

- Segment üretimlerinde C50/60 sınıfında ve 100 yıllık servis ömrü esasına göre tasarımı yapılmış olan yüksek performanslı betonun kullanılması,
- Betonun "**su / çimento**" oranının $\leq 0,40$ olması,
- Beton paspayı mesafelerinin segmentlerin iç yüzeyinde en az 47 mm, dış yüzeylerde ise en az 50 mm olması,
- Beton karışımı için, normal Portland çimentosu ile silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanıldığı karışım ile sadece cürüflü çimentonun kullanıldığı alternatiflerden birinin tercih edilmesi istenmiştir.

4.2. Betonarme Tasarım Ölçütleri

Segmentlerin tasarımında, ana (**boyuna**) donatılar için ASTM A706 Standardı'na uygun Grade 60 kalitede demirin, kayma (**ladder**) donatılarında ise ASTM A496 Standardı'na uygun, akma gerilmesi en az 485 MPa olan betonarme demirinin birlikte kullanılması öngörülmüştür. Kayma donatılarının füzyon kaynakla ve kayma donatılarının ana donatılara gazaltı kaynakla bağlanması tasarlanmıştır. Ayrıca her üretim günü kaynak çekme deneyinin yapılması tasarım koşulu olarak belirlenmiştir. Seri üretimlerde, her bir bilezik için toplam 7.450 kg demir kullanılmış olup, proje kapsamında toplam 4.300 ton B500C sınıfı kayma donatısı, 9.000 ton B420C sınıfı ana **-boyuna-** donatı hazırlanmıştır.

4.3. Beton Karışım Tasarımı

Segment seri üretiminde gerek Yapı Merkezi Paşaköy Tesislerinin laboratuvarlarında gerekse İTÜ Altyapı Laboratuvarında gerçekleştirilen çok kapsamlı karışım tasarım çalışmalarının sonucunda, C₃A (**trikalsiyum aliminat**) içeriği $\leq 5\%$ olan, düşük hidratasyon ısısına sahip, düşük alkali içerikli CEM-I-42,5N tipi **-Portland-** çimento ile F tipi uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanımı kararlaştırılmıştır. Söz konusu laboratuvar çalışmalarında özenli şekilde izlenen beton özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Birim ağırlık ve hava miktarı
- Betonun işlenebilirlik (**Abrams** çökmesi, yayılma tablasında yayılma) özellikleri
- Kalıp içinde değişik noktalara ısı kaydediciler yerleştirilerek sıcaklık gelişimi
- Silindirik numunelerde (**Ø 150mm x 300mm**) basınç, ve çekme dayanımları, elastik modül, kür yaşı (**erken, 2, 7 ve 28 gün**) değişimleri
- Dökülen betonun 28 günlük yaşını tamamlamasından sonra tam boyutlu deneme dökümünden karotlar alınarak; dayanım, hızlı klor geçirgenliği, klor geçiş katsayısı gibi dayanıklılık büyüklüklerinin belirlenmesine yönelik deneylerin yapılması
- Aynı karot numuneleri üzerinde ince kesit analizi yapılarak betonun boşluk yapısı ve diğer özelliklerin tespit edilmesi
- Aynı zamanda işveren tarafından kaydedilen sıcaklık oluşma değerleriyle gerilme - sıcaklık çözümleri yapılarak çatlak oluşma çekincesi tahkik edilmiştir.

İri agregalar olarak Ömerli Bölgesi'nin yoğun kireçtaşı, ince agregalar olarak aynı kaynaktan yıkanmış-elenmiş kırma kum ile Şile ve Çatalca'dan yıkanmış-elenmiş doğal kum birlikte kullanılmıştır. Kullanılan çimento ve mineral katkılarla uyum sağlayan polikarboksilat kökenli hiper-akışkanlaştırıcı tercih edilmiştir. Hem kılcal çatlak oluşumunu önleyen hem de yangın direncini arttıran polipropilen lif (**1,2kg/m³**) kullanılmıştır.

5. Üretim Aşamaları

Segment üretimleri 4 takım toplam 36 adet kalıpla gerçekleştirilmiştir. Her üretim günü kalıpların temizlenip yağlanmasından sonra hazırlanan donatılar kalıplara yerleştirilerek kalıplar kapatılmıştır. Santralde hazırlanan beton transmikseler ile (**2 adet x 8m³/adet**) üretim holüne taşınmış ve bu üretimler için özel olarak imal ettirilen frekans ayarlı konveyör bant yardımıyla beton kalıplara dökülmüştür.

Üretimler boyunca toplam 14 adet karışım tasarımı geliştirilmiştir fakat tasarım karışımı konusunda bir fikir vermek üzere seri üretimlerde en yaygın kullanılan karışımlara ait teknik özellikler (*) Tablo 2'de topluca verilmiştir. Tablodan fark edileceği üzere, doğal kum kaynağının değişiminden ötürü karışımlarda kullanılan su ve akışkanlaştırıcı miktarları değiştirilmiştir.

Tablo 2: En yaygın kullanılan karışım tasarımlarının özellikleri

Karışım Parametreleri	Karışım No: 01	Karışım No: 02
Çimento Miktarı (kg/m ³) ve Su Miktarı (kg/m ³)	340 ve 143	340 ve 151
İnce Agregası (0 - 5 mm) ve İri Agregası (5 - 22 mm)	732 ve 1.128	891 ve 943
Toplam Agregası (kg/m ³)	1.860	1.834
Uçucu Kül (kg/m ³) ve Silis Dumanı (kg/m ³)	60 ve 20	60 ve 20
Katkı Maddesi Miktarı (kg/m ³)	2,01	2,31
Su / Çimento Oranı	0,42	0,44
Su/(Çimento+Uçucu Kül+Silis Dumanı) Oranı	0,34	0,36
Su / Eşdeğer Bağlayıcı Oranı	0,36	0,38
Mikro Silika / (Çimento+Uçucu Kül+Silis dumanı)	0,05	0,05
İnce Agregası / Toplam Agregası Oranı	0,39	0,49
İri Agregası / Toplam Agregası Oranı	0,61	0,51
Toplam Agregası / Çimento Oranı	5,47	5,40
Çökme Miktarı (mm) ve Yayıma Miktarı (mm)	190 ve 430	220 ve 470
Taze Beton Hava Miktarı (%)	2,2	2,5
Taze Beton Birim Ağırlığı (kg/m ³)	2.440	2.410

(*) Denizaltından geçen Storebaelt Tüneli'nin (uzunluğu ~7,9 km, iç çapı 7,7 m, segment kalınlığı 40 cm, hidrostatik su basıncı 2,0-7,5 bar, minimum proje basınç dayanımı 45MPa) bileziklerinde kullanılan yüksek performanslı beton karışımı Avrasya Tüneli'ndeki beton karışımına çok benzemektedir. Eşdeğer "Su / Bağlayıcı Madde" oranı 0,31 olan beton karışımlarının basınç dayanımları 80MPa düzeyinde gerçekleşmiştir [7, 8]. Denizaltı tünel segmentlerinden alınan 12 yıllık karotlarda ölçülen klor geçirgenlik katsayısı 1,0-1,5x10⁻¹³m²/sn'den daha küçük elde edilmiştir [7]. İlginçtir ki, bu değerler kıyı yapılarında kullanılan yüksek performanslı betonlardan daha küçüktür.

Hazırlanan bu karışım tasarımında kullanılan çimento miktarı Fransız beton pratiğinde betonun servis süresince maruz kalacağı çevresel koşulların şiddeti (A katsayısı; normal betonlar için A=550, çok agresif koşullar için A=700, Avrasya Tüneli'nin fiziksel koşulları için A=600 alınabilir) ve maksimum agrega çapına (d_{mak}) bağlı olarak kullanılan yaygın bağıntıya göre [9] kontrol edilecek olursa, Avrasya Tüneli segmentlerinde 340kg/m³ çimento kullanımının uygunluğu görülmektedir:

$$M_{c,min} = \frac{A}{\sqrt[5]{d_{mak}}} = \frac{600}{\sqrt[5]{19}} \approx 333 \text{ kg/m}^3$$

Kalıplara takılmış olan vibratörler yardımıyla beton yerleştirilmiş, üretimi tamamlanan kalıbın yüzey düzeltme işlemi sonrasında kalıplara mevsim koşullarına uygun olan kür uygulanmıştır. Kür, yaz aylarında ıslak keçe ve telis ile kalıpların üzeri örtülüp bu örtüler sürekli ıslatılarak, kış aylarında ise kalıpların üzeri kür brandaları ile örtüldükten sonra 50,0°C de en fazla 4 saat buhar kürü uygulaması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasında belirli periyotlarda beton iç sıcaklık gelişimi izlenerek sertleşme sırasında betonda çatlak çekincesi açısından süreç kontrol altında tutulmuştur. Kalıplarda kür sürecini tamamlayan ürünler, beton dayanımının yeterli düzeye (≥15MPa) ulaştığı belirlendikten sonra kalıplardan alınarak önce üretim alanı içindeki ön stok alanına stoklanmıştır. Burada ürünlerin kürüne en az 96 saat süreyle devam edilmiş ve yine mevsim koşulları gözetilerek ürünler bu stokta sürekli sulanarak veya örtülerek korunmuşlardır. Ön stok alanındaki kür sürecini tamamlayan segmentlerin contalama işlemi yapılarak nihai stok alanına nakledilmişlerdir.

6. Kalite Denetim Aşamaları

Segmentlerin üretiminde uygulanan kalite denetim çevrimi; ham maddelerin denetimi, taze beton ve yarı ürün denetimleri ve bitmiş ürün denetimleri olarak üç ana başlık altında değerlendirilebilir. İzleyen bölümlerde kalite denetimine yönelik yapılan çalışmalar ve değerlendirmeler yer ekonomisi temini için belirli bir ayrıntıda anlatılacaktır (**ayrıntılar için bakınız [10]**).

6.1. Taze Beton Deneyleri

Üretim sırasında, taze beton kalite denetimleri segment ba-

Tablo 3: Segment üretimlerine ait taze beton özelliklerinin istatistiksel değerlendirmeleri

İstatistiksel Büyüklükler	Beton Sıcaklığı (°C)	Yayıma (cm)	Hava Miktarı (%)	Beton Birim Ağırlığı (kg/m ³)
Deney Sayısı (n)	14.997	14.994	1.356	1.407
En Küçük Değer (x _{min})	7,5	31,0	1,6	2.371
En Büyük Değer (x _{max})	36,3	59,0	3,2	2.480
Aritmetik Ortalama (̄)	23,7	44,1	2,3	2.432
Standart Sapma (s)	5,6	2,3	0,3	22,0
Değişkenlik Katsayısı (v)	23,6	5,3	13,1	0,9

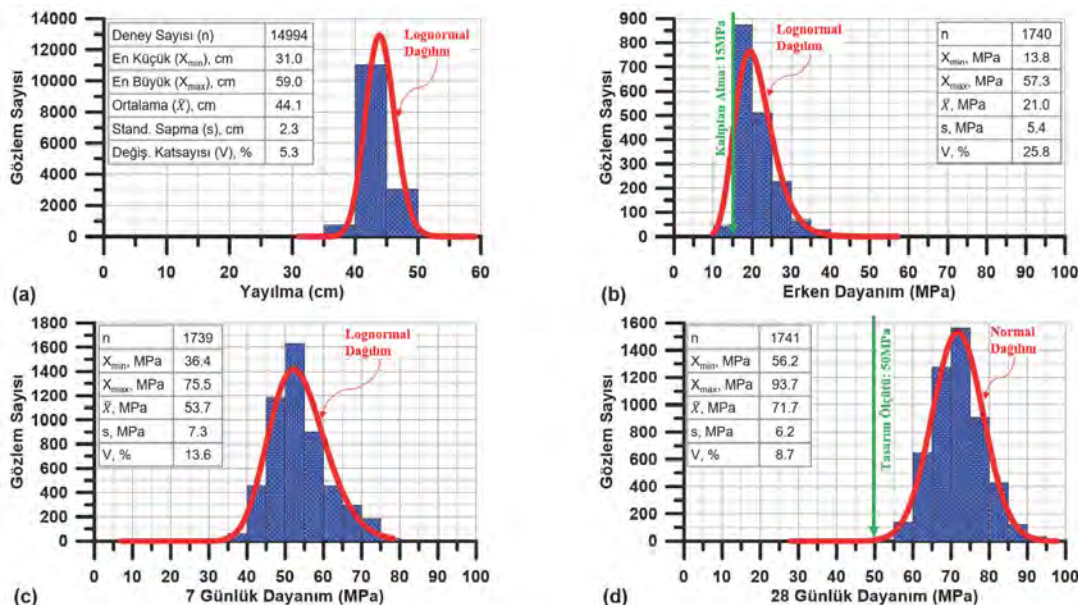
Not: $V = s / \bar{x} \times 100, \%$

Tablodan hemen fark edileceği gibi taze beton birim hacim ağırlığının yapılan 1.407 deneyde değişkenlik katsayısı $V = \%0,9$ gibi çok düşük düzeyde elde edilmiştir. V'nin çok küçük değer alması beton karışımının üretim süreci boyunca çok üniform biçimde gerçekleştiğini ifade etmektedir. Bilindiği gibi anılan büyüklük büyük ölçüde kullanılan agreganın birim hacim ağırlığı ve karışım su miktarının bir fonksiyonudur [11]. Ayrıca, üretilen taze betonların yayılma değerleri ağırlıklı olarak 42-46 cm aralığında değişerek ortalama 44 cm değeri elde edilmiştir. Diğer taze beton büyük-

lükleri olan taze beton birim ağırlığı ve hava miktarı ortalama değerleri de sırasıyla 2.432 kg/m³ ve %2,3 elde edilmiştir.

6.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

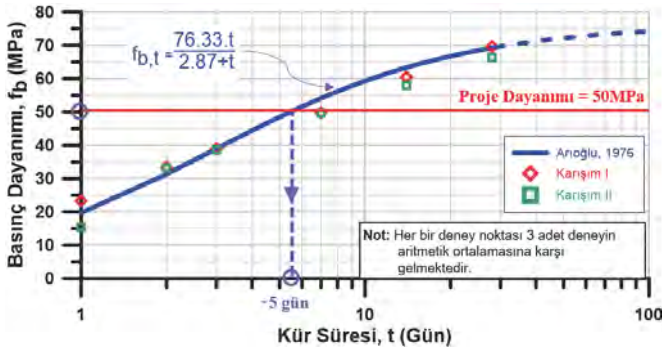
Üretim sırasında her ring için bir set numune (**10 adet Ø150mm x 300mm silindir**) hazırlanmıştır. Bunlarla üretilen betonun erken (**1-3gün**), 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Üretim sürecinde gerçekleştirilen üretimlerden elde edilen basınç dayanımlarının istatistiksel değerlendirmeleri ve dağılımları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Yayılma ile erken (1-3 gün), 7 ve 28 günlük dayanım deney verilerine ait histogramlar ve kimi istatistik bilgiler

Kalıptan alma dayanım limiti en az 15MPa olarak belirlenen erken dayanımların ortalama 21MPa, 50MPa olarak belirlenen 28 günlük proje basınç dayanımlarının ortalaması 72MPa olarak gerçekleştirilmiştir. 28 günlük dayanım baz alındığında, seri üretimde uygulanan kalite denetim çalışmalarının düzeyi [12]'ye göre, "**%7,0 < V=%8,7 < %9,0**" ile "çok iyi" olduğu anlaşılmaktadır. Üretimlerin 30'luk kümeler halinde yapılan istatistiksel değerlendirmelerinde ise hareketli değişkenlik katsayısı 3-8% arasında kaldığı belirlenmiştir [13]. Ayrıca erken dayanım ile 7 günlük dayanım (f_7) ortalamalarının 28 günlük ortalama dayanıma (f_{28}) oranları da sırasıyla 0,29 ve 0,75 olarak elde edilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda " f_7/f_{28} " oranının ortalaması 0,60-0,65 [15] iken yüksek dayanımlı betonlarda ise aynı oran mineral katkıların pozulanik etkisiyle 0,75'e ulaşmaktadır.

Paşaköy fabrikasında seri üretimlerle ölçülen 1, 2, 3, 7, 14 ve 28 günlere ait numunelerin basınç dayanımlarının kür süresine bağlı değişimleri için [14]'te sunulan bağıntının İTÜ Altyapı Laboratuvarlarında ölçülen deney sonuçları ile uyumları Şekil 3'te verilmiştir. Açıkta ki, seri üretimler için çıkartılan dayanım-kür süresi regresyon ifadesi söz konusu laboratuvarlarda ölçülen değerlere çok iyi uyum göstermiştir (**ortalama sapma miktarı $\Delta=+ \%4.5$ ile $-\%6.5$**). Dayanım-kür süresi ifadesinde kalıptan alınma dayanımı $f=15\text{MPa}$ koyulduğunda gereken süre analitik olarak $t=0.7\text{gün}$ (**$\sim 17\text{saat}$**) bulunmaktadır.



Beton dayanıklılığının bir önemli ölçütü de hızlı klor geçirimliliğinden elde edilecek Coulomb değeridir. Proje şartnamesinde belirtildiği üzere, yapılacak "hızlı klor geçirgenliği deneyleri"nde herhangi bir tekil deney sonucunun 1.300 Coulomb'u geçmemesi ve deneylerin ortalama değerinin 1.000 Coulomb'un altında kalması istenmektedir. İstenilen bu değerler, [15] standardına göre yapının klor iyonu geçirgenliğinin "çok düşük" (**100-1.000Coulomb**) sınıfta olması beklenmektedir. İTÜ Altyapı Laboratuvarında 28 günlük sertleşmiş beton numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen hızlı klor geçirimliliği ve klor geçirimlilik katsayıları Tablo 4'te sunulmaktadır. Açıkça görüleceği üzere, gerek Karışım-1 ve gerekse Karışım-2 için hesaplanan ortalama değerler sırasıyla 434 ve 239 Coulomb değerleriyle istenilen 1.000 Coulomb limitinin çok altında kalmaktadır. En uç hızlı klor geçirimliliği değeri " $\bar{X}+3S$ " kavramı dikkate alındığında bile betonların klor geçirgenliği başka bir anlatımla donatı korozyonu açısından herhangi bir çekince oluşturmayacağı ifade edilebilir.

Şekil 3: İTÜ Altyapı Laboratuvarlarında ölçülen 1 ve 2 nolu karışımlara ait silindirik numunelerin basınç dayanımı-kür süresi değerlendirmeleri

Tablo 4: İTÜ Altyapı Laboratuvarında yapılan dayanıklılık deneylerinin istatistiksel değerlendirmeleri

Karışım No	Hızlı Klor Geçirimliliği (Coulomb)									Klor Geçirimlilik Katsayısı ($10^{-12} \times \text{m}^2/\text{s}$)								
	Deney sonuçları						\bar{X}	S	V(%)	Deney sonuçları						\bar{X}	S	V(%)
1	490	471	472	364	412	396	434	46	11	2,5	3,1	2,4	3,2	2,7	2,6	2,8	0,3	10,8
2	213	168	208	291	284	267	239	45	19	2,1	1,7	1,7	2,0	2,4	2,0	2,0	0,3	12,5

Not: \bar{X} = ortalama değer, S = standard sapma, V = değişkenlik katsayısı, $V(\%) = S / \bar{X} \times 100$

6.3. Çatlak Kontrolü

Proje kapsamında üretilen toplam 15.057 adet segmentin tamamı üretim sonrası stok sahasında kontrol edilmiş ve çatlak belirlenen segmentler, çatlağın geometrisi ile birlikte kaydedilerek izlemeye alınmıştır. Tasarımcı firmanın hazırlanmış olduğu teknik şartnamede çatlak genişlik üst limiti olarak belirlenmiş olan 0,2 mm dikkate alınarak aşağıdaki sınıflandırmaya göre tamir edilmiştir:

- **Genişliği < 0,1 mm olan çatlaklar**, çok kılcal çatlak (**fissür**) olarak tanımlanmış ve bu tür çatlak içeren segmentler herhangi bir tamir işlemi yapılmadan kullanılmıştır.

- **Genişliği 0,1-0,2 mm arasındaki çatlaklar**, tamir edilmiştir.
- **Genişliği > 0,2 mm olan çatlaklar** içeren segmentler doğrudan kullanım dışı ürün olarak sınıflandırılıp fireye ayrılmıştır.

Genişliği 0,1-0,2 mm arasında yer alan ve tamir sınıfına ayrılan çatlaklar silan esaslı empenye tamir malzemesi kullanılarak tamir edilmiştir. Bu yöntemle tamir edilen toplam çatlak boyu 15.533 cm'dir. Bu miktar proje kapsamında üretilen toplam segment sayısına bölüldüğünde, segment başına düşen ortalama çatlak boyu 1,03 cm olarak elde edilmektedir. Çatlak belirlenen segmentlerin dağılımı Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5: Çatlak belirlenen segmentlerin dağılımı

Çatlak Genişliği (mm)	Durum	Segment Sayısı (Adet)	Toplam Üretime Oranı (%)
0 - 0,2	Tamir Edilen	256	1,7
> 0,2	Fireye Ayrılan	50	0,3

Not: Toplam üretilen segment sayısı 15.057 adettir.

7. Sonuçlar

İstanbul'un nüfus artışı nedeniyle kıtalar arası ulaşım altyapısına kalıcı çözümler getirecek yatırımlar gerekmektedir. Günde 120.000 araca hizmet edebilecek Avrasya Tüneli, boğaz üzerindeki var olan köprülerin yüklerini hafifleterek İstanbul'daki trafik sorununa katkı getirmekle birlikte ulaşım sürelerini düşürerek emisyon miktarlarında, yakıt tüketiminde ve araç bakım masraflarında azalma gerçekleştirerek ulusal ekonomimize "olumlu katkı" sağlayacaktır. İstanbulluların hizmetine sunulan bu yapının uzun yıllar kalıcı olmasının en önemli bileşeni tünel içini kaplayan öndökümlü betonarme tünel segmentlerinin dayanımı ve dayanıklılık kalitesidir. Bu amaca ulaşmak için üretilen segmentler üzerinde gerek işletme laboratuvarında ve gerekse dış laboratuvarlarda olmak üzere 55.000'in üzerinde kalite denetimine yönelik deney yapılmıştır.

Kalite denetim deneyleri sonucunda, segmentlerin 28 günlük ortalama basınç dayanımları 72MPa (**tasarım hedefi 50MPa**) ve standart sapma 6MPa'dır. Hesaplanan değişkenlik katsayısı %8,7 olup, üretimdeki denetim düzeyinin [12]'ye göre "çok iyi" olduğunu işaret etmektedir. Ortalama klor geçirgenliği 337 Coulomb (**tasarım limiti 1.000 Coulomb**) olan yüksek performanslı öndökümlü betonarme elemanlar 100 yıl servis süresi hedeflenerek üretilmiştir. 17 ay gibi bir za-

man diliminde Yapı Merkezinin Paşaköy Tesislerinde üretilen 80.000 m³ segment betonunun uluslararası sertifika kuruluşunca yapılan analiz ve simülasyonlarda, segment ömürlerinin en az 141 yıl (**tasarım limiti 100 yıl**) olduğu rapor edilmiştir [16]. Çatlak genişliği 0,2 mm'den büyük olan üretimlerin toplamın %0,3'ü gibi çok düşük bir oranda kalması da segmentlerin seri üretimi sırasında kalite ve denetime gösterilen önemin bir başka sonucudur.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmanın yapılmasında gösterdikleri yakın ilgi ve akademik destekleri için Yapı Merkezi Holding A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Dr. Müh. Ersin Arıoğlu'na, Yapı Merkezi İnşaat Yönetim Kurulu Başkanı İnş. Y. Müh. Başar Arıoğlu'na, Yapı Merkezi Prefabrikasyon Genel Müdürü Sayın Fuat Hatipoğlu'na, Yapı Merkezi AR-GE Bölümü'nden Yük. Müh. Pınar Toru Şeker'e ve tasarımda / üretimde / inşasında emeği geçen tüm çalışanlara teşekkür etmeyi yerine getirilmesi gereken bir görev sayarlar. Ayrıca İTÜ Altyapı Laboratuvarı Direktörü Prof. Dr. Yılmaz Akkaya ve çalışanlara deneylerin yapımında gösterdikleri akademik ilgi için teşekkür ederler. Çalışmada belirtilen tüm görüş ve değerlendirmeler yazarlarına ait olup; Yapı Merkezi, diğer herhangi kurum ve kuruluşu bağlamaz.

Kaynaklar

1. Lombardi, "Precast Concrete Lining Tunnel", www.provincia.lecco.it/wp-content/uploads/2011/03/Lombardi-PRECAST-CONCRETE-LINING-TUNNEL.pdf, Eriřim Tarihi (26.12.2016).
2. Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specifications for Tunnelling - 2006: Shield Tunnels", **published by Tunnel Engineering Committee, 271 pages**, 2006.
3. Akman, M. S., "Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi", **İTÜ Yayını, Sayı: 1481, İstanbul, 245 sayfa**, 1992.
4. Yapı Merkezi AR-GE Bölümü, "Evaluation of the Organic Matters and Heavy Metals in Marmaray Project and İstanbul Strait Road Tube Crossing Project", **Yapı Merkezi - SK E&C Adi Ortaklığı için hazırlanan Teknik Rapor, No: 12-11, 17 sayfa**, 2011.
5. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., "Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", **Genişletilmiş 2. Baskı, Türkiye Hazır Beton Birliği, 318 sayfa**, 2010.
6. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası - İstanbul Şubesi, "Betonun Dayanıklılığı (Durabilite)", **5. Ulusal Beton kongresi, Ekim, 603 sayfa**, 2003.
7. Edvardsen, C.K., "Deterioration Modelling Model Verification Through In-Situ Tests Great Belt Link Tunnel (Denmark)", **Safe & Reliable Tunnels - Innovative European Achievements, 1st International Symposium, Prague, 177-188**, 2004.
8. Braestrup, M. W. "Danish strait crossings: Lillebælt, Storebælt, Øresund and Femern Bælt", **Marine Concrete Structures - Design, Durability and Performance edited by Edited by Mark Alexander, Chapter-11, 287-319**, 2016.
9. Dreux, G., "Mise En Oeuvre Des Bétons", **Bétons, Center Des Hautes Etudes De La Construction, Paris**, 1993.
10. Hatipoğlu, F., Manzak, O, Arslan, G. "İstanbul Boğazı Karayolu Tüneli Öndökümlü Betonarme Segmentleri", **Yapı Merkezi Prefabrikasyon - Proje Kapanış Sunusu, Paşaköy, İstanbul**, 2016.
11. Teychenne, D.C., Franklin, R.E., Erntroy, H.C., Nicholls, J.C., Hobbs, D.W., Marsh, D.W., "Design of Normal Concrete Mixes - Second Edition", **Building Research Establishment Ltd., Watford, 41 pages**, 1997.
12. ACI Committee 363, "Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete", **American Concrete Institute Report # 363.2R-98, 18 sayfa**, 1998.
13. Yapı Merkezi AR-GE Bölümü, "All Statistical Evaluation for the Concrete Used for the Reinforced Precast Tunnel Segments", **Yapı Merkezi - SK E&C Adi Ortaklığı için hazırlanan Teknik Rapor, No: 70-15, 24 sayfa**, 2015.
14. Arıoğlu, Ergin, Alper, H., Odbay, O., "Beton Dayanımının Erken Kestirimi", **Beton Prefabrikasyon, Sayı: 30, 15 - 18**, 1994.
15. ASTM C1202-12, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM International, 2012.
16. Danish Technological Institute, "Service life prediction of bored tunnel segment", **Yapı Merkezi - SK E&C Adi Ortaklığı için hazırlanan Teknik Rapor, 48 sayfa**, 2013.