



AVRASYA TÜNELİ PROJESİ'NDE ÖZEL KONULAR: GEOTEKNİK, KAZI TEKNOLOJİSİ, BETON KAPLAMALAR



Prof. Dr. Müh. Ergin ARIOĞLU ve Dr. Müh. H. Burak GÖKÇE

6 Kasım 2017

İMO – İstanbul Şubesi – Karaköy



UYARI

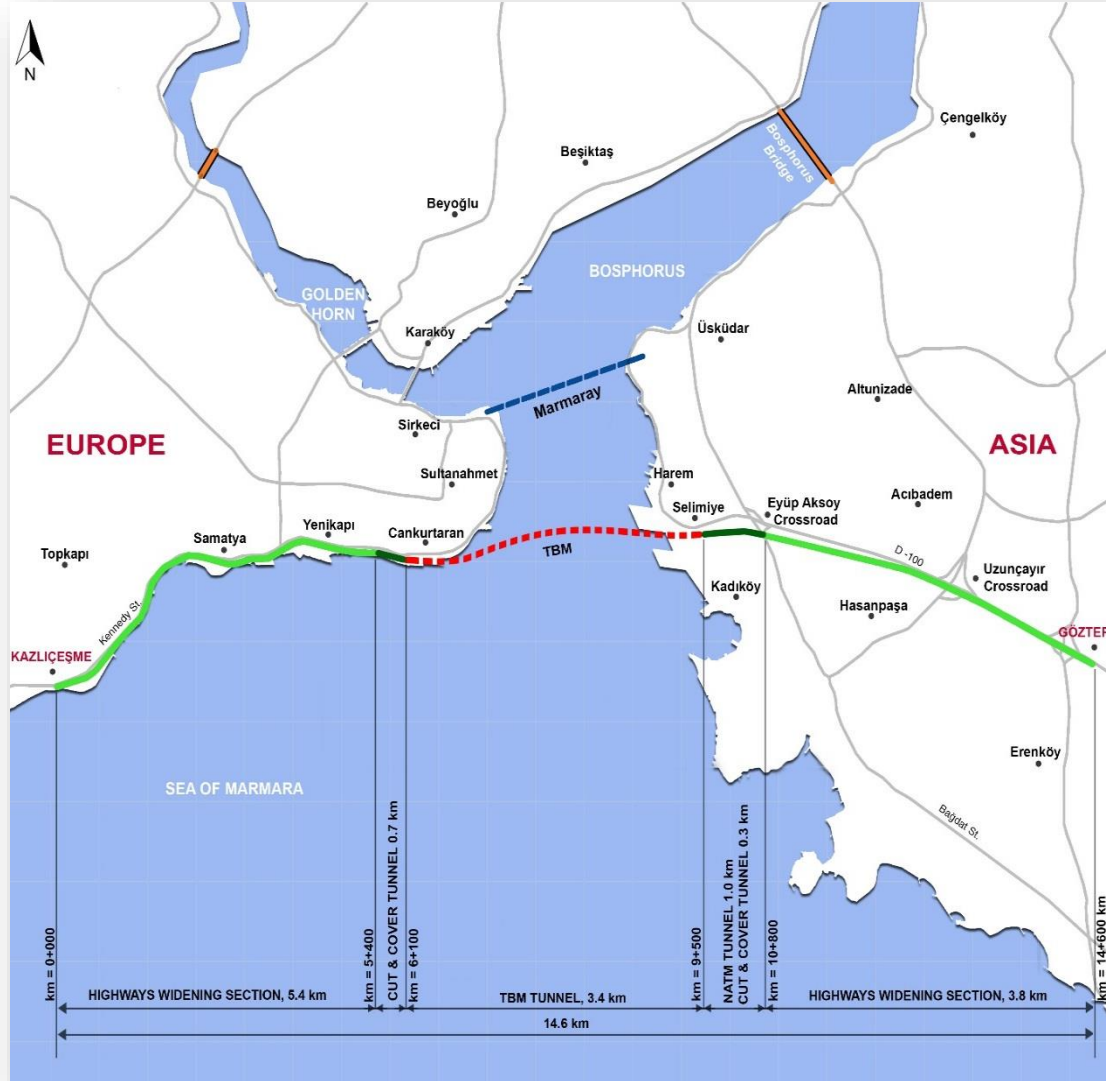
- © 2017 Yapı Merkezi Construction and Industry Inc. All Rights Reserved. Except as otherwise permitted by Yapı Merkezi Construction and Industry Inc., this publication, or parts thereof, may not be reproduced in any form, by any method, for any purpose.
- © 2017 Yapı Merkezi İnşaat ve San. A.Ş. tüm hakları saklıdır. Yapı Merkezi İnşaat ve San. A.Ş.'nin izni olmadan bu dökümanın tamamı ya da belli bir parçası herhangi bir şekilde, herhangi bir amaç için tekrar basılamaz, üretilemez ve kullanılamaz.
- <http://www.ym.com.tr/>



- Bu çalışmanın sunulmasını destekleyen taraflara teşekkür ederiz.
 - **İdare:** T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı,
Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM)
 - **Görevli Şirket:** Avrasya Tüneli İşletme, İnşaat ve Yatırım A.Ş. (ATAŞ)
 - **Yüklenici:** Yapı Merkezi ve SK EC Ortak Girişimi (YMSKJV)
 - **Yapı Merkezi:** Yönetim Kurulu Üyeleri
 - **TMMOB – İMO – İstanbul Şubesi**
- Bu çalışmada sunulan malzemeler “kaynak” verilmek suretiyle kullanılabilir.
- Bu sunuda ileri sürülen görüş ve sayısal değerlendirmeler tamamen yazarlara aittir. Yukarıda adı geçen kurumları bağlamamaktadır.



PROJE BİLGİLERİ





- **Model:** Build – Operate – Transfer
- **Total Investment:** ~1,3 Billion \$
- **Construction Period:** 55 Months
 - Road and tunnel structures
- **Operation Period:** ~ 26 Years

- **Total Project Length:** 14.6 km
 - Part-1: Europe side (5,4 km)
 - Part-2: Bosphorus Crossing (5,4 km)
 - Part-3: Asia side (3,8 km)

- **1st and 2nd bridges (total 7x2 lanes)**
 - 180.000 (1st) and 220.000 (2nd) crossings per day
- **Eurasia Tunnel (2x2 lanes)**
 - 110.000 crossings per day (both directions)



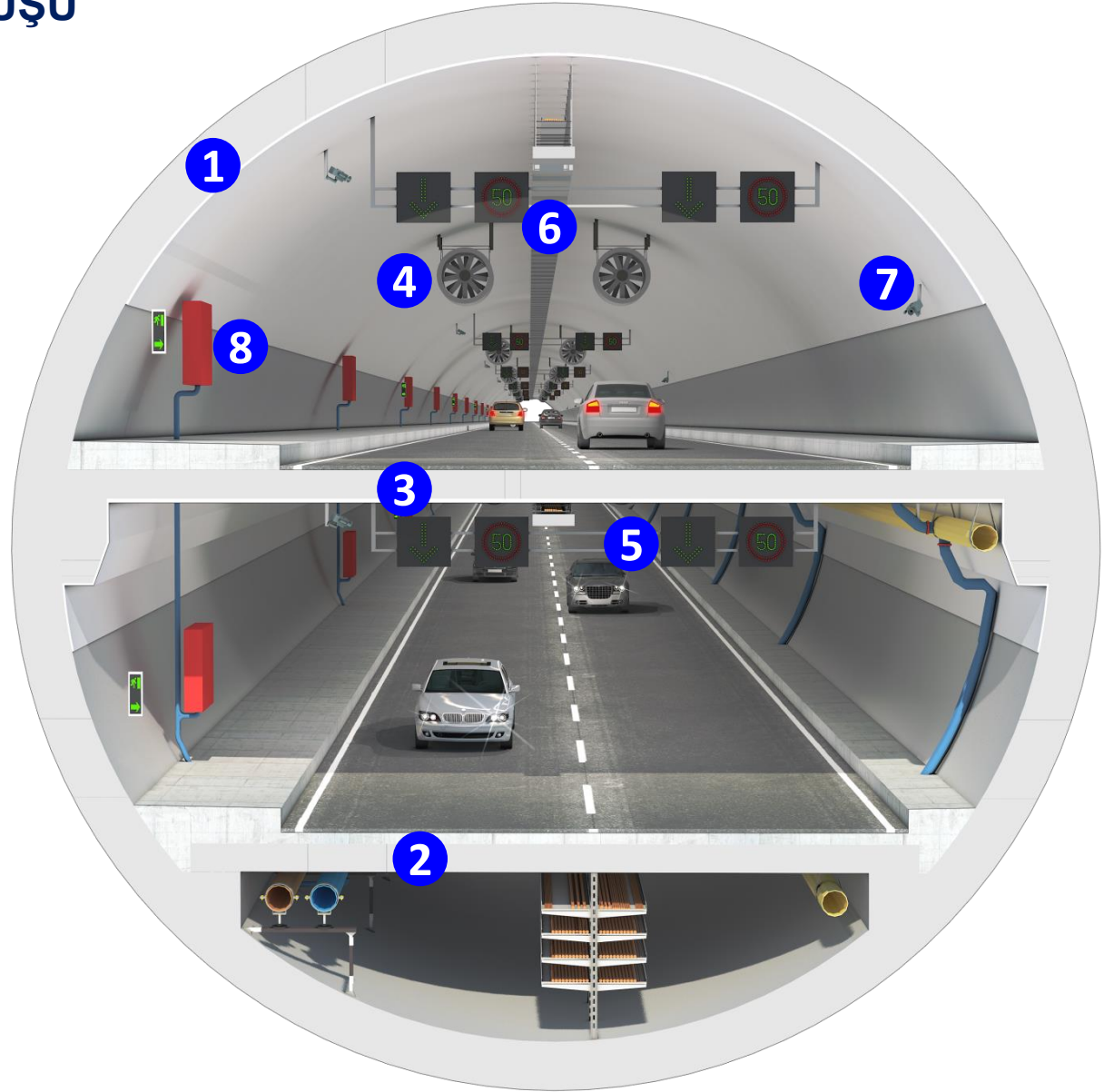
❖ PROJENİN KAZANDIRACAKLARI

- **Hız**  ➤ **Kısa Seyahat Süresi**
100 dk.'dan 15 dk.'ya
- **Ekonomi**  ➤ **Yakıt Tüketimi**
Kısa seyahat süresinin yakıt tüketimi üzerindeki pozitif etkisi
- **Güvenlik**  ➤ **Yüksek Seviye**
Doğal afetlere uygun tasarım
24 saat kapalı devre sistemi
Hız kontrolü
- **Konfor**  ➤ **Yüksek Seviye**
Sürüş konforu gözetilmiş özel iç-mimari tasarım
Sis, yağmur, buzlanmaya karşı korunaklı
- **Çevreye Duyarlı**  ➤ **ÇSED Raporu**
Kültürel mirasa saygı (*UNESCO World Heritage Centre gözetiminde*)
Yapılarda yükseklik limiti (*7.0 m*)
Hava kalitesi
Tarihi yarımadaya daha az trafik yükü (*Haliç, Galata ve Boğaziçi Köprüsünde trafik yüklerinde %30 azalma*)
Kamuoyu ve Paydaşlarla danışma süreci

❖ TÜNELİN İÇTEN GÖRÜNÜŞÜ

- Segmentler (1)
- Alt Tabliye (2)
- Üst Tabliye (3)
- Havalandırma (4)
- Sinyalizasyon (5)
- Işıklandırma (6)
- Kamera Sistemi (7)
- Acil Müdahale Kutuları (8)
- Bazı Ölçüler

- Segment Kalınlığı : 60 cm
- Üst tabliye kalınlığı : 36 cm
- Alt tabliye kalınlığı : 50 cm
- Üst kat yüksekliği : 500 cm
- Alt kat yüksekliği : 400 cm

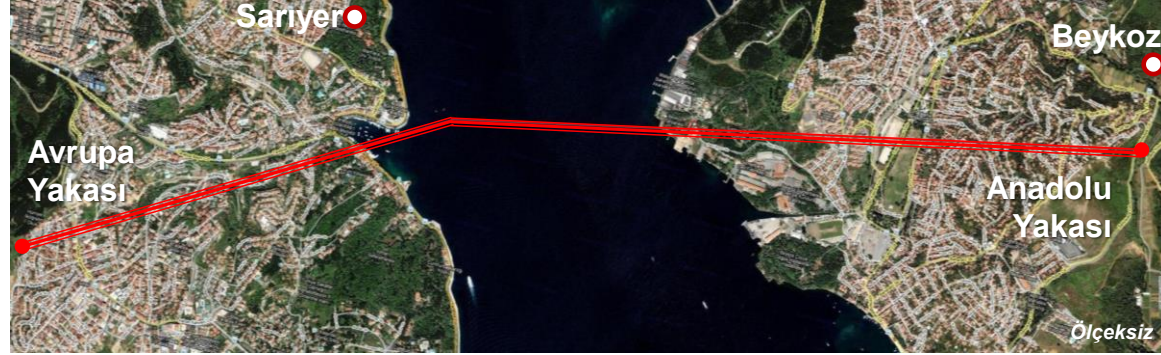


MÜHENDİSLİK JEOLojİSİ VE GEOTEKNİK



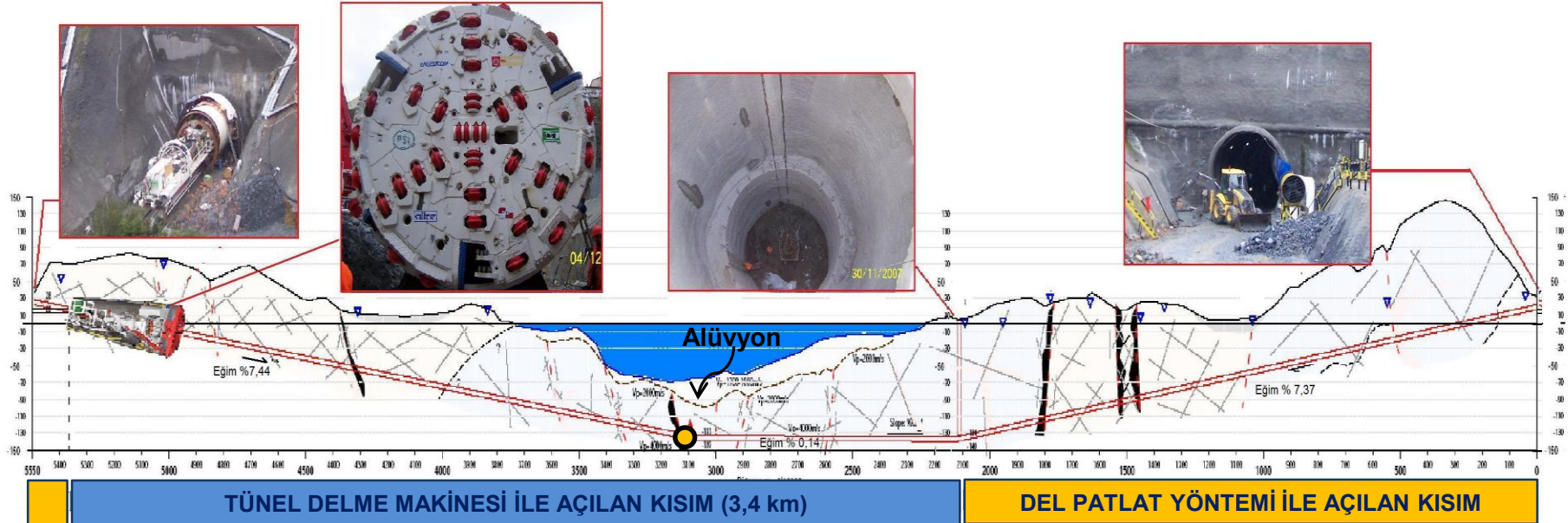
❖ BAŞARILI BİR DENİZALTI TÜNEL ÖRNEĞİ: MELEN PROJESİ

- **Yüklenici:** STFA + Mosmetrostroy ve Türk ALKE
- **Proje Bedeli:** ~120 milyon US\$
- **Tünel Uzunluğu:** 5,5 km
- **EPB-TBM Çapı:** 6,15 m
- **Proje Arın Basıncı:** ~4 bar
- **Minimum Kaya Örtüsü Derinliği:** 35 m
- **TBM Tünelin Mak. Derinliği:** 135 m (65m-deniz)
- **Formasyon:** Dolayoba/Kartal formasyonu



Kaynak: Anagnostou (2010) ve Bakır ve diğ. (2011)

- Killi kireçtaşı, kalkerli şeyl, kumtaşı, GSI: 45-64 (deniz altı bölümü), Dayk (Andesit/diyabaz) kalınlığı: 1 - 70 m



● TBM tüneli en derin noktası

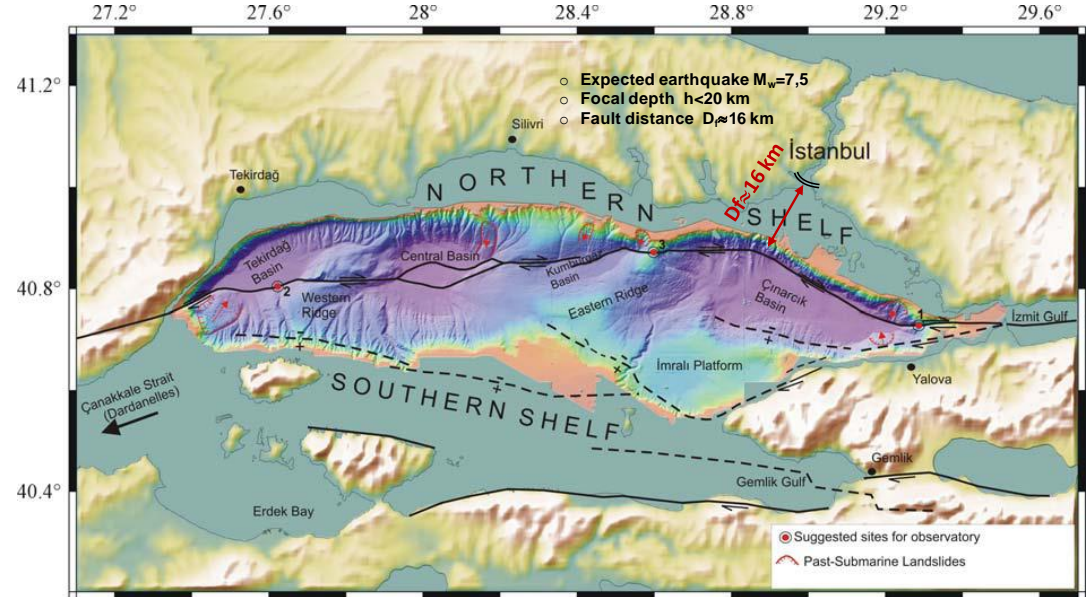
Kaynak: Gerek ve diğ. (2010)

PROJE SAHASININ DEPREMSELLİĞİ

Marmara Denizi Bölgesi	1 – 2000 39.5–41.5K 26.0–31.0D	1900 – 2000 39.5–41.5K 26.0–31.0D
Bölgenin Uzunluğu (km)	420	420
Bölgenin Genişliği (km)	220	220
Yüzey Alanı ($\times 10^4$) km ²	9.2	9.2
Baskın Faylanma Tipi	Sağ Yanal	Sağ Yanal
Ortalama Sismojenik Kalınlık (km)	10	10
Meydana gelen depremlerin toplam sayısı	937	566
M _s Cinsinden depremlerin sayısı	553	445
M _s > 5.0 olan depremlerin sayısı	176	75
M _s > 6.0 olan depremlerin sayısı	82	16
M _s > 6.8 olan depremlerin sayısı	52	8

Kaynak: Ambraseys (2006)

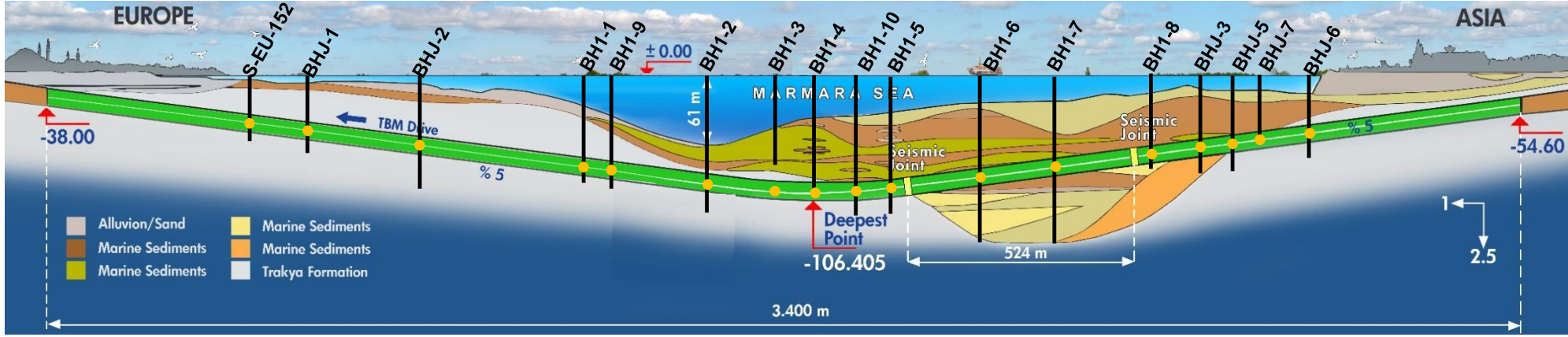
Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ve Avrasya Tünelinin Konumu



Kaynak: http://www.ifremer.fr/esonet_emso/content/download/33356/278218/file/marmara-observatory.pdf

- Bölgede meydana gelen tarihsel ve aletsel dönem depremleri incelendiğinde, özellikle bölgede yer alan doğrultu atım özellikli Kuzey Anadolu fay zonu etkinliği açıkça görülmektedir.
- Avrasya tüneli güzergahının Kuzey Anadolu fay zonu Marmara deniz içerisindeki segmentlere olan uzaklığı yaklaşık 16 km'dir.

AVRASYA TÜNELİ DENİZ SONDAJLARI



Sondaj No	S-EU-152	BHJ-1	BHJ-2	BH1-1	BH1-9	BH1-2	BH1-3	BH1-4	BH1-10	BH1-5	BH1-6	BH1-7	BH1-8	BHJ-3	BHJ-5	BHJ-7	BHJ-6	Ortalama	Standard Sapma,s	Değişkenlik Katsayısı, V, %
Deniz Suyu Derinliği (m)	3	3	8	27	40	62	44	37	35	35	24	22	15	12	12	12	15	24	16	68
Örtü tabakası Derinliği (m)	28	38	47	45	36	27	44	59	54	53	52	45	42	37	33	31	27	41	10	24
Toplam Örtü Tabakası/ Tünel Çapı	2,1	2,5	3,4	3,3	2,6	2,0	3,2	4,3	3,9	3,9	3,8	3,3	3,1	2,7	2,4	2,3	2,0	3,0	0,7	24
Tünel Aksı Derinliği (m)	37,8	48,2	61,5	78,7	82,6	94	98	100	99	97	86	77	67	59	55	53	49	73	21	29

❖ TBM TÜNEL KISMINA AİT ÇÖKEL KALINLIKLARININ DEĞİŞİMİ

Sondaj No	Avrupa Yakası ←										Asya Yakası →														
	S3 ⁽²⁾	S-EU-150/A ⁽²⁾	S4 ⁽²⁾	S-EU-151 ⁽²⁾	S-EU-152	BHJ-1	BHJ-2	BH1-1	BH1-9 ⁽³⁾	BH1-2	BH1-3 ⁽³⁾	BH1-4	BH1-10	BH1-5	BH1-6	BH1-7	BH1-8	BHJ-3	BHJ-5	BHJ-7	BHJ-6	LBH-1 ⁽²⁾	LBH-2 ⁽²⁾	LBH-3 ⁽²⁾	S-AS-101 ⁽²⁾
Çökel Kalınlığı ⁽¹⁾ (Holosen), m	22	16	15	14	11	8	13	7	19	20	37	50	61	65	118	118	101	73	50	40	24	33	27	10	9

Denizel kısmı ifade etmektedir.

⁽¹⁾ Denizel çökeller, holosen yaşlı kum, kil, silt ve yer yer çakıllı birimler içermektedir.

⁽²⁾ Yapay dolguların (*zemin ve çeşitli inşaat molozları*) kalınlıkları dahil edilmiştir.

⁽³⁾ Sondajların çökelleri kesmediği yerler enkesit korelasyonundan elde edilmiştir ve değerler, yuvarlatılarak verilmiştir.

➤ Değerlendirme Notları:

➤ Ortalama çökel kalınlığı, $\bar{X} = 38$ m

➤ En büyük çökel kalınlığı, $X_{\max} = 118$ m (BH 1-7)

➤ En küçük çökel kalınlığı, $X_{\min} = 7$ m (BH1-1)

➤ Çökel kalınlığında, büyük değişimler (*Değişkenlik katsayısı, V = %87*) gözlenmektedir. Bu değişiklik temel yapı ile denetlenen bir çökel biriminin varlığına işaret etmektedir (*Yılmaz ve Sakınç, 1990*).



❖ AVRASYA TÜNEL PROJE SAHASININ GENEL JEOLJİSİ

➤ Trakya Formasyonu

- Bölgenin her iki yakasında yer alan formasyon, üst Paleozoyik yaşlı olup, **kumtaşı/kiltaşı/çamurtaşı** birimleriyle temsil edilmektedir. Bu eski temel Hersinien ve Alpin orojenezinden etkilenmiştir.
- Bu nedenle tüm formasyon **kıvrımlı, çatlaklı/fissürlü** ve **fay/zayıflık zonları** içeren bir yapı sergiler. Alpin orojenizi sırasındaki volkanizma sonucunda oluşan andesit ve diyabaz daykları, Paleozoyik temeli yer yer keserler (Sayar, 1976). Örneğin, projenin Anadolu yakasında tünel açma makinesi 7 adet dayk kesmiştir. Yaklaşık aralıklar ise, 80 - 90 m olmaktadır.

➤ Holosen Çökeller

- Holosen çökeller, (7400 ± 1300), proje sahasının **en genç jeolojik birimidir**. Trakya Formasyonu üzerinde istiflenen çökeller birbirleri ile geçişli acısu-deniz-acısu ve denizel ortamlar içinde gelişmiştir (Meriç, 1990). Çökeller, oluşum koşulları ve genel karakterlerine göre **ince ve iri taneli zeminlerden** oluşmaktadır.

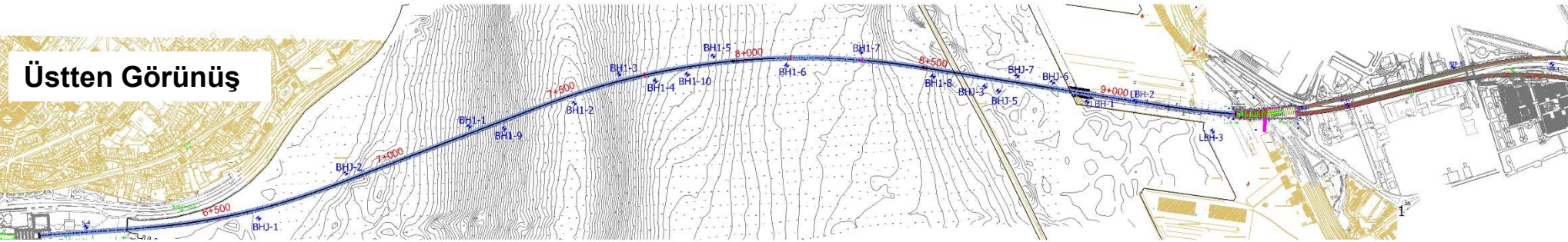
❖ TBM TÜNELİ JEOLJİSİ

➤ Yapılan sondaj, jeofizik ve batimetre çalışmalarına göre 3340 m'lik TBM tünelin dağılımı:

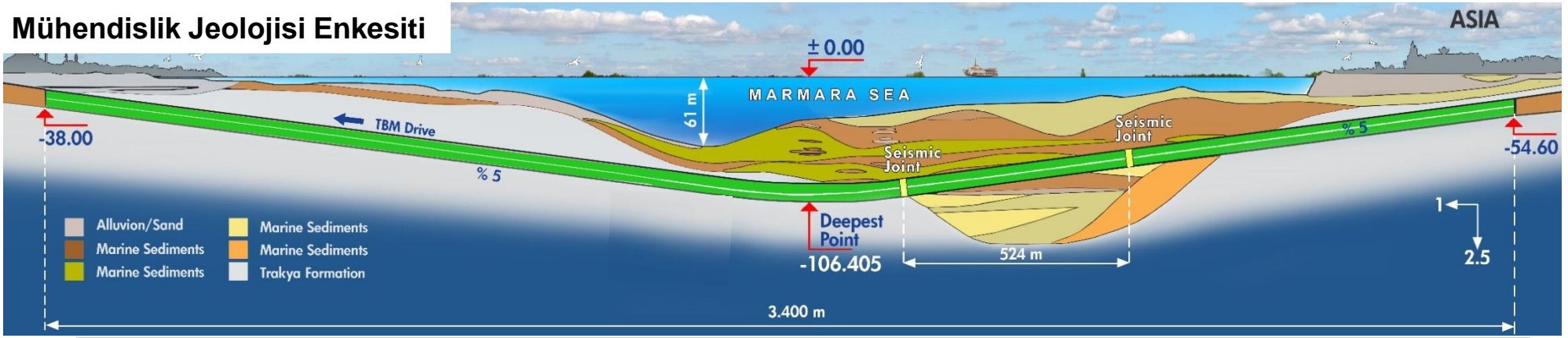
- Asya Tarafı - Tam Cephe Trakya Formasyonu ≈ 550 m (%17)
- Asya Tarafı - Karışık Cephe ≈ 100 m (%3)
- Tam Cephe Denizel Çökeller ≈ 750 m (%22)
- Avrupa Tarafı - Karışık Cephe ≈ 140 m (%4)
- Avrupa Tarafı - Tam Cephe Trakya Formasyonu ≈ 1800 m (%54)

Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2014©

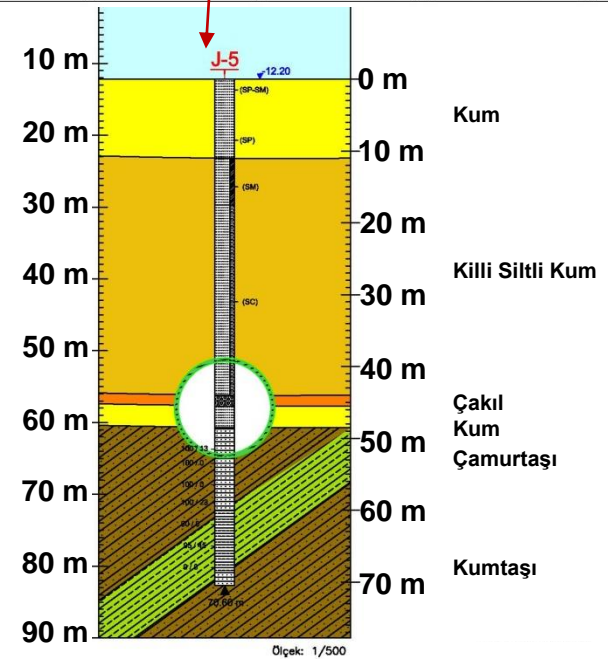
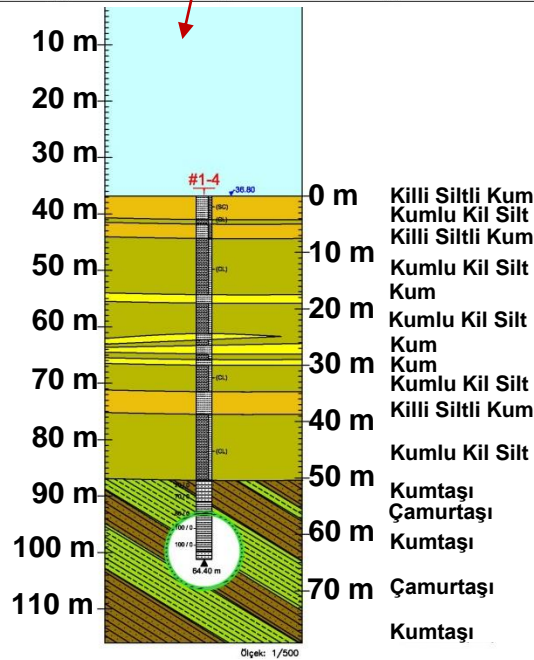
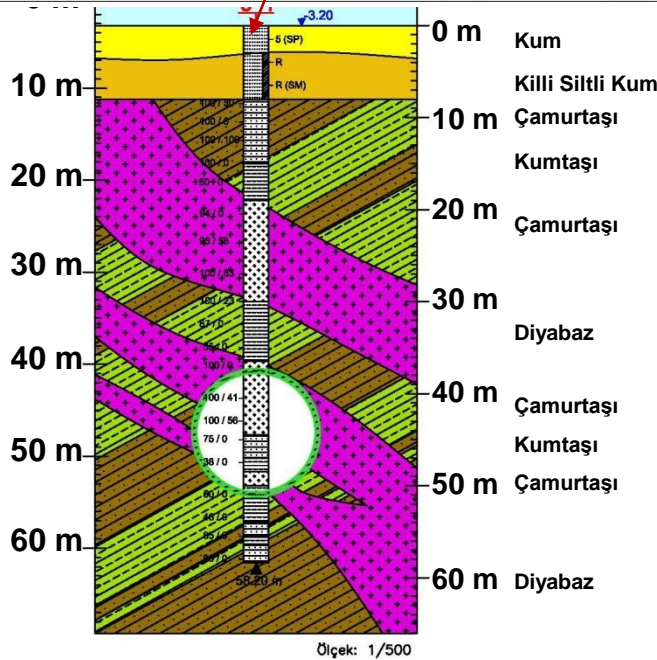
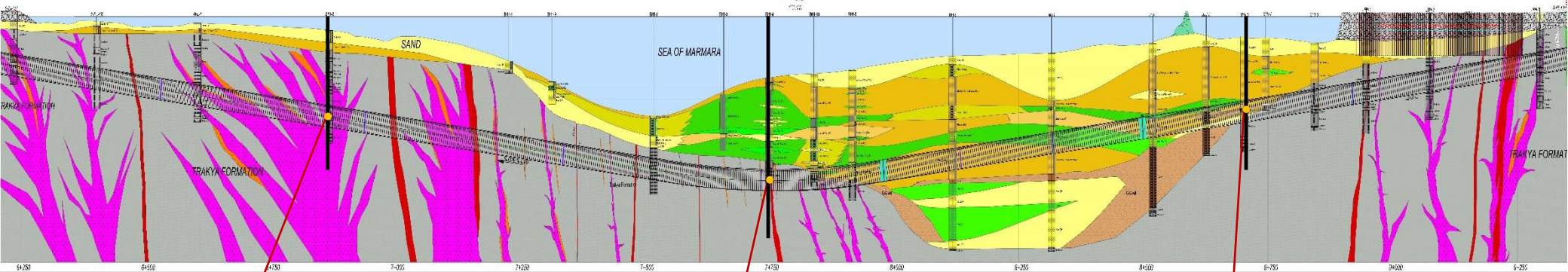
Üstten Görünüş



Mühendislik Jeolojisi Enkesiti

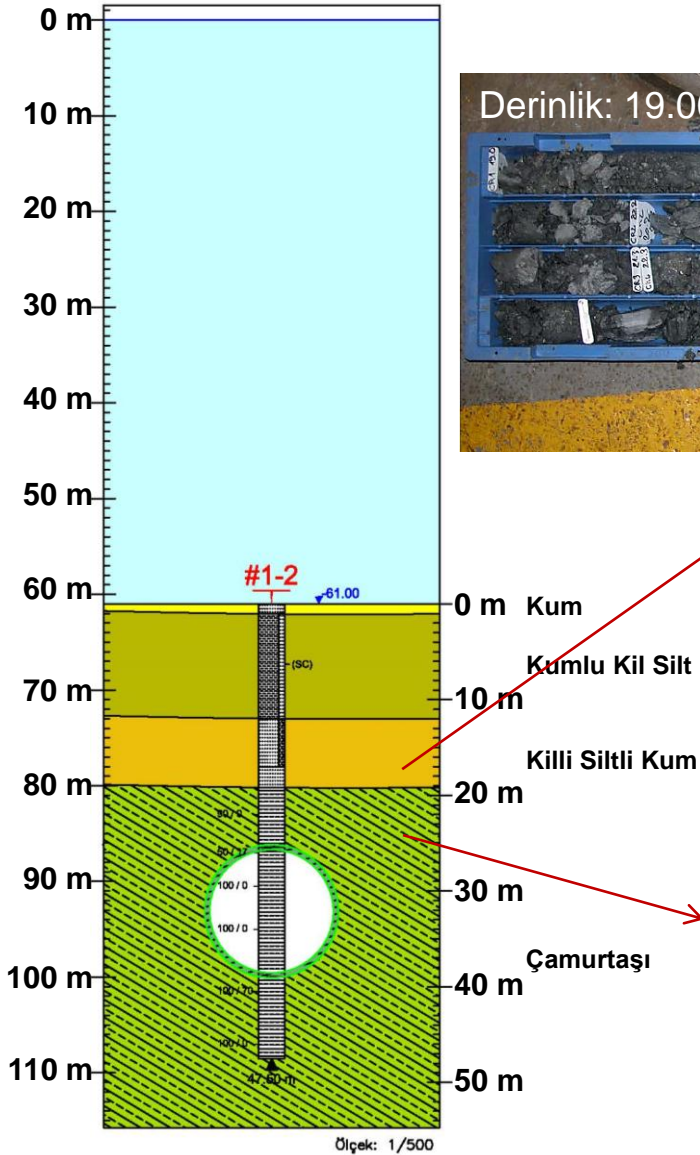


AVRASYA TÜNELİ GÜZERGAHINDAN ÖRNEK JEOLJİK PROFİLLER



- **Temel Kaya Kütleleri:** Paleozoik yaşlı Trakya Formasyonu (*Kumtaşı, Çamurtaşı, Silttaşı* ardalamalı kaya birimleri ve *Andezit ve Diabaz* Dayklar)
- **Holosen Çökeller:** $CaCO_3$ kavkılı ($0 < CaCO_3 < 40\%$) kum, kil ve yer yer çakıllı birimler

❖ YÜKSEK ARIN BASINCI BEKLENEN SONDAJIN (BH1-2) JEOLojİK PROFİLİ



➤ Değerlendirme Notları:

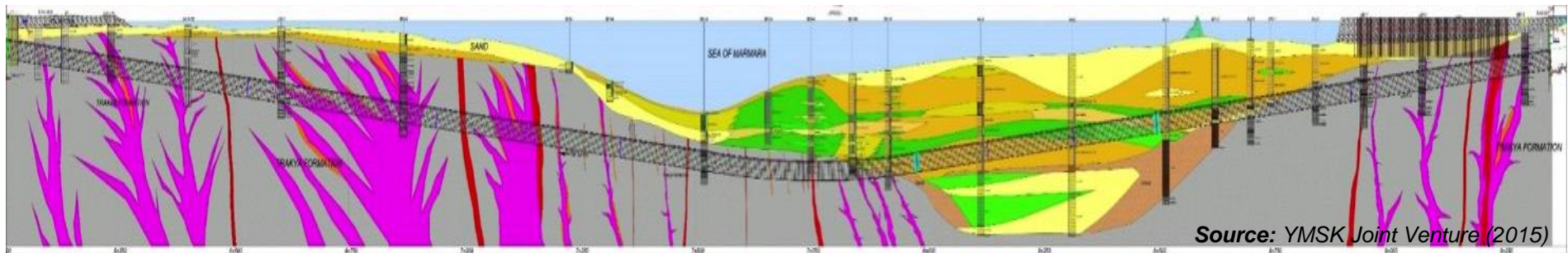
- **Kaya Kalitesi:**
RQD < %25 -çok zayıf-
- **GSI Bazında Kaya Kütlesi:**
Parçalanmış – Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi (Ulusay ve Sönmez, 2007).



Kaynak: Yapı Merkezi
Tasarım Bölümü,
AR&GE Bölümü
ve Fugro, 2010©

❖ EXISTENCE OF DYKE ZONES

- In Trakya Formation, Sandstone/Mudstone layers cut through **dykes (andesite and diabase)**. Such a geological setting creates a different rock mass medium with variable stiffness.
- Andesite/Diabase dykes have uniaxial **compressive strengths more than 200 MPa**.
- **Cherchar Abrasive Index (CAI)** is an indication of cutter disc/tools wear rate and in the case of dykes, this index **increases up to 4.5 (extremely abrasive)**.
- **Pink color** in geological profile below corresponds to dyke zones faced during excavation.

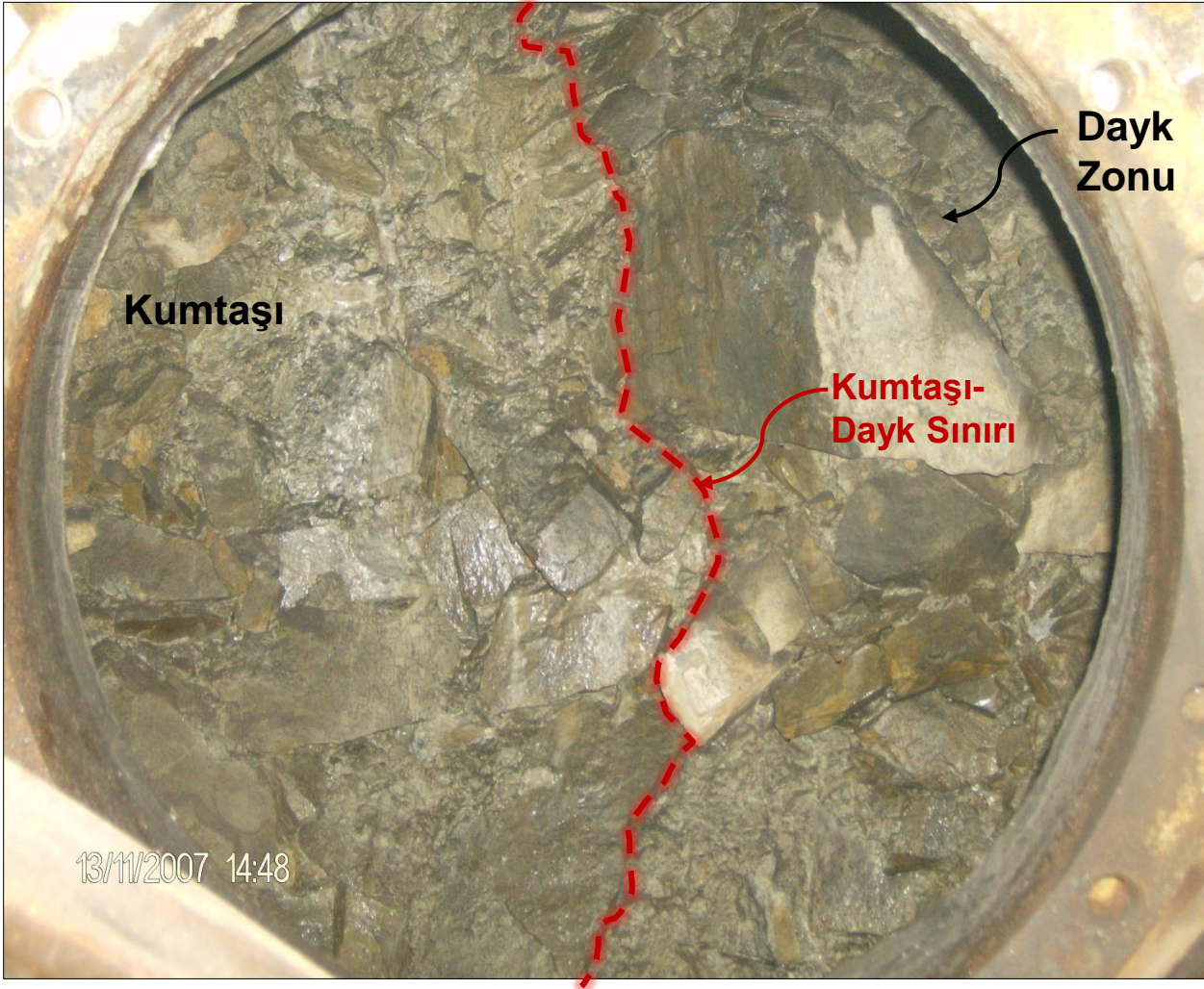


Parameter	Asia Side Trakya Formation	Europe Side Trakya Formation	Overall Trakya Formation
Number of Dyke Zone	6	23	29
Total Dyke Length (m)	28	397	425
Average Dyke Length (m)	5	17	15
Average Dyke Frequency (m)	113	83	90

Note: Longest dyke's length is 120.0 m.

Source: YMSK Joint Venture (2015)

❖ MARMARAY PROJESİNDEN KARIŞIK ARIN ŞARTLARINA BİR ÖRNEK



Gözlemler:

- ❖ Heterojen Arın: Aynı kazı alanında farklı rijitlikli formasyonlar
- ❖ Kazı boyunca küçük kaya parçaları yerine çatlak setlerinin sayısı ve aralıkları ile ilişkili olarak geniş kaya bloklarına rastlandı.
- ❖ Bu durum TBM kazısı sırasında ufalama işlemi ve hidrolik iletim sisteminde ciddi zorluklara neden olmaktadır.

Kaynak: Bilgin (2007)'den değiştirilmiştir .



❖ GENERAL OUTLOOK ON MARINE SEDIMENTS

- Properties of marine sediments based on **cone penetration test (CPT)** and measured **shear wave velocity from P/S logging**.
- Marine sediments (**Holecene aged, 7400 ± 1300**) varies from coarse-grained soils (**gravels and sand**) to fine grained soils (**silts and clays**) and change both vertically and laterally as a result of sedimental regime.
- The coarse-grained soils (*usually silty/clayey fine sand*) are dense. The sands own high stiffness under high confining pressure.
- Generally speaking, the marine sediments that are normally to lightly overconsolidated at the tunnel axis depth and consist of inter-bedded sands, silts and clay. The soils appear to be normally consolidated i.e. $OCR \approx 1$, many design properties (*undrained shear strength -cohesion value-, stiffness*) enhance with depth.

- Undrained shear strength can be approximated as:

$$\frac{c_u}{\sigma_v'} \approx 0.22 \times \gamma' \times z \quad (\sigma_v' = \text{effective vertical pressure}; \gamma' = \text{submerged unit weight}; z = \text{depth from sea bottom surface})$$

- Undrained elastic modulus at 50 % peak deviation stress (E_{50}) can be correlated with c_u value

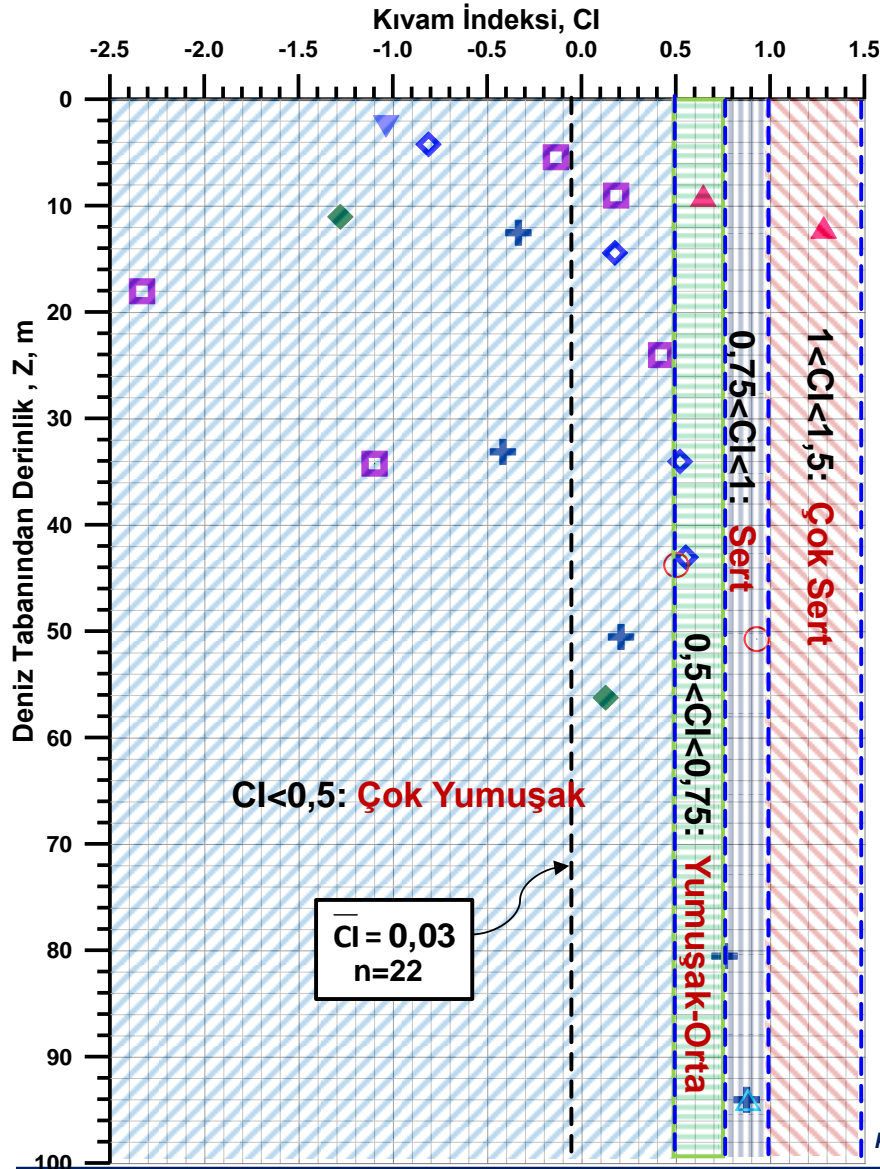
$$E_{50} = 17.64 \times c_u + 119.48 \quad (\text{kPa})$$

- As for the effective internal friction angle (ϕ') for sandy soils can be estimated from the modified equation (*Kulhawy and Mayne, 1990*):

$$\phi' = 17.6 + 11 \times \log[34.3 \times q_c \times z^{0.5}] \quad (q_c = \text{measured cone tip resistance in MPa}; z = \text{depth from sea bottom surface in meters})$$

- Some carbonates due to **shell of micro/macro organisms** are observed throughout the depth of soils up to **35% CaCO₃** at (*mean value 25%*) Project site. These carbonates were believed in increase "**liquefaction resistance**" of sandy soils during seismic loading owing to their roughness structure and reduce in abrasion.

❖ KIVAM İNDEKSİ, CI'NIN DERİNLİKLE DEĞİŞİMİ



- ▲ BH1-2
- ◻ BH1-3
- ◊ BH1-4
- ◆ BH1-5
- ⊕ BH1-6
- △ BH1-7
- ▼ BH1-9
- BH1-10

$$CI = \frac{LL - \omega}{LL - PL}$$

Kullanılan Parametreler :

n = Veri sayısı,

\bar{CI} = Kıvam indeksinin ortalama değeri,

LL = Likit limit, %,

PL = Plastik limit,

ω = Doğal su içeriği, %,

s = Standard sapma,

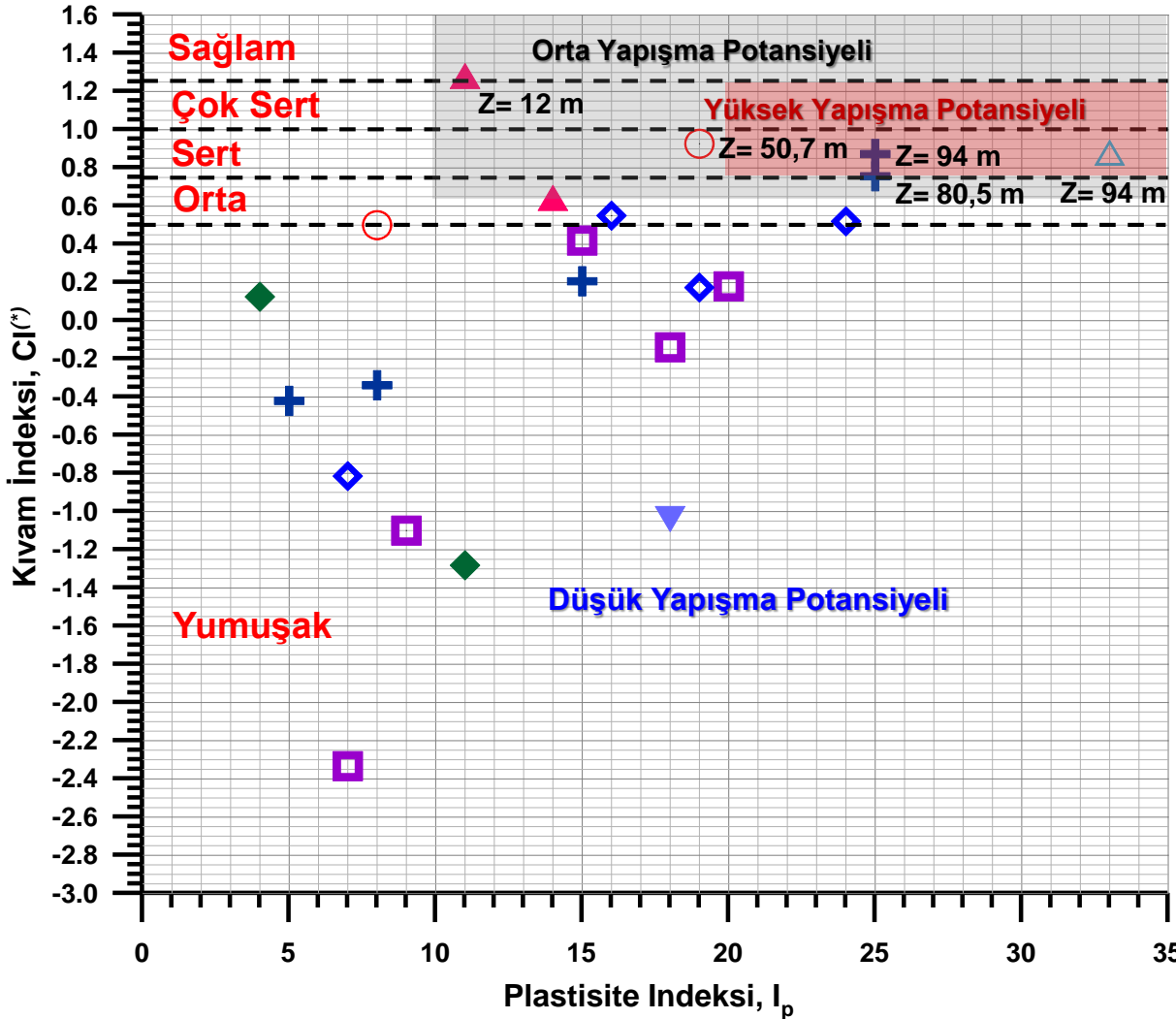
V = Değişkenlik katsayısı, %

$$V = \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) \times 100, \quad \%$$

Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2010©



❖ KİLLİ FORMASYONLARDA YAPIŞMA POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ



Lejant			
▲	BH1-2	+	BH1-6
◻	BH1-3	△	BH1-7
◊	BH1-4	▽	BH1-9
◆	BH1-5	○	BH1-10

Kıvam İndeksi, CI :

$$CI = \frac{LL - \omega}{LL - PL}$$

Kullanılan Parametreler

ω = Doğal su içeriği, %

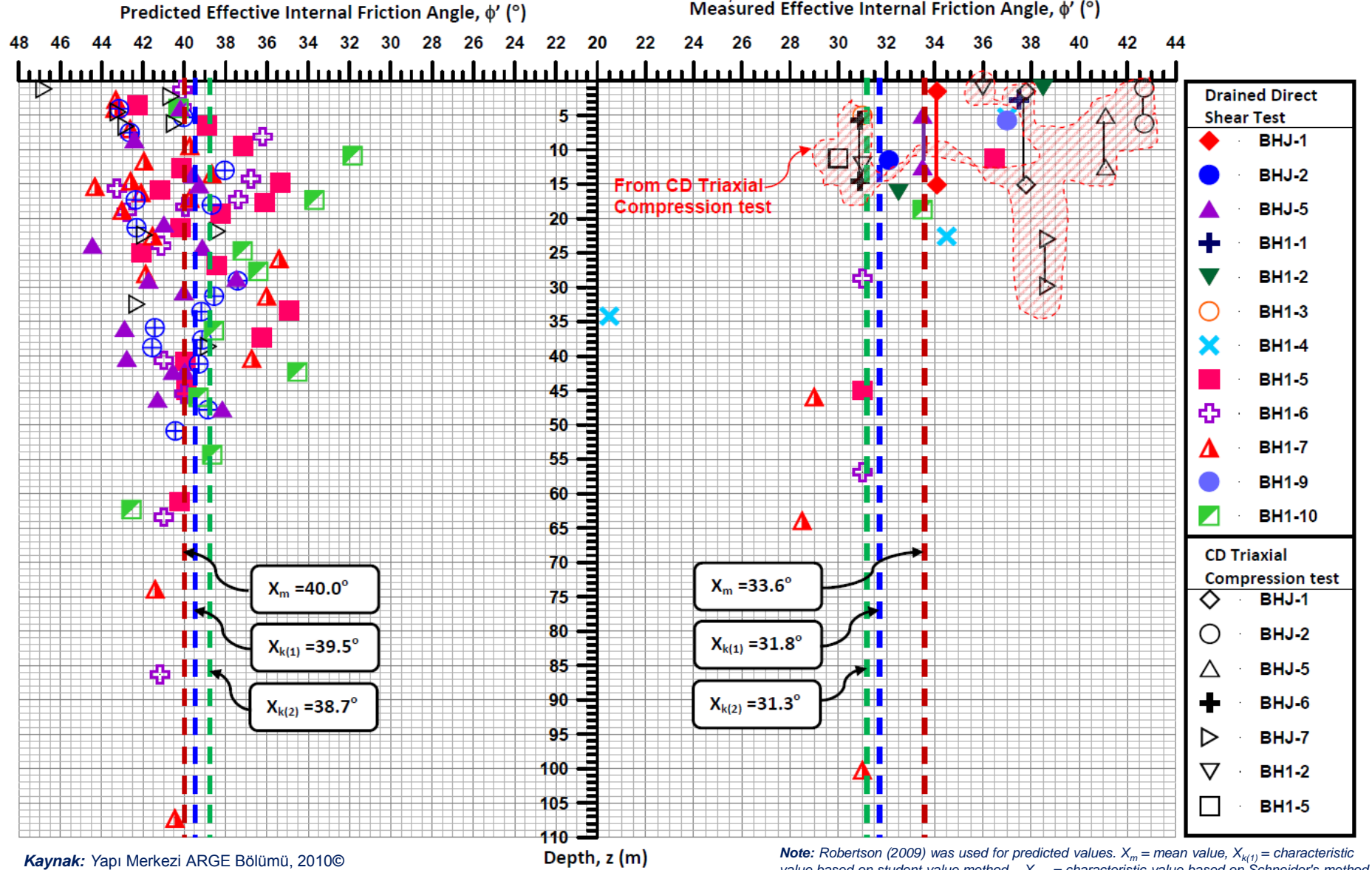
LL = Likit limit,

PL = Plastik limit %,

Z = Deniz tabanından derinlik.



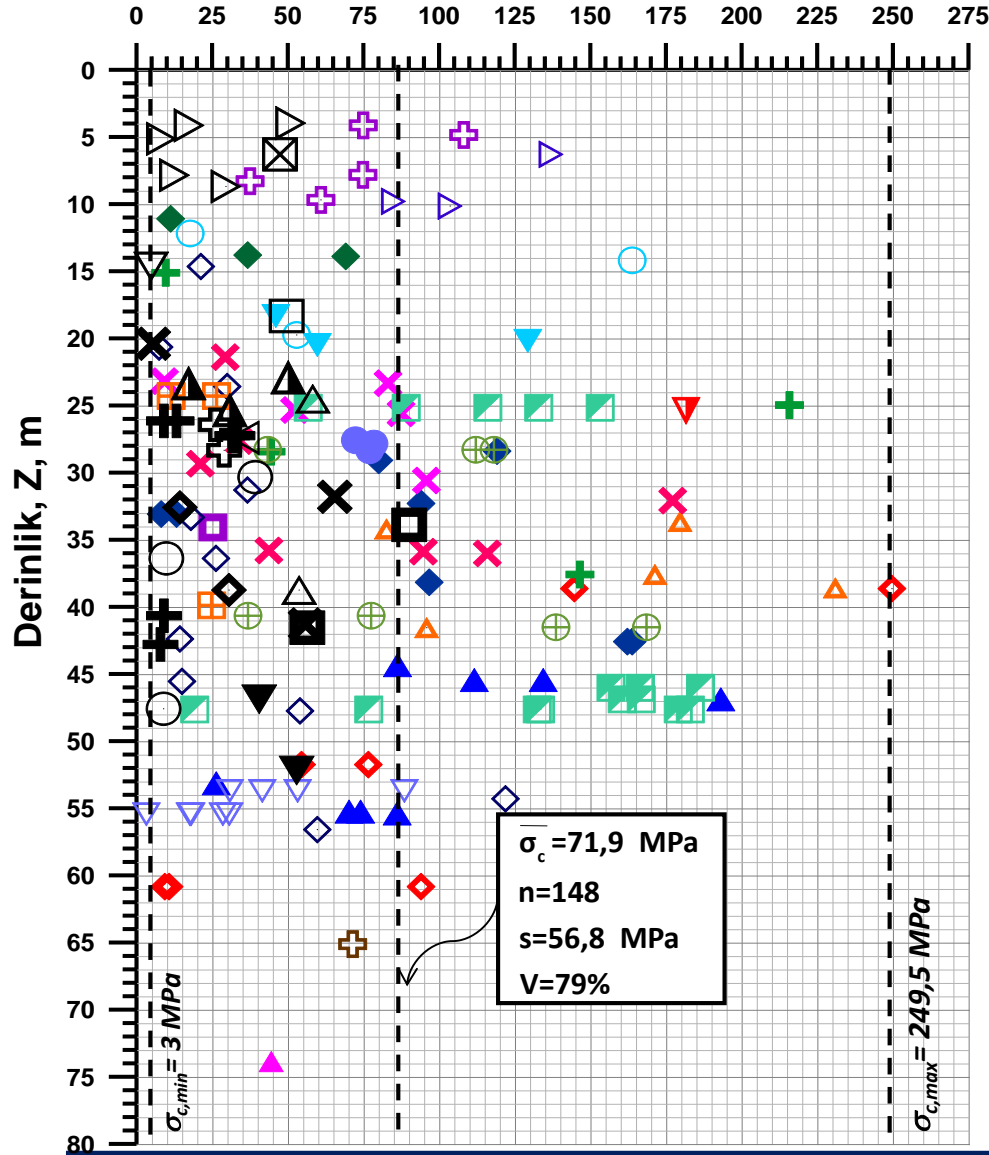
◆ KESTİRİLEN VE ÖLÇÜLEN EFEKTİF İÇSEL SÜRTÜNME AÇISI



Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2010©



TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIMININ, σ_b DERİNLİKLE DEĞİŞİMİ



Nokta Yük İndeksinden Dönüştürülen Basınç Dayanımı	
▲	LBH1
◆	LBH2
◆	LBH3
■	S4
▲	NTB1
+	NTB2
◇	NTB3
×	NTB4
○	NTB5
+	S-AS-1
◆	S-AS-3
▽	S-AS-4
▽	S-AS-5
●	S-AS-6
×	S-AS-7
▽	S-AS-8
■	BH1-2A
▲	1-5A
+	BH1-10
⊕	BHJ-1
▽	BHJ-2
■	BHJ-6

Ölçülen Basınç Dayanımı	
+	BHJ-1
▽	BHJ-6
◆	LBH3
▽	S-AS-1
⊗	S-AS-4
+	S-AS-6
▲	S-AS-7
□	S-AS-8
△	BH1-2
■	NTB-1
△	NTB-2
○	NTB-3
×	NTB-4
▽	NTB-5

Kullanılan Parametreler :

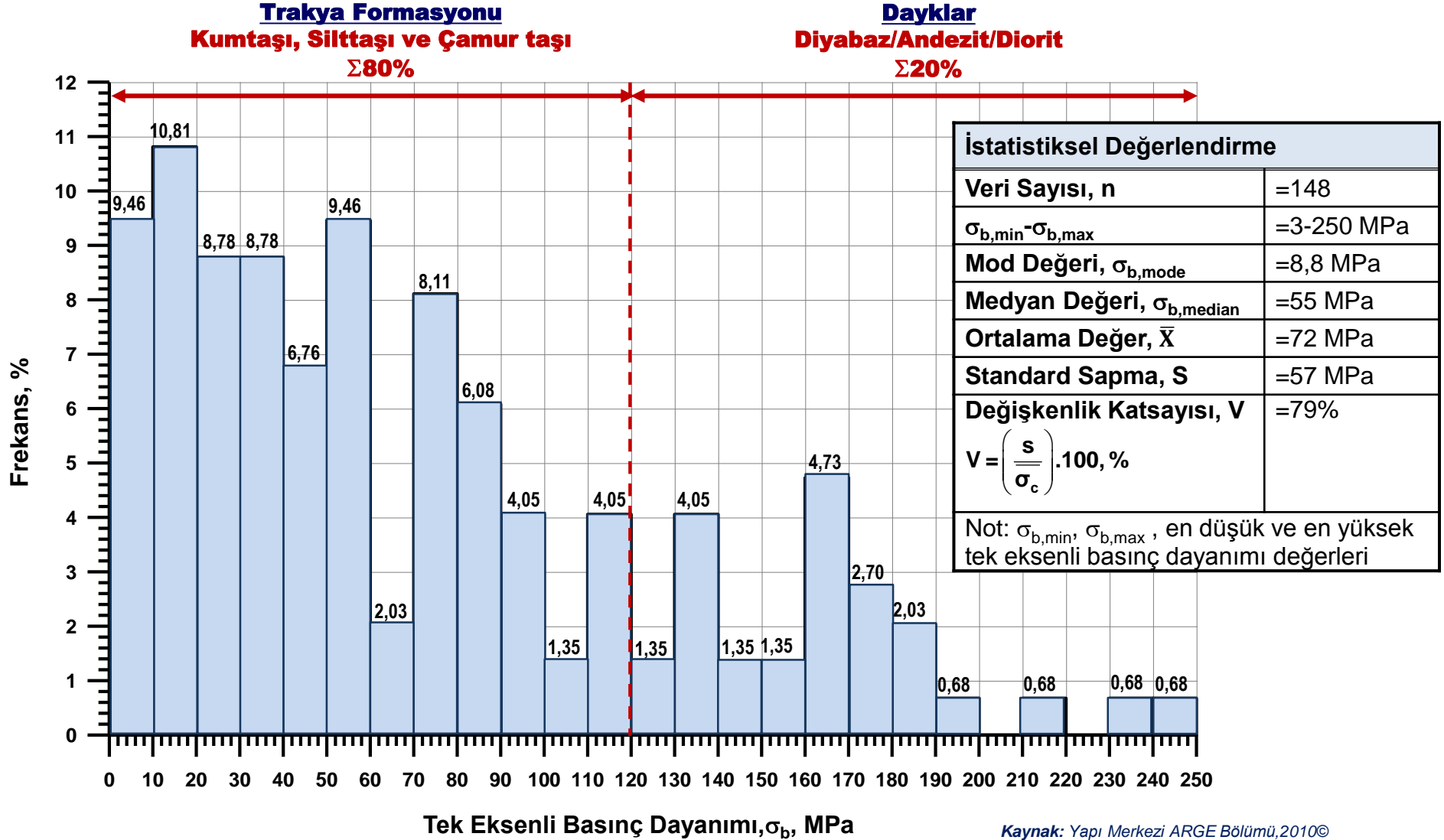
\bar{X} = Ortalama değer,
 s = Standard sapma,
 V = Değişkenlik katsayısı, %

$$V = \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) \times 100, \quad \%$$

Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2010©



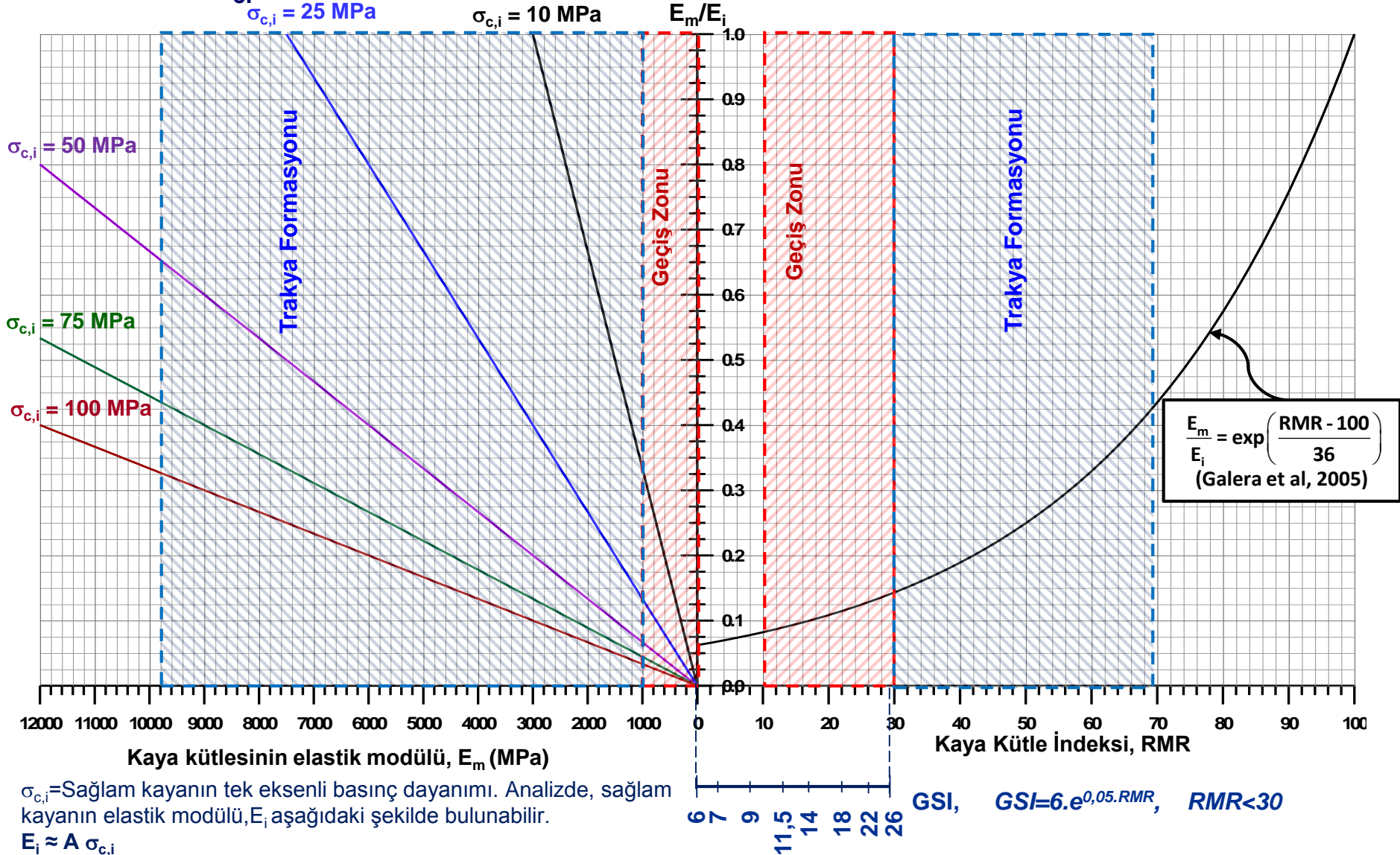
❖ KAYALARIN TEK EKSENLİ BASINÇ DAYANIM DAĞILIMI



Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2010©



❖ RMR VE σ_{ci} ÇİNSİNDEN KAYA KÜTLESİNİN ELASTİK MODÜLÜNÜN KESTİRİMİ



$\sigma_{c,i}$ = Sağlam kayanın tek eksenli basınç dayanımı. Analizde, sağlam kayanın elastik modülü, E_i aşağıdaki şekilde bulunabilir.

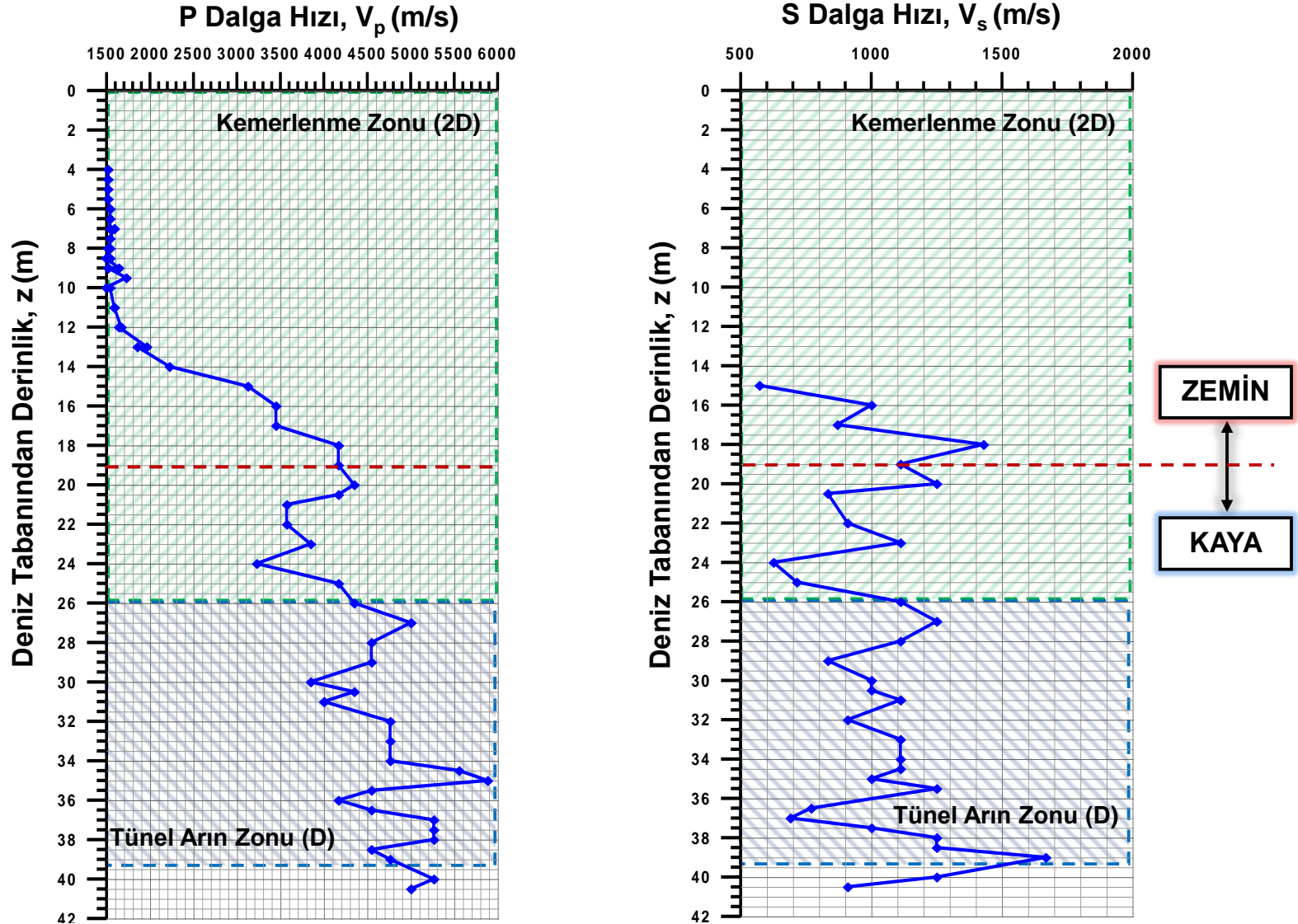
$$E_i \approx A \sigma_{c,i}$$

Kumtaşı ve çamurtaşı için sabit, A, 300 olarak alınabilir.

Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2010©



❖ BH1-2 SONDAJI İÇİN DERİNLİKLE P DALGA, V_p VE S DALGA, V_s HIZI DEĞİŞİMİ





❖ KARA YOLU TÜNELLERİ İÇİN KAYA SINIFLANDIRMASI

Sınıf	Kaya Tipi	Elastik Dalga Hızı, V_p , km/s						Karşılaştırma Faktörü, $(\sigma_{cm}/\gamma \cdot H)$	RQD,%	Çatlak aralığı, cm	Yaklaşım Miktarı, mm	
		1	2	3	4	5	6					
A	a						-	80 or more	100 to 50 or more	Dakika		
	b											
	c											
	d											
B	a						-	90 to 60	70 to 30	Dakika		
	b											
	c											
	d											
C	I	a					-	70 to 20	Order of 50 or less	50 veya daha az		
		b										
		c										
		d ₁										
	II	d ₂					4 veya daha fazla					
		a					-					
		b					-					
		c					-					
D	I	d ₁					4 - 2	20'lerde veya daha az	-	60 veya daha az		
		d ₂										
		e										
		a									2 veya daha fazla	
		b									2 - 1	
	II	c					2 - 1				-	200 veya daha az
		d ₁										
		d ₂										
		e										
		a					1 veya daha fazla					
E	b											
	c											
	d ₁											
	d ₂											
	e											

Kaya Kütlesindeki diğer kesitler

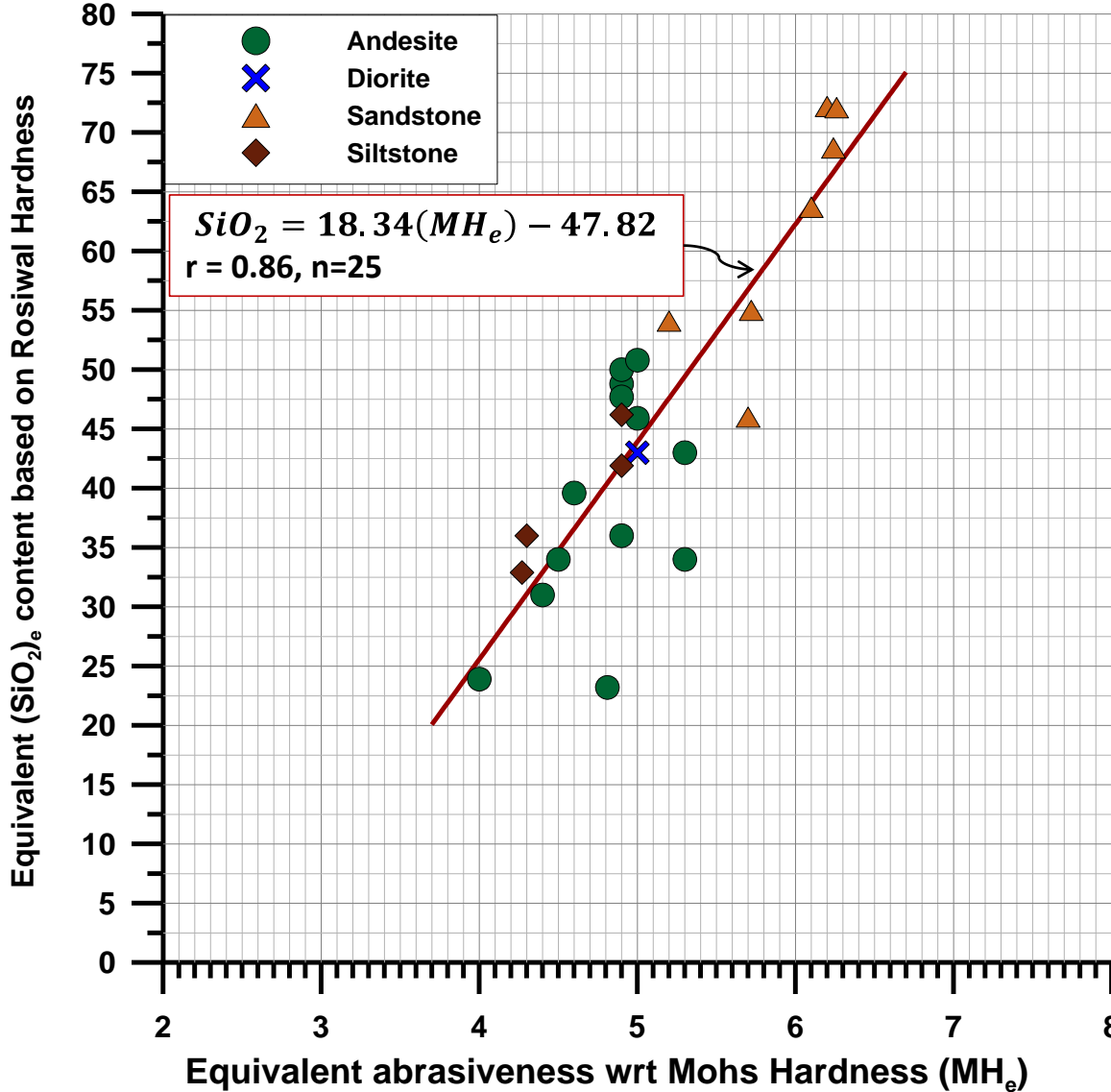
Geçiş Zonu

Rock Type:

- Metamorphic rock (*phyllite, graphite schist, siliceous graphite schist, quartz schist, greenschist, gneiss, serpentinite, hornfels, etc.*), plutonic rock (*gabbro, peridotite*)
- Paleozoic and Mesozoic strata (slate, sandstone and conglomerate, graywacke, limestone, quartzite, schalstein, etc.)**
- Volcanic rock (*quartz trachyte, andesite, basalt, etc.*), Dike rock (*granoporphyry, quartz porphyry, diabase etc.*), Plutonic rock (*granite, diorite, etc.*)
- Tertiary and lower diluvial strata (*mudstone, shale, siliceous, shale, sandstone and conglomerate, tuff, tuff breccia etc.*). However, there are subdivided into d₁ and d₂ at a diving line of 200 kgf/cm² for unconfined.
d₁: $\sigma_c \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$; d₂: $\sigma_c < 200 \text{ kgf/cm}^2$
- Upper diluvial strata (*loam and clay pyroclastic deposites*), Alluvial strata (*talus, surface soil, etc.*)
(σ_{cm} = Uniaxial compressive strength of rock mass, γ = Unit weight of rock, H= Tunnel axis depth, σ_c = Compressive strength of intact rock)

Kaynak: JS For Mountain Tunnelling, JSCE, 1996, p24-25.

TRAKYA FORMASYONU İÇİN CHERCHAR AŞINDIRICILIK İNDEKSİ



Cherchar aşındırıcılık indeksi (CAI), sağlam kayanın tek eksenli laboratuvar basınç dayanımı (σ_{ci}) ve eşdeğer (SiO_2)_e içeriği ile aşağıda verilen formül yardımıyla bulunabilir,

$$CAI = 0.9 \times \left[\frac{\sigma_{ci} \times (SiO_2)_e}{100} \right]^{0.333}$$

(Plininger, 2010)

Örneğin, Mohs sertlik derecesi (MH_e) 5 olan bir andezit için eşdeğer (SiO_2)_e içeriği türetilen bağıntıdan,

$$(SiO_2)_e = 18.34 \times 5 - 47.82 \approx 44$$

elde edilmektedir.

CAI ise yukarıdaki bağıntıdan aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Not: Andezit için $\sigma_{ci} \approx 180$ MPa alınmıştır).

$$CAI = 0.9 \times \left[\frac{180 \times 44}{100} \right]^{0.333} \approx 3,9$$



TASARLANAN TÜNEL AÇMA MAKİNASI



❖ BİR TBM TÜNEL PROJESİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Proje Verileri

- Geometrik Boyutlar (Çap, Uzunluk)
- Güzergahın eğimi
- Güzergahtaki kurların yarıçapı (düşey ve yatay)
- Tünel Güzergahı boyunca yerleşim bölgeleri, kültürel/tarihsel kalıntılar

Doğal Faktörler

- Örtü Tabakası
- Hidrostatik Su – Arın Basıncı
- Kaya kütlesi / zeminin fiziksel/mekanik özellikleri
- Geçiş zonları, Zayıflık Zonları / Dayklar
- Zeminin ve Kaya kütlelerinin Aşındırıcılığı (eşdeğer SiO_2 içeriği)
- Gaz salınımları (CH_4 , CO_2 , H_2S)
- Sismik koşullar



TBM Faktörleri

- Kesici disklerin ve keskinin geometrik boyutları ve düzenleri
- Açıklık oranı
- Maksimum arın basıncı
- İtme kuvveti
- Dönme momenti
- Kesici kafanın gücü
- Kesici kafa bakımı/tamiri sırasında hiperbarik şartlar

Yönetsel Faktörler

- Yüklenici Firmanın proje ve TBM kullanım tecrübesi
- TBM ekibinin tecrübe düzeyi
- Karşılaşılan problemlerin zamanında çözümü (TBM üretici firma ekibinin sahada bulunması)
- Zemin, kaya kütlesi ve TBM arasındaki etkileşim koşullarına uyum yeteneği

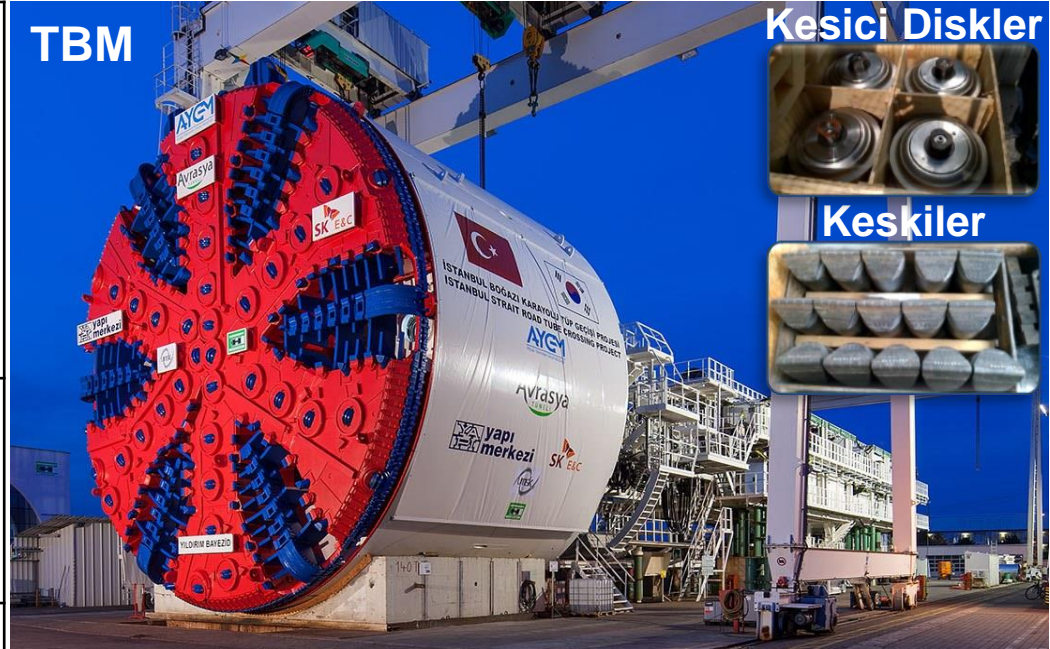
Proje Hedefleri

- Güvenli TBM Operasyonu
- Optimal İlerleme Hızı

❖ TASARLANAN TBM

TBM - GENEL			
❖ Tipi ❖ Maksimum Arın Basıncı ❖ Çap ❖ Uzunluk ❖ Ağırlık ❖ Kurulu Güç ❖ Nominal Tork ❖ İtme Kuvveti	Bentonit Bul.	12 bar	
	13.7 m	120.0 m	
	~3,300 t	10,330 kW	
	23,289 kNm	247,300 kN	
	KESİCİ ALETLER	❖ Toplam Kesici Disk	35 (çift)
	❖ Kesici Disk Çapı	19 inç	
	❖ Atmosferik Değişebilir Keski	48	
❖ Hiperbarik Değişebilir Keski	144		
ÖZEL EKİPMAN	❖ İnsan Basınç Odaları (13 bar)	2 adet	
❖ Ekipman Basınç Odaları(13 bar)	3 adet		
SEGMENTLER	❖ Dış Çap	13.2 m	
❖ İç Çap	12.0 m		
❖ Ring Düzeni	8+1 kilit taşı		
❖ Uzunluk	2000 mm		
❖ Kalınlık	600 mm		
❖ Ağırlık (9 parça)	127 t		

TBM



Kesici Diskler



Keskiler



Basınç Odası

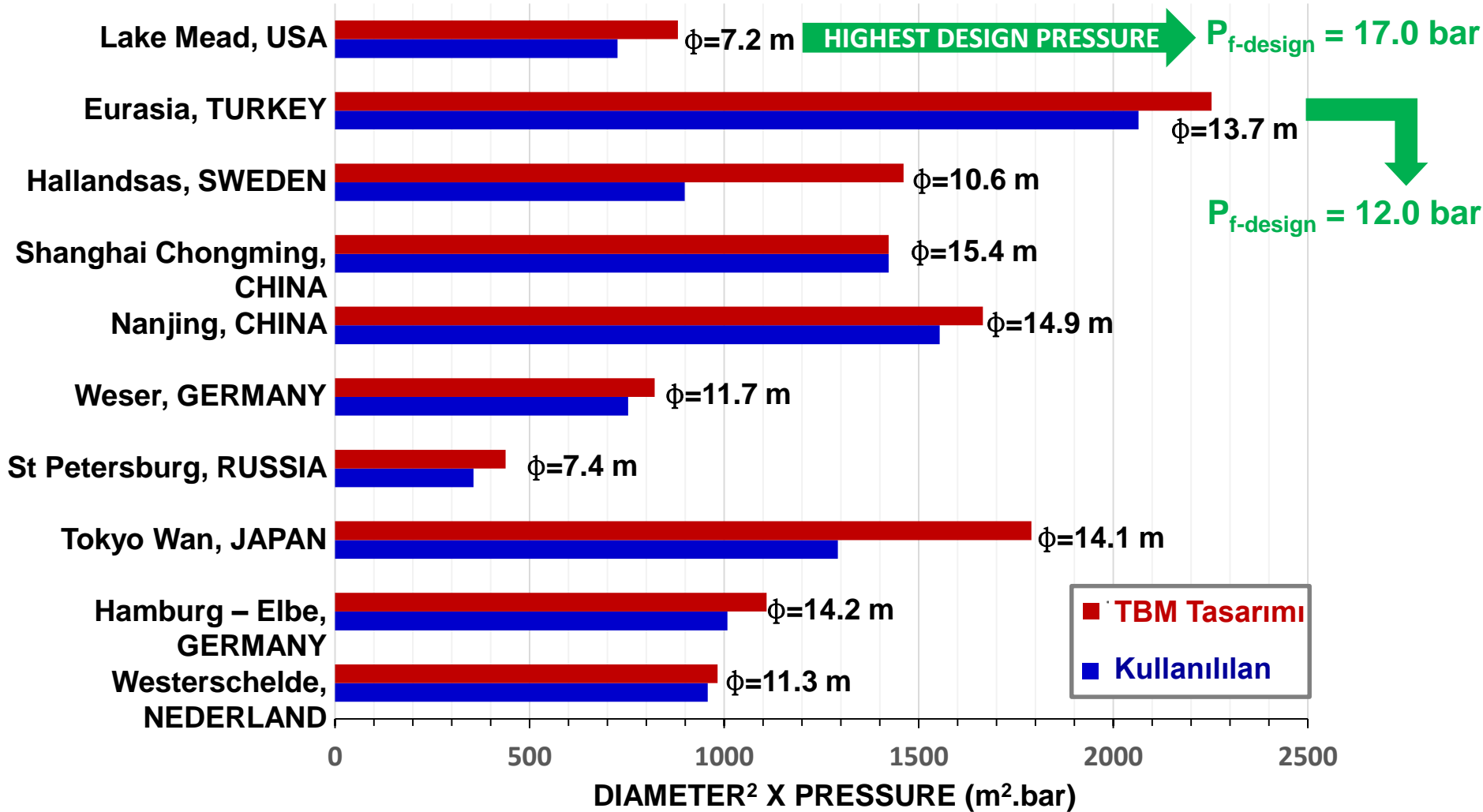


Yapı Merkezi – Prefabrikasyon Fabrikada Üretilen Segmentler

Kaynak: Yapı Merkezi ARGE Bölümü, 2014©



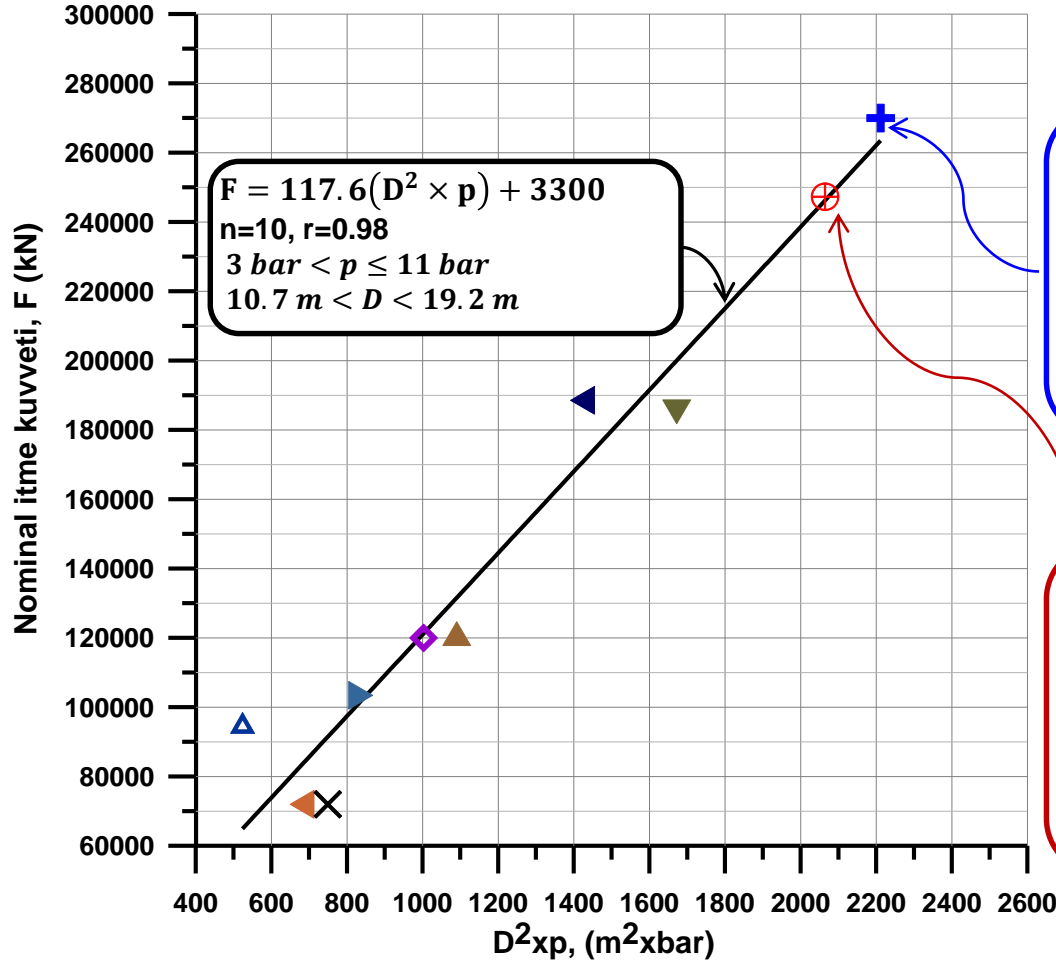
❖ PROJELERDE KULLANILAN TBM'LERİN KARSILASTIRILMASI



- Eurasia Tunnel TBM ($\phi = 13.7 m$) is **leading** the investigated group of 10 projects when the “**Diameter² x Pressure**” parameter is considered.

Kaynak: Untreated data from Anagnostou (2014) and Holzhauser et al. (2006)

❖ HERRENKNECHT AG TARAFINDAN ÜRETİLEN BENTONİT BULAMAÇLI TBM'LERDE NOMİNAL İTME - (TÜNEL ÇAP² x ARIN BASINCI) DEĞİŞİMİ



➤ **Orlovski, Rusya Tüneli** ^(x)

- Tünel Tipi: Dere altı Tüneli
- Kazı Çapı : 19.2 m
- Arın Basıncı : 6 bar
- İtme Kuvveti: 270000 kN
- Kesici Kafa Gücü: 8400 kW

➤ **Avrasya Tüneli, Türkiye**

- Tünel Tipi: Deniz altı Tüneli
- Kazı Çapı : 13.7 m
- Arın Basıncı : 11 bar
- İtme Kuvveti: 247301 kN
- Kesici Kafa Gücü: 4900 kW

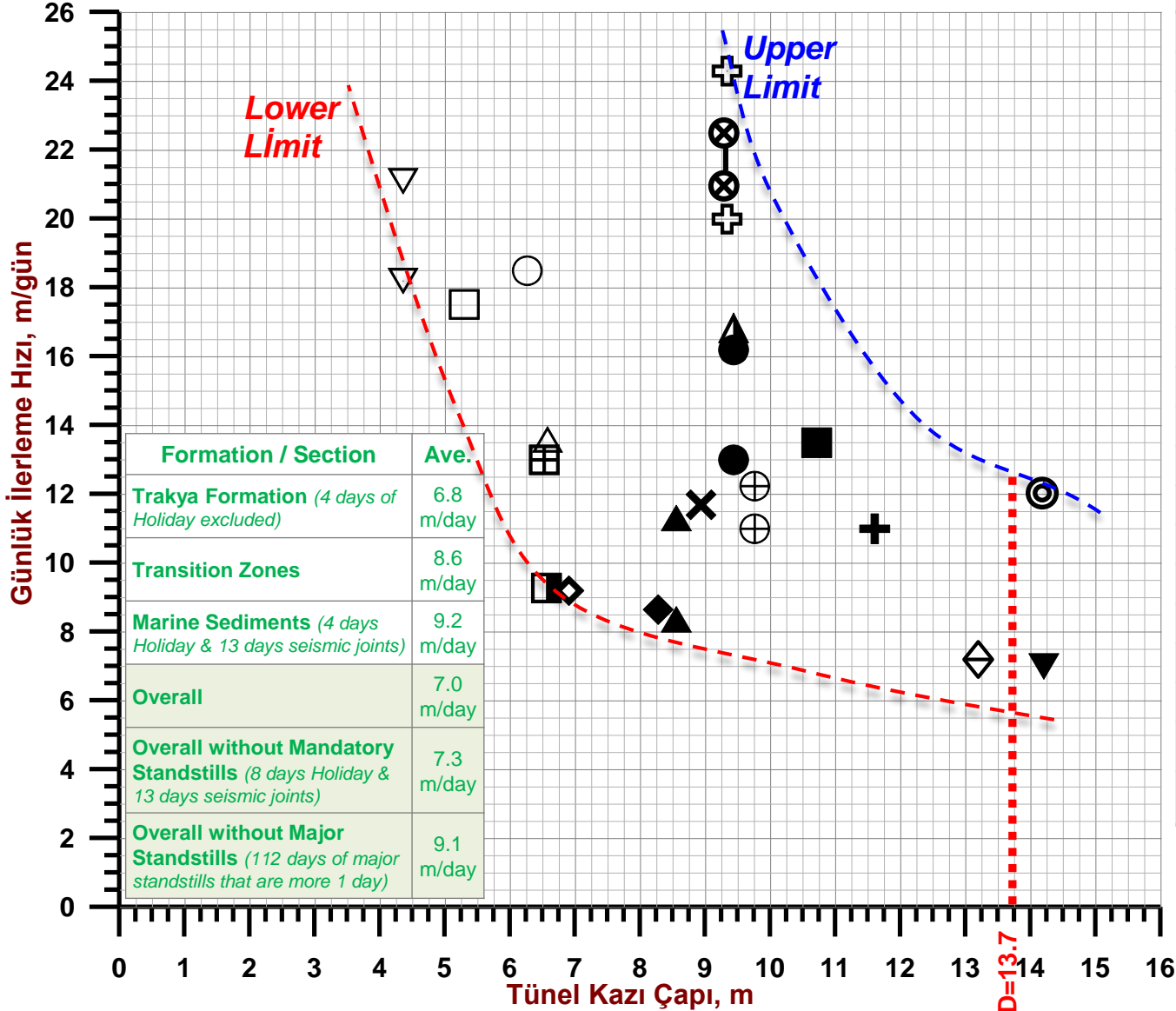
- + Orlovski, Russia
- ◄ Chanjang, China
- ◄ Nanjing Yangtze, China
- ◊ The 4th River Elbe, Germany
- ◻ Lefortovo, Russia
- Silberwald, Russia
- ▲ Smart Tunnel, Malaysia.
- ▲ Guangshengang, China
- ◄ Zürich-Thalwil Zimmerberg, Switzerland
- ◄ Weser, Germany
- × Herren, Germany
- ◄ Westerschelde, Neteherland:
- ⊕ Istanbul Strait Road Crossing Project, Turkey

n=Data Sayısı,
r= Korelasyon katsayısı
D= Tünel Çapı , m
p=Arın basıncı, bar

Not: İşlenmemiş veriler üretici firmadan alınmıştır.



❖ GÜNLÜK İLERLEME HIZI VE TÜNEL KAZI ÇAPI



	Project Name	General Geology/ Formation
+	Grauholz ⁽¹⁾	Sand, Gravel, Debris
◇	Mülheim ⁽¹⁾	Sandstone, Claystone
◆	Strasbourg ⁽¹⁾	Gravel, Sand
○	Taipei ⁽¹⁾	Clay
●	Cairo ⁽¹⁾	Sand
△	Duisburg ⁽¹⁾	Limestone, Gravel, Clay
▲	Heinenoord ⁽¹⁾	Sand, Clay
□	Zurich Glatt ⁽¹⁾	Debris, unconsolidated materials
■	Sydney ⁽¹⁾	Clay, sand, sandstone
▽	Buenos Aires ⁽¹⁾	Sand, Gravel, Clay
▼	Hamburg ⁽¹⁾	Gravel, marn, rock block
×	Berlin ⁽¹⁾	Sand, clay
⊕	İzmir ⁽¹⁾	Sand, clay
⊕	Madrid ⁽¹⁾	Clayey Soil, sand, clay
▲	Düsseldorf ⁽¹⁾	Fine sand, sandy gravel, stones
■	Singapore ⁽¹⁾	Sediment, clay
⊕	Botlek ⁽¹⁾	Clay, coarse sand, gravel
◇	SMART ⁽²⁾	Carstic limestone, sediment
⊙	Lefortovo ⁽³⁾	Sand carrying water, silt, laminated limestone alternated kil
⊗	Channel Tüneli ⁽⁴⁾	Limestone, marn, weak sandstone

⁽¹⁾ Values were taken from TKJV TBM Expert Report, 2009.

⁽²⁾ Carter & Burgess, Inc., 2007.

⁽³⁾ Herrenknecht, Bäppler, 2006.

⁽⁴⁾ Harris, vd., 1996.

Kaynak: Yapı Merkezi AR&GE Bölümü, 2014©



❖ TBM İZLEME SİSTEMİ

- TBM üzerinde 300'den fazla sensör bulunmaktadır.
- Sensörler canlı olarak internet üzerinden takip edilebilmiştir.

➤ Temel takip edilen TBM parametreleri: IRIS TUNNEL

Logged in as: Burakgokce | Logout

Project Visualization Advance Machine Data Reports Geology Segment Management Tool Changes Maintenance Help

- Günlük / Haftalık / Aylık

İlerleme Hızları (m/day)

- İtme Kuvveti (kN)

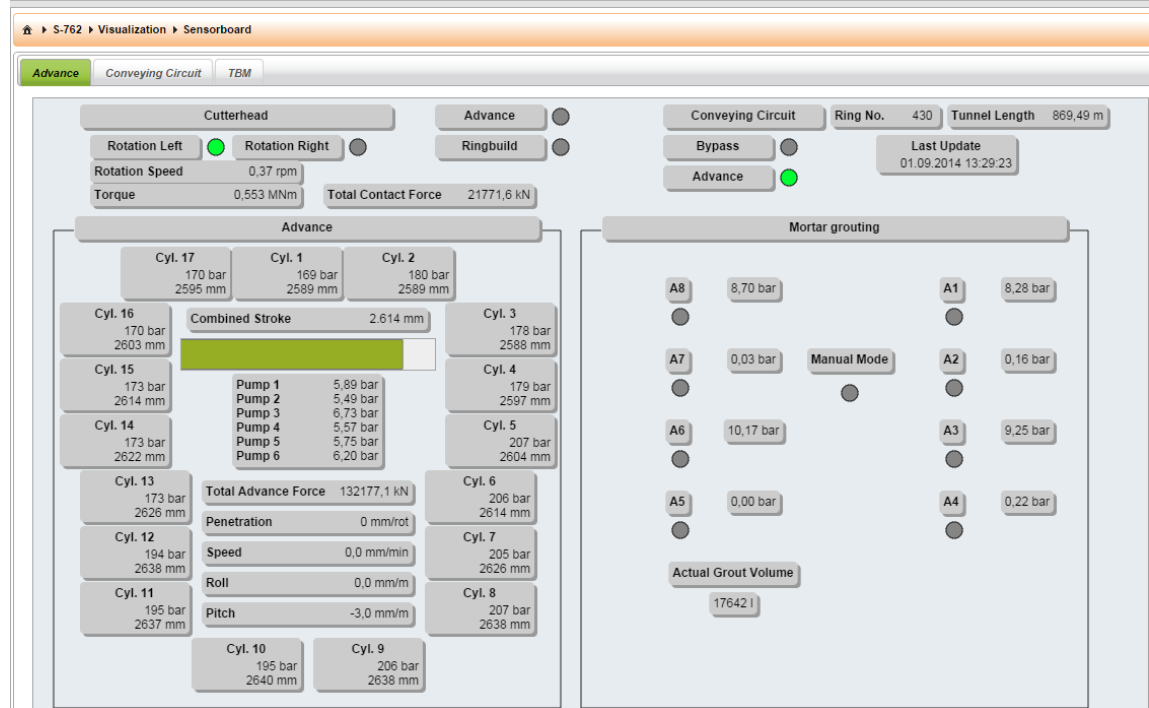
- Tork (kNm)

- Penetrasyon (mm/rev)

- Kesici Kafanın Dönüş Sayısı (rpm)

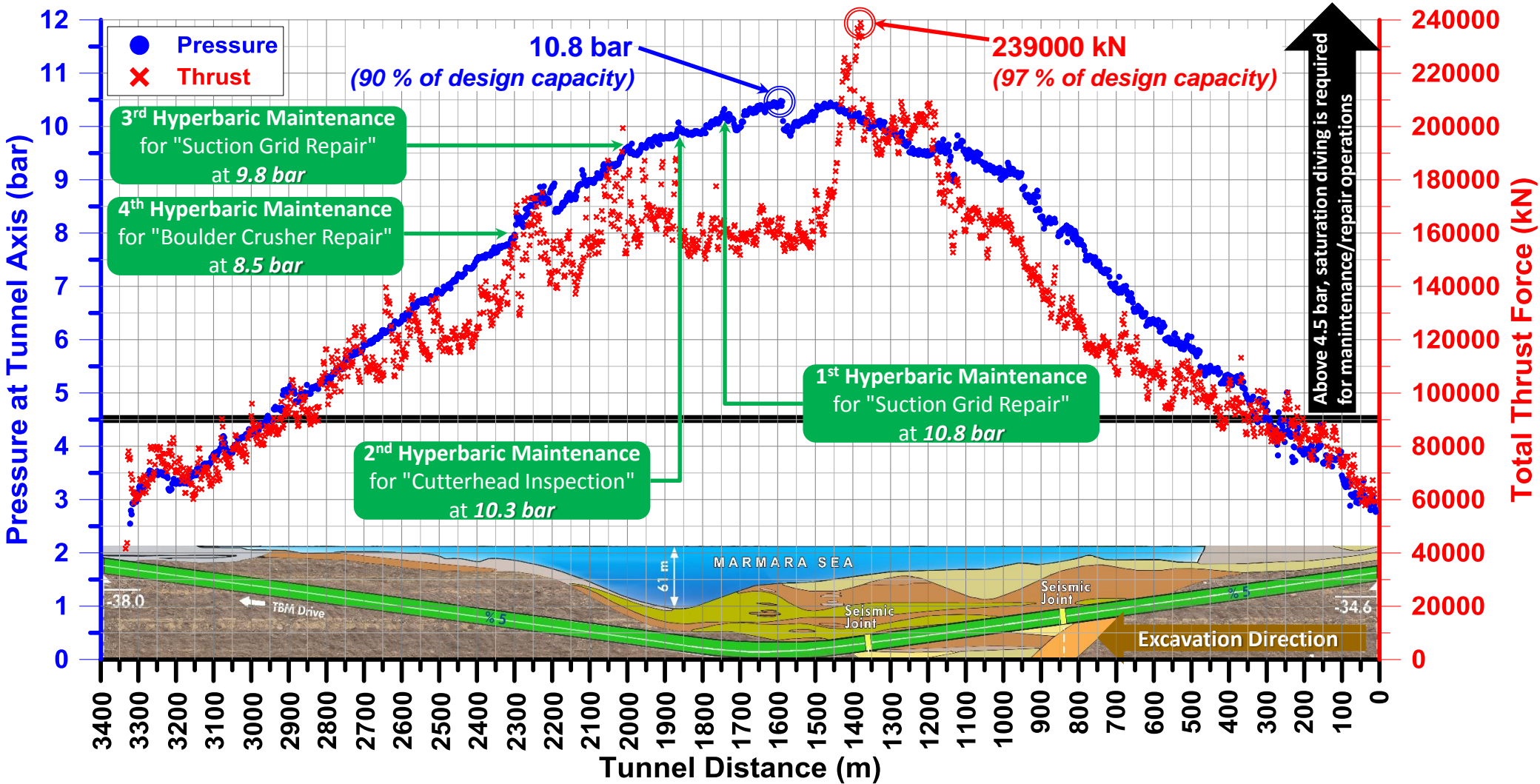
- Arın Basıncı (bar)

- TBM Kullanım Oranı (%)





ARIN BASINCI VE TOPLAM İTME KUVVETİ



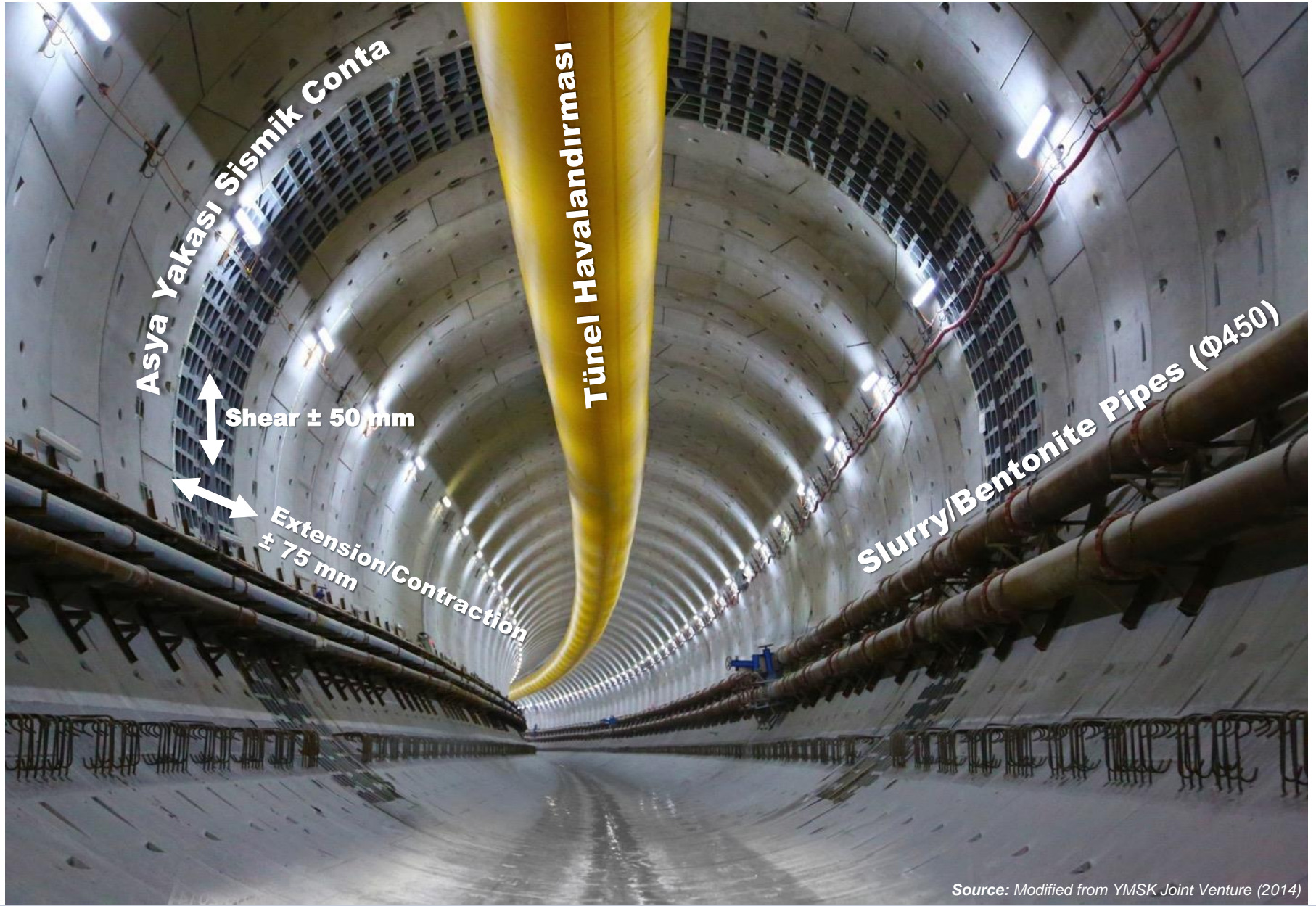
Source: Arioglu et al. 2016©



❖ ANA DURMALAR VE NEDENLERİ

No	Ring (distance)	Completed Tunnel (%)	Face Support Pressure (bar)	Duration (days)	Description of Standstill
1	126 (252 m)	7.5	4.2	20	Cutterhead repair by compressed air diving (Cutterhead damaged due to failure of disc cutter sensors. Some buckets replaced, composite plates and pins welded)
2	195 (390 m)	11.7	5.2	9	Disc cutter replacement under atmospheric pressure
3	270 (540 m)	16.2	6.0	9	Disc cutter replacement under atmospheric pressure
4	430 (860 m)	25.7	8.2	6	Asian side seismic joint installation
5	568 (1136 m)	34.0	9.0	4	Religious holiday
6	587 (1174 m)	35.1	9.7	6	Cutting tool and brush replacement under atmospheric pressure
7	690 (1380 m)	41.3	10.1	7	European side seismic joint installation
8	875 (1750 m)	52.4	10.8	15	Suction grid repair by saturation diving
9	933 (1866 m)	55.9	10.5	8	Cutterhead inspection by saturation diving (6 cm x 75 cm x 200 cm metal pieces were taken out from jaw crusher area)
10	1003 (2006 m)	60.1	10.1	5	Suction grid repair by saturation diving (Middle section of the old suction grid was removed and the new one was installed)
11	1146 (2292 m)	68.6	8.9	19	Boulder crusher repair by saturation diving
12	1499 (2998 m)	89.8	4.2	4	Religious holiday
Total Standstills				112	<i>Note that 8 days holiday and 13 days seismic joint installations were mandatory.</i>

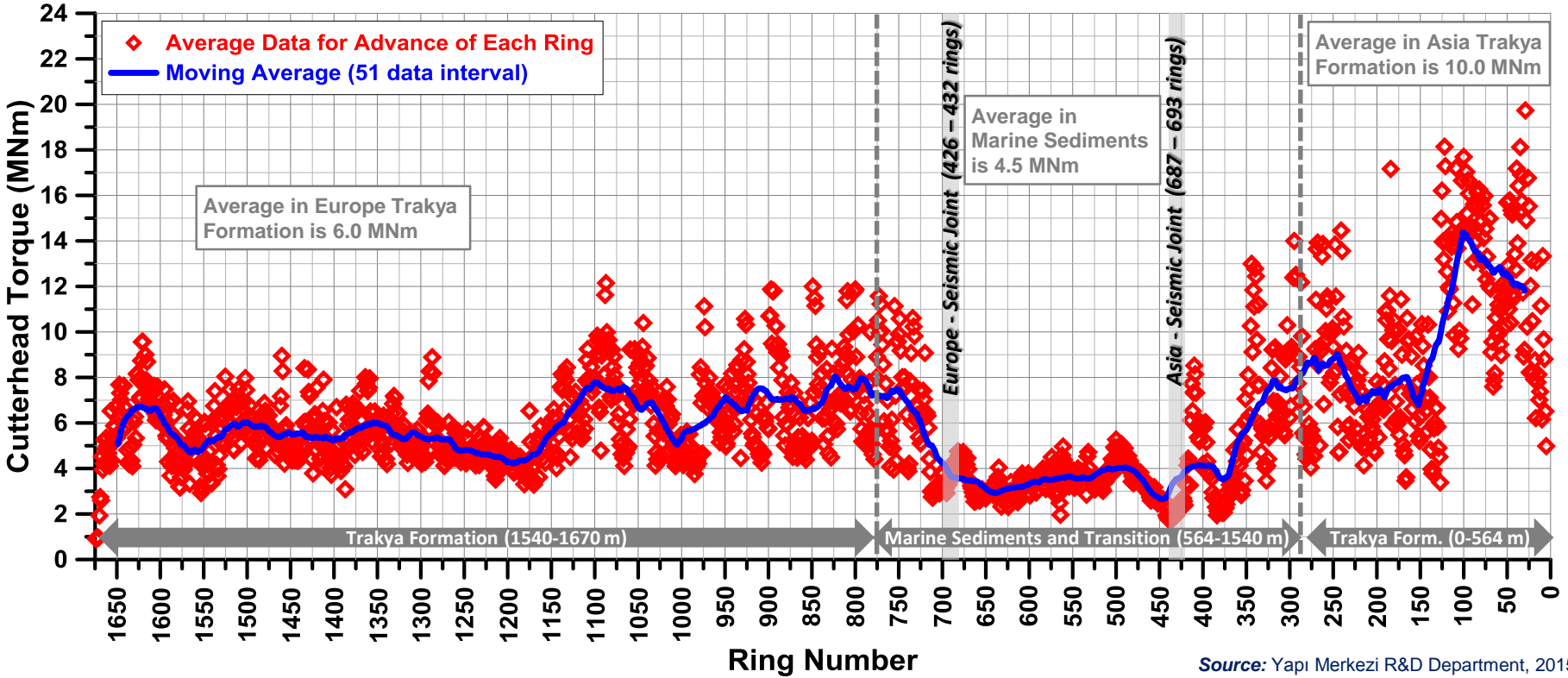
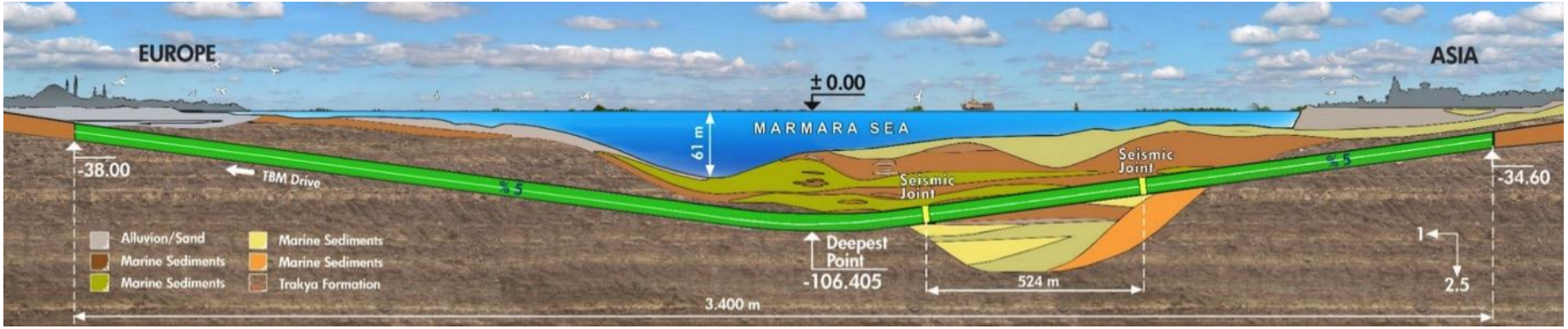
Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2016©



Source: Modified from YMSK Joint Venture (2014)



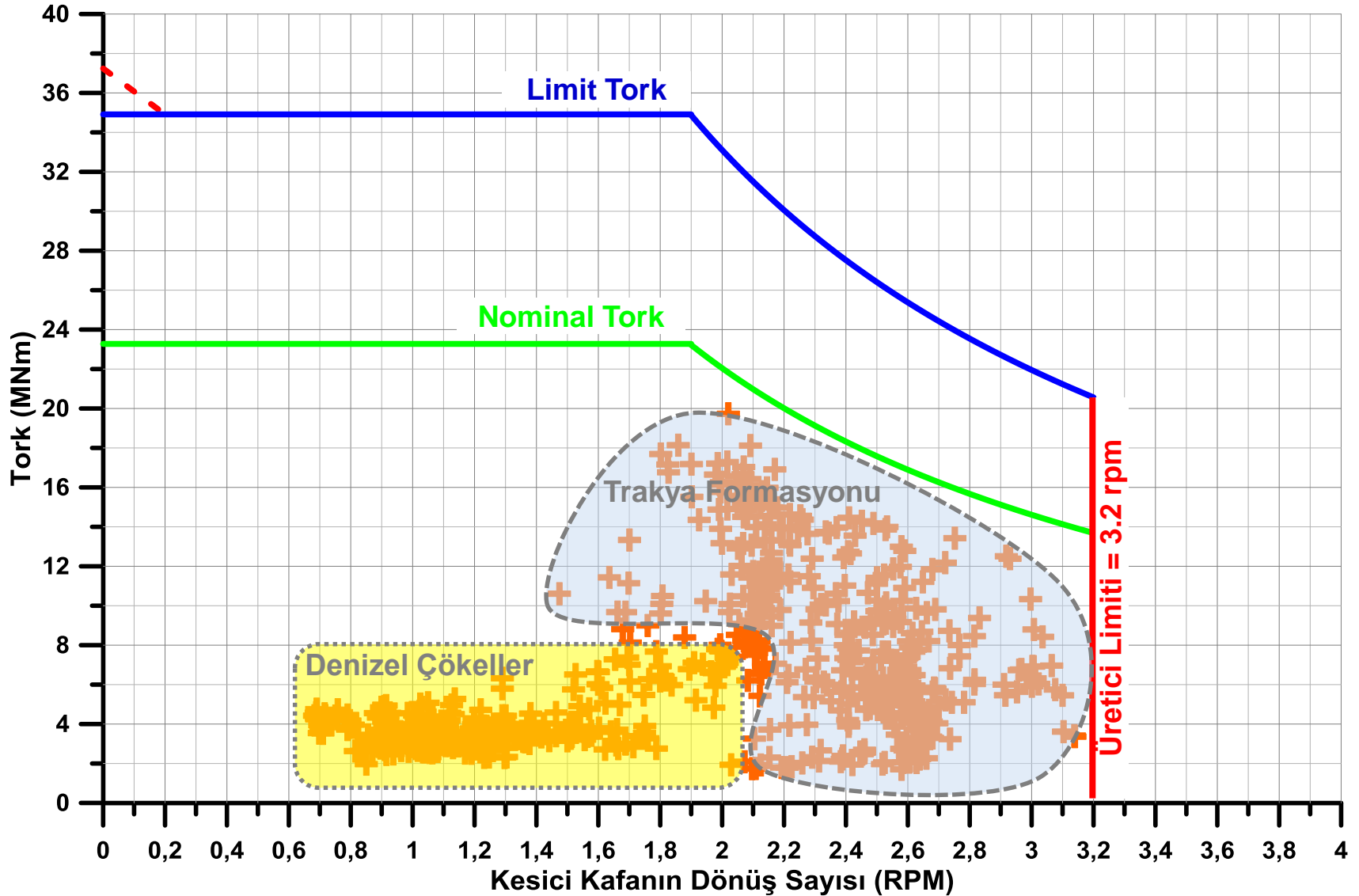
❖ KESİCİ KAFA TORKU



Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2015©



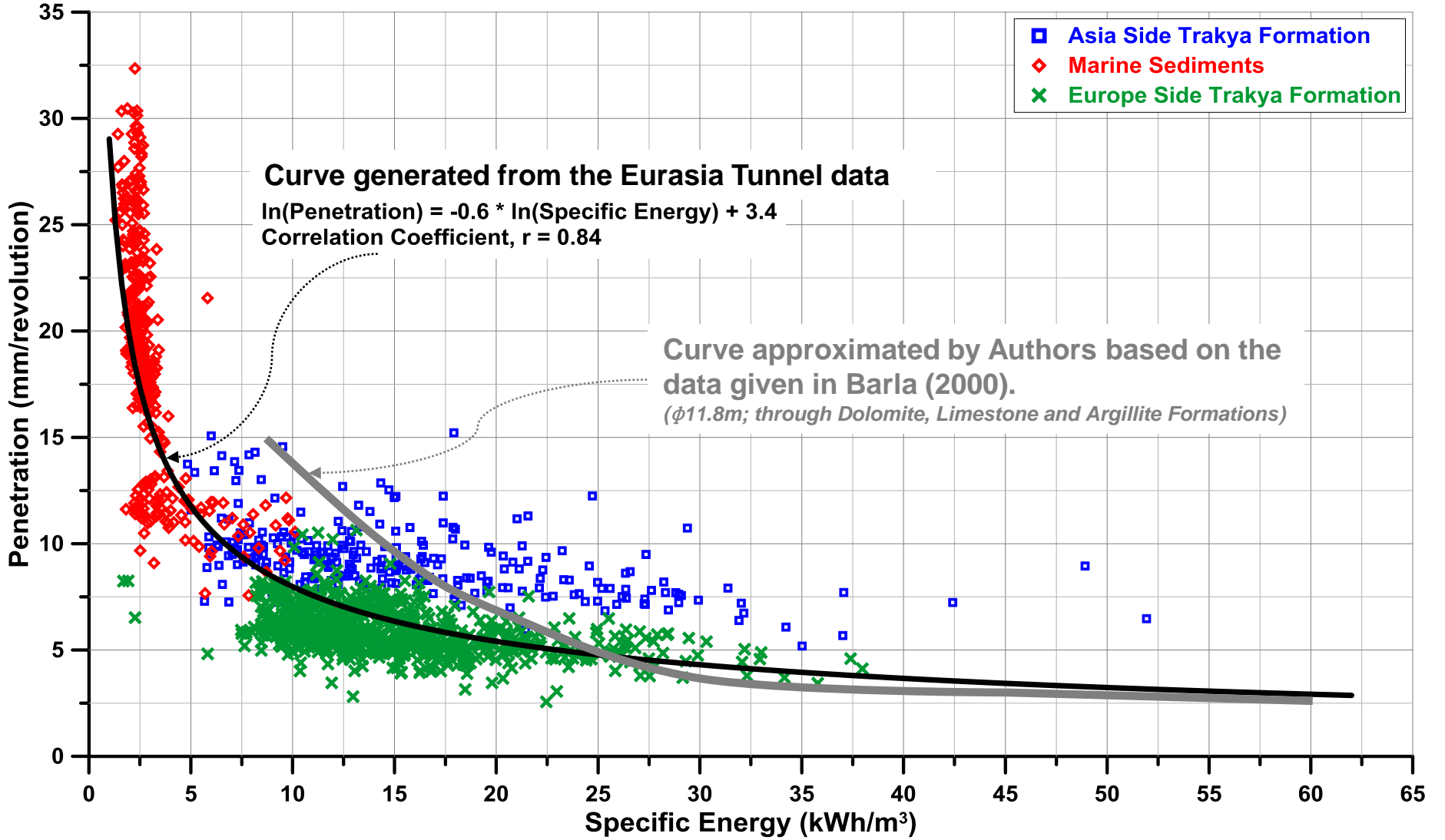
❖ KESİCİ KAFA TORKU VE KESİCİ KAFA DÖNME HIZI



Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2015©

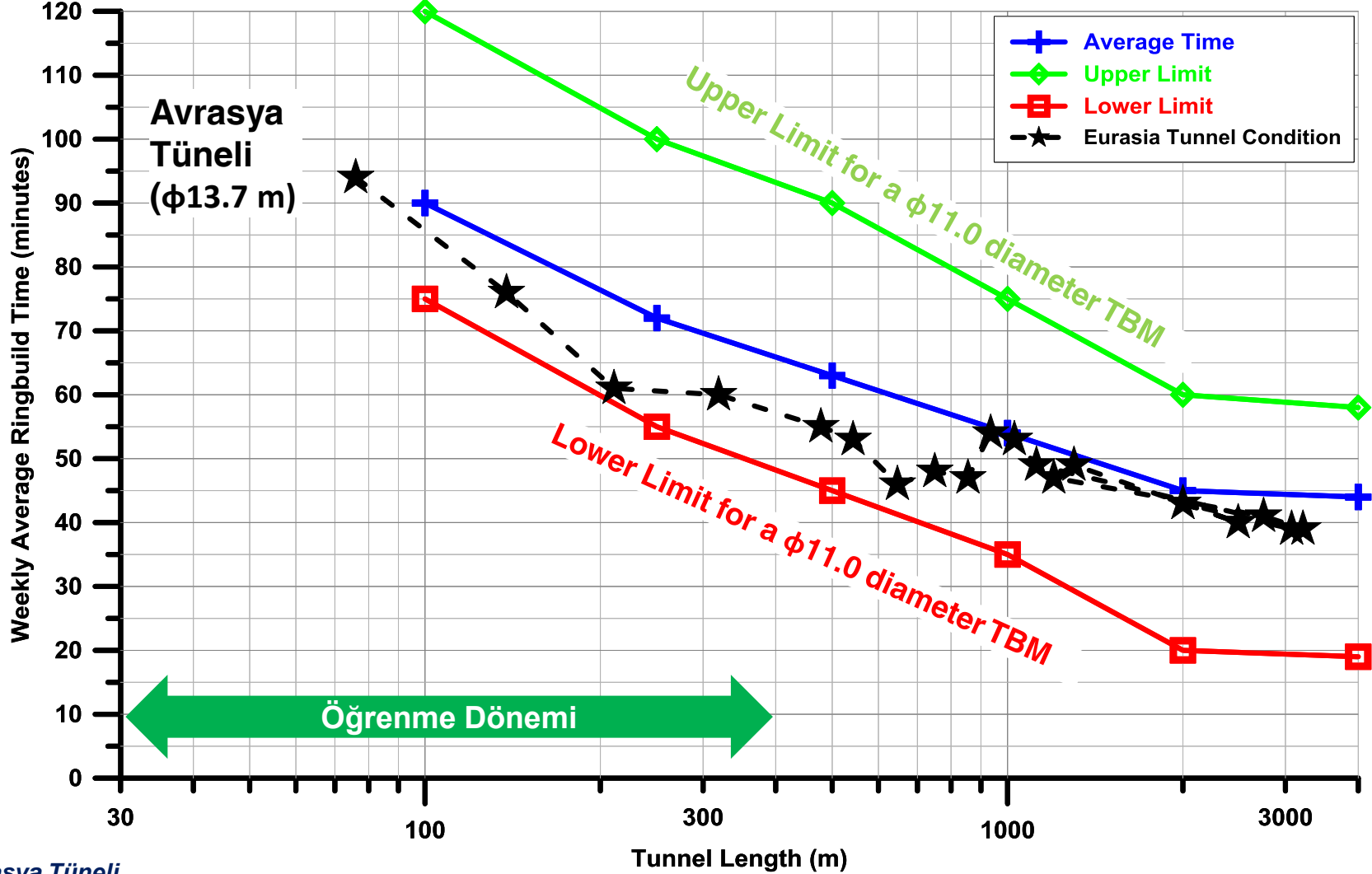


❖ SPESİFİK ENERJİ VE PENETRASYON





❖ RİNG KURMA SÜRESİ



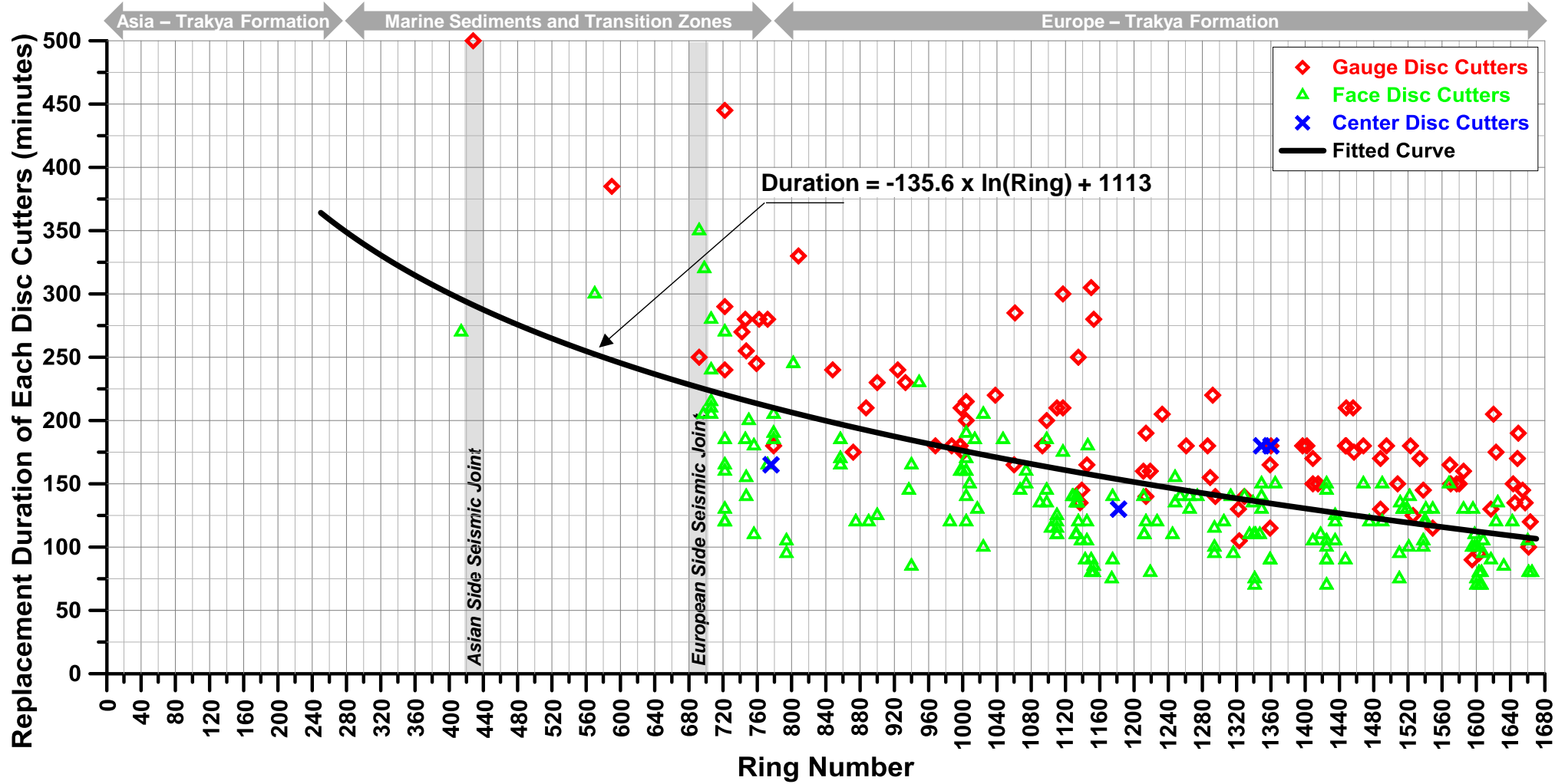
Avrasya Tüneli

- En ağır segment 15 t ve toplam ring (8+1) ağırlığı 127 t.
- Segment erektörün kapasitesi 16 t.

Source: Limits by Maidl and Comulada (2011), Eurasia data by Yapı Merkezi R&D Department, 2015©



❖ KESİCİ DİSK DEĞİŞTİRME SÜRESİNİN DEĞİŞİMİ

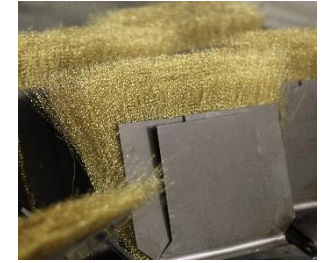


Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2015©

❖ DEĞİŞTİRİLEN KESİCİ DİSK, KESKİ VE FIRÇALAR

➤ Formasyon bazında değişim sayıları

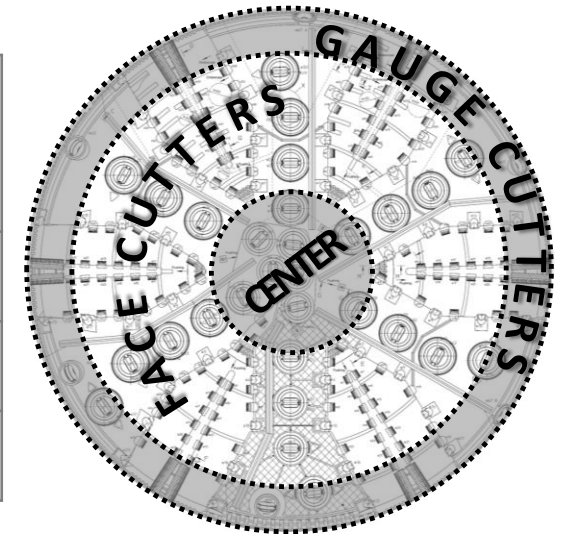
Araç	Asia Side Trakya Formation (0 – 564 m)	Transition Zones and Marine Sediments (565 m - 1540)	Europe Side Trakya Formation (1541 m – 3340 m)	Toplam
Kesici Disk	54	69	325	448
Keski	16	17	52	85
Fırça	0	475	0	475



Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2015©

➤ Kesici disklerin değişimi için kimi kazı parametreleri

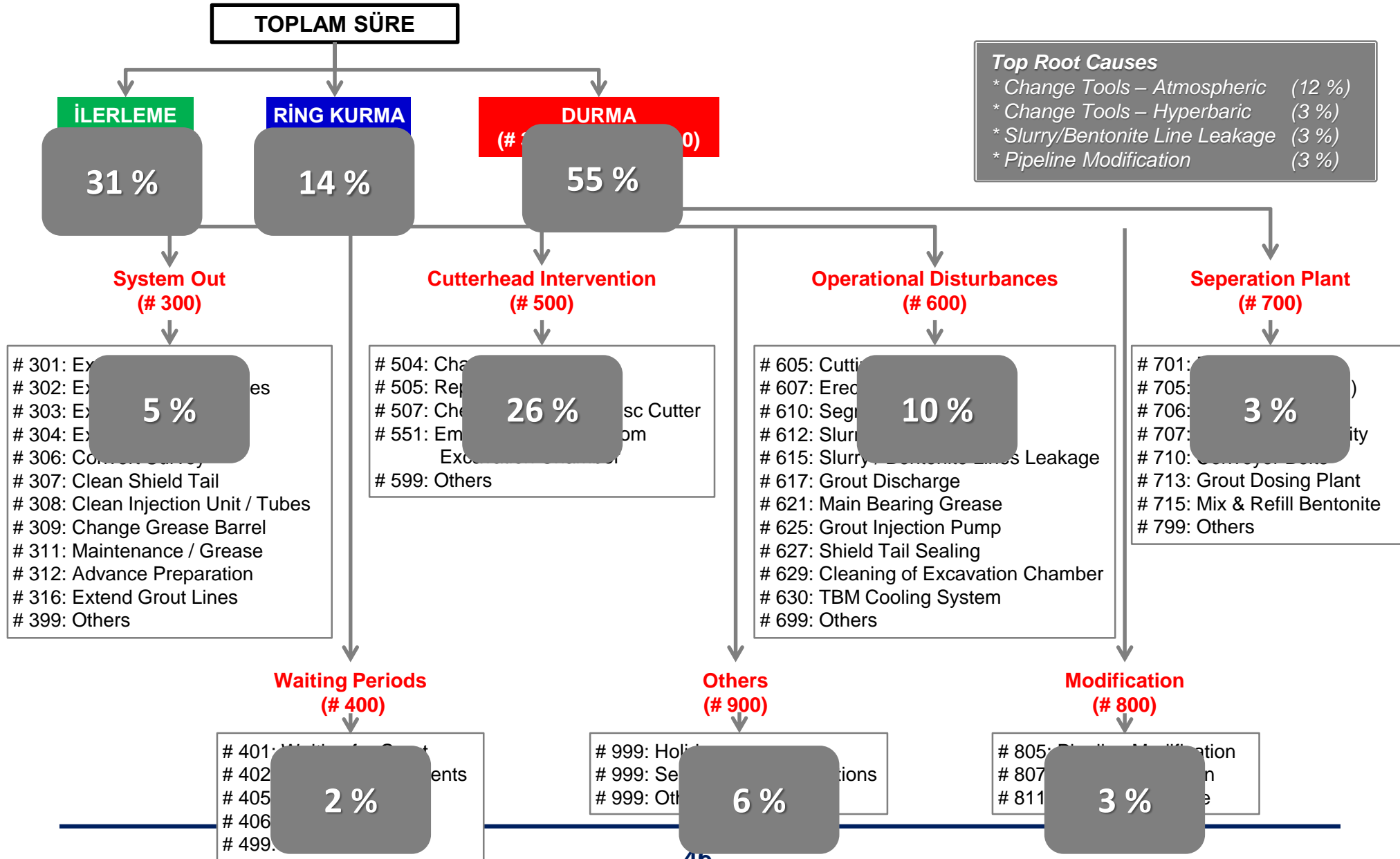
Kesici Disk Tipi	Number on Cutterhead	Average Excavated Linear Tunnel Distance (m)	Average Tracked Length (km)	Average Excavated Volume (m ³)
Merkez (center)	6	1534	834	1445
Ayna (face)	23	284	984	1126
Dış (gauge)	6	97	697	703



Source: Yapı Merkezi R&D Department, 2015©



ZAMAN DAĞILIMI

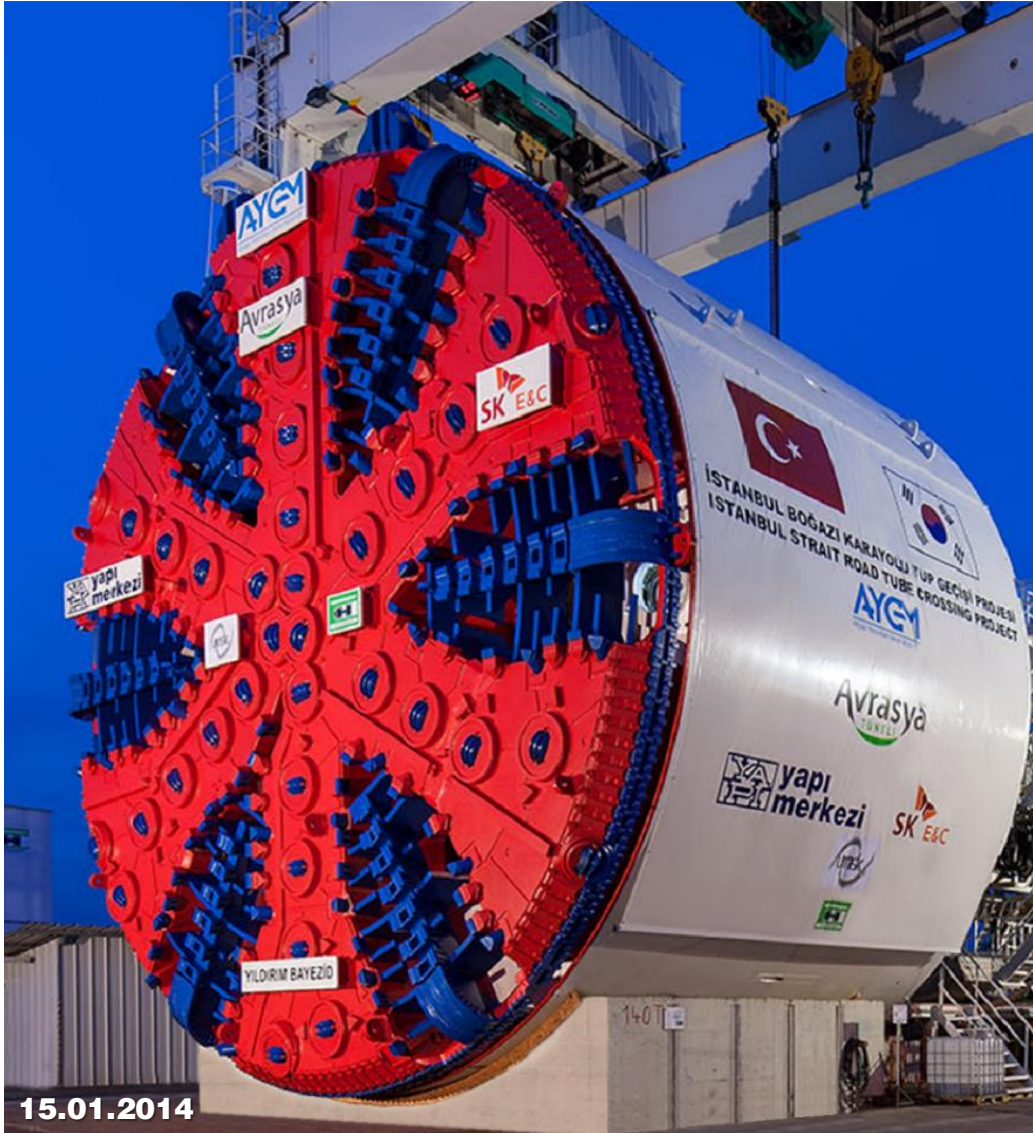


Top Root Causes

- * Change Tools – Atmospheric (12 %)
- * Change Tools – Hyperbaric (3 %)
- * Slurry/Bentonite Line Leakage (3 %)
- * Pipeline Modification (3 %)



❖ KİMİ FOTOĞRAFLAR









Asya Yakası Portalı



Avrupa Yakası Portalı



Acil Çıkış



Tematik Tünel Işıklandırması

BETON KAPALAMALAR





❖ TÜNEL BİLEZİĞİNİN GEOMETRİK VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Parametre	Değer
Bilezik Dış / İç Çapları	$D_d = 13.2 \text{ m} / D_i = 12.0 \text{ m}$
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)
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	$f_{ç,ana} = 420 \text{ MPa} / f_{ç,diğer} = 480 \text{ MPa}$
Ana Donatı Çapı	12 x $\emptyset 26.0 \text{ mm}$
TBM Patlatma (<i>bursting</i>) Donatı Çapı	3 x $\emptyset 19.2 \text{ mm}$
Beton Hacmi ve Ortalama Donatı Miktarı	47.5 m ³ /bilezik ve 157 kg/m ³
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 Toplam Ağırlığı	6.66 t / 119 t



❖ TÜNEL BİLEZİĞİNİN GEREKLİLİKLERİ

Denizaltı tünel bileziklerinde servis ömrü boyunca istenilen gereklilikler şunlardır:

- Etkiyecek tüm yükleri stabiliteyi zedelemeyen taşımalıdır. **(dayanım koşulu)**
- Donatı korozyonuna eden olan CO_2 / Cl^- konsantrasyonlarının donatıya ulaşmaması için çatlak genişliği 0,2 mm den küçük olmalıdır. **(hacim sabitliği koşulu)**
- Deniz suyu ve çökellerinden difüzyon yolu ile CO_2 / Cl^- konsantrasyonlarının geçişini önleyecek dayanıklılıkta, yani yüksek performanslı olmalıdır. **(dayanıklılık koşulu)**
- Özellikle beton karışımında kullanılan enerji tüketimi elverdiğince en az düzeyde olmalıdır. Ayrıca, dayanıklılık koşulunu sağlayan bileziklerin tünelin işletmesi esnasında oluşacak tamir ve bakım masrafları makul düzeyde olmalıdır. **(sürdürülebilirlik koşulu)**



❖ TÜNEL BİLEZİĞİNİN ANA TASARIM ÖLÇÜTLERİ

- C 50/60 sınıfında ve **100 yıllık servis ömrü** esasına göre tasarımı yapılmış olan yüksek performanslı betonun kullanılması,
- Betonun “**su / çimento**” oranının ≤ 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 cürufllu çimentonun kullanıldığı alternatiflerden birinin tercih edilmesi istenmiştir.

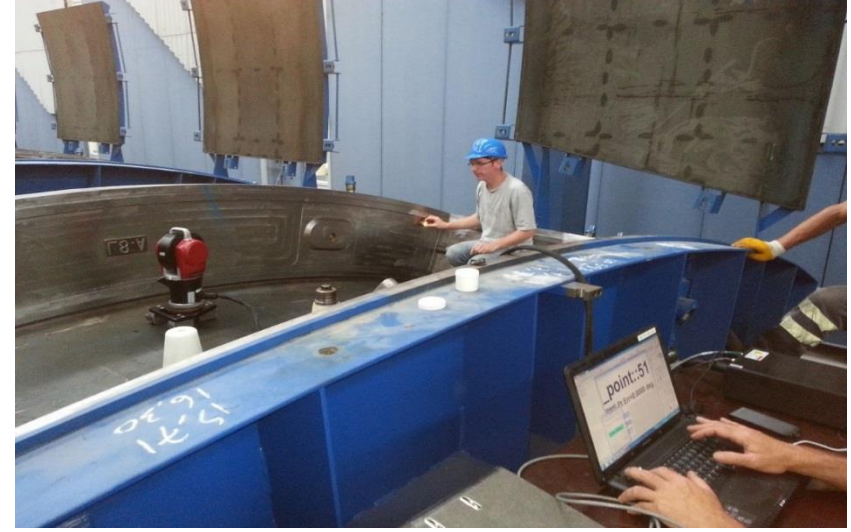
❖ BETON KARIŞIM TASARIMI

- C_3A (*trikalsiyum aliminat*) içeriği $\leq 5\%$ olan, düşük hidratasyon ısısına sahip, düşük alkali içerikli **CEM-I-42.5N tipi -Portland- çimento**,
- **F tipi uçucu** kül ile silis dumanı,
- Ömerli yöresinin yoğun **kireçtaşı agregaları**, ve yıkanmış elenmiş kırma kumu,
- Şile ve Çatalca’ dan temin edilen yıkanmış-elenmiş doğal kum,
- Kullanılan çimento ile uyumlu polikarboksilat kökenli **hiperakışkanlaştırıcı** katkı maddesi tercih edilmiştir.
- Ayrıca, hem kılcal çatlak oluşumunun önlenmesi hem de yangın direncini artıran **polipropilen** lif kullanılmıştır.

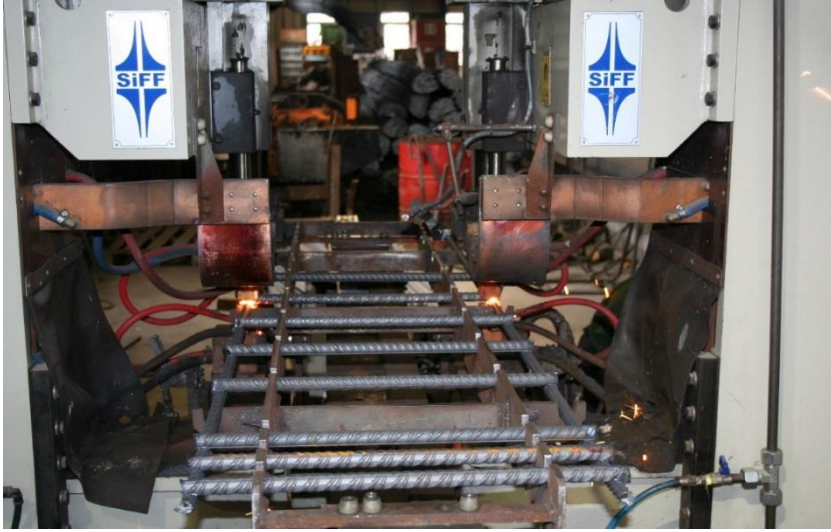
❖ KALIPLARIN HAZIRLANMASI VE KONTROLÜ



❖ KALIPLARIN 3-D KONTROLÜ



❖ DONATILARIN HAZIRLANMASI



❖ DONATILARIN KALIPLARA YERLEŞTİRİLMESİ



❖ BETON DÖKÜMÜ



❖ ÜRÜN KONTROLÜ



❖ KÜR UYGULAMA – CONTALAMA



❖ ÜRÜN İZLEME SİSTEMİ

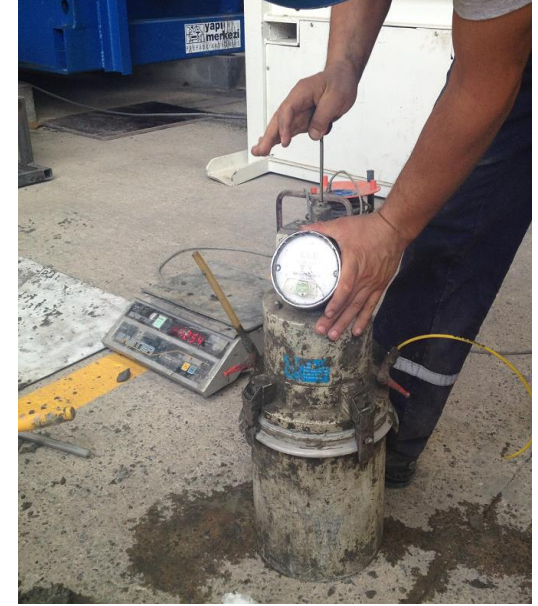
Üretilen 15.057 segment Barkod sistemi ile takip edilmiştir.

- ✓ Santralde beton karışımı,
- ✓ Donatı üretimi,
- ✓ Segment üretimi,
- ✓ Kalite yönetimi arayüzü,
- ✓ Stoklama aşaması,
- ✓ Nakliye aşaması,
- ✓ Segmentlerin tünele yerleşimi,



❖ TAZE BETON DENEYLERİ

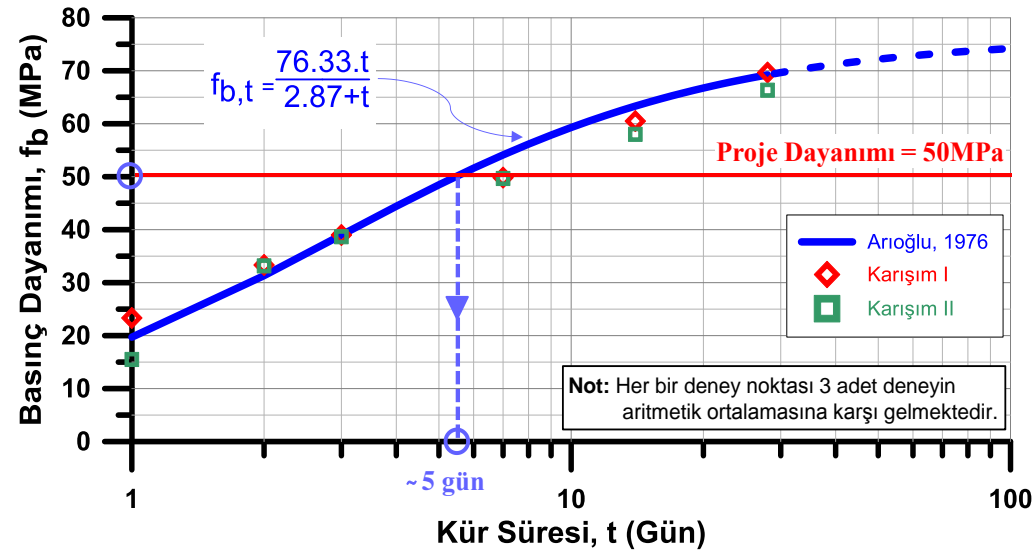
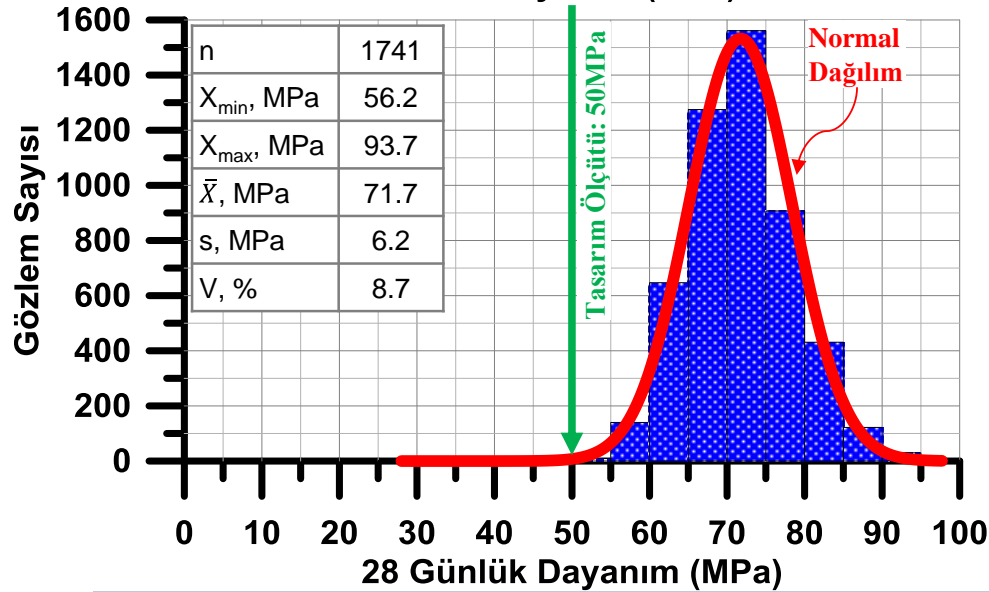
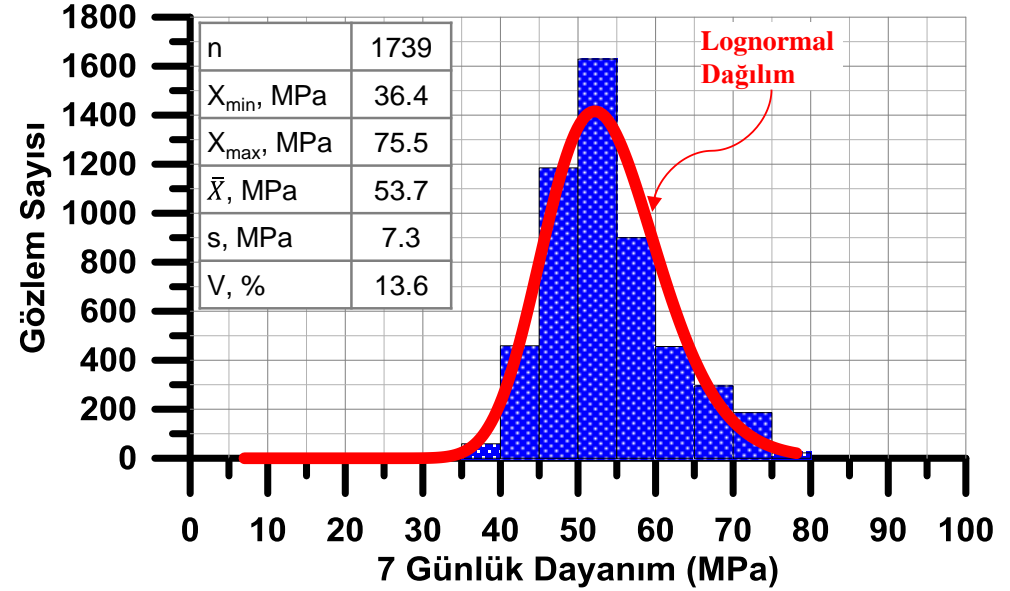
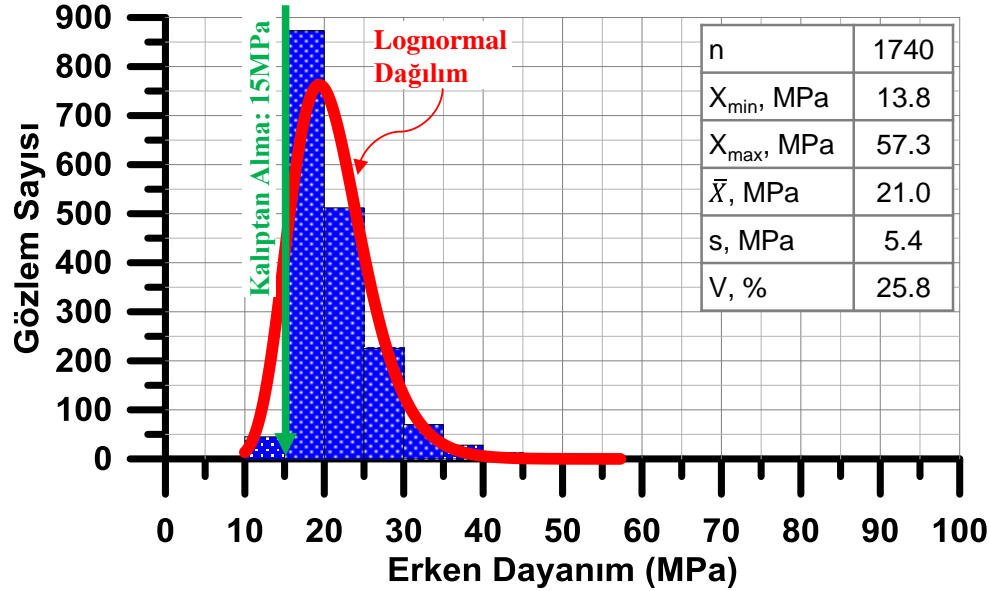
Yapılan deneyler: Sıcaklık ölçümü, Çökme / Yayılma, Birim Ağırlık, Hava miktarı



İstatistiksel Büyüklükler	Beton Sıcaklığı (°C)	Yayılma (cm)	Hava Miktarı (%)	Beton Birim Ağırlığı (kg/m ³)
Deney Sayısı (n)	14997	14994	1356	1407
En Küçük Değer (x _{min})	7.5	31.0	1.6	2371
En Büyük Değer (x _{max})	36.3	59.0	3.2	2480
Aritmetik Ortalama (X)	23.7	44.1	2.3	2432
Standart Sapma (s)	5.6	2.3	0.3	22.0
Değişkenlik Katsayısı (v)	% 23.6	% 5.3	% 13.1	% 0.9



❖ SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ



❖ ÜRETİM SONUÇLARI

- Avrasya Tüneli Projesi kapsamında kullanılmak üzere üretilen 15057 adet segment 17 aylık bir süreçte üretilmiş ve üretimlerde **80 000 m³** beton kullanılmıştır.
- Yaklaşık **56 000** kalite kontrol deneyi yapılmıştır.
- Olarak elde edilmiştir. Üretilen bu betonların ömrü uluslararası sertifika kuruluşunca **en az 141 yıl** olarak rapor edilmiştir.

Karışım No	Hızlı Klor Geçirimsizliği (Coulomb)									Klor Geçirimsizlik Katsayısı (10 ⁻¹² x m ² /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} x 100

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 15057 adettir.

SONUÇLAR



- **Yap-İşlet-Devret Projesi**
- **Zorlu Proje** (*geometrik kısıtlamalar, eratik jeoloji, yüksek sismisite, hiperbarik koşullar, yüksek makine talepleri*)
- **Zorluklarla Mücadele**
 - ❖ **Ön çalışmalar**
(*literatür / masa başı çalışmaları ve detaylı saha / laboratuvar çalışmaları*)
 - ❖ **En son TBM teknolojisi** (*ileri izleme sistemleri, atmosferik ortamda disk ve keski değişimi, delme ekipmanı, özel basınç ekipmanları*)
 - ❖ **Sürekli izleme, bilgi işleme ve biriken bilgileri etkin kullanma**
(*kazı parametreleri ve durma kök nedenleri*)
 - ❖ **Sismik Contalar**
(*geliştirildi, tasarlandı, yeri belirlendi, test edildi, yerleştirildi, teyit edildi*)
 - ❖ **Projenin tüm konularında uzmanlar ile çalışma**
 - ❖ **Efektif öğrenme periyodları**
(*disk ve keskilerin değişim süreleri, ring kurma süreleri*)
 - ❖ **Deneyimli TBM ekibi** (*ortalama **2.8 TBM projesi / personel** ve ortalama **15.0 km TBM tüneli / personel***)
 - ❖ **Beton kaplamalar** (*en az 141 yıl servis süresi, yüksek kalite, sürdürülebilir*)
- **Faydalar**
 - ❖ **100 dakikadan 15 dakikaya** düşen süreler
(*azalan emisyonlar, yakıt tüketimi, bakım masrafları ve gürültü*)
 - ❖ **Kısaltılan inşaat süresi (~8 ay)**



TBM Çıkışı: 22/08/2016 - 17:00

Ortalama Günlük İlerleme Hızı: 7.0 m/day

Kullanım Oranı: %31