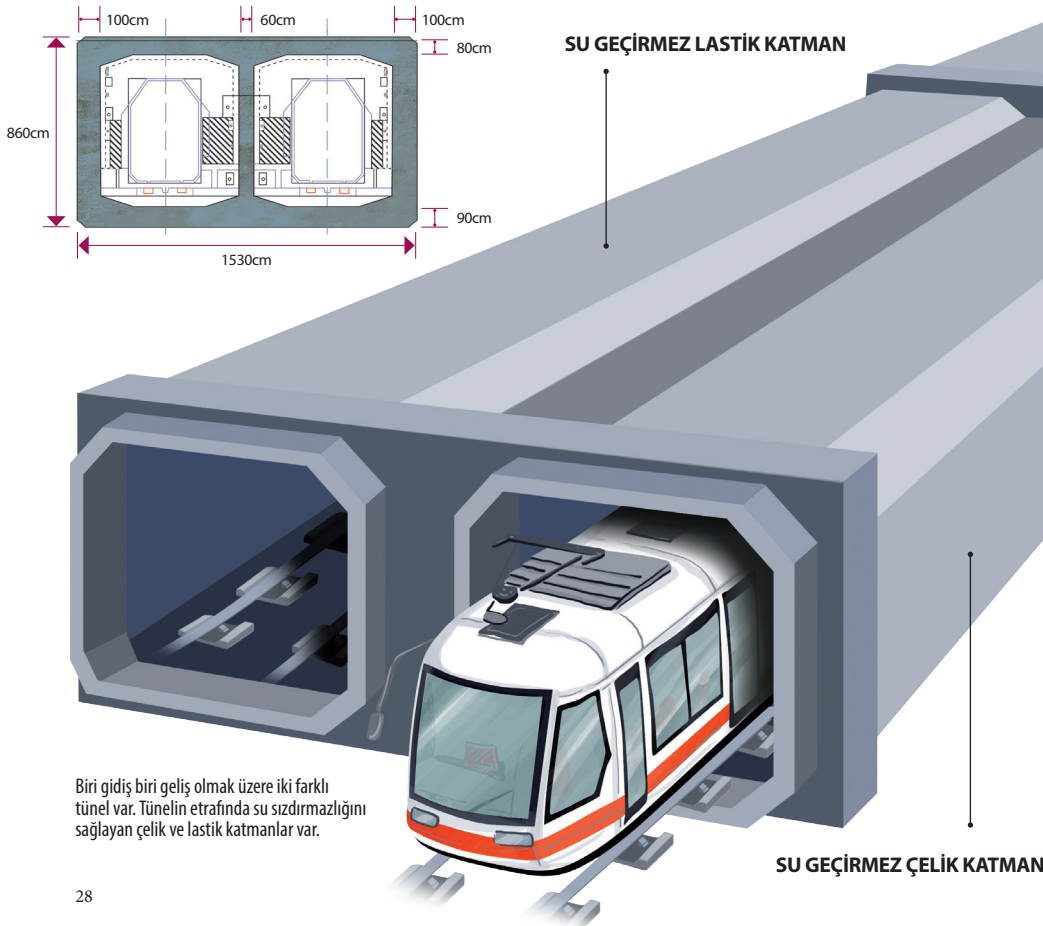


# Marmaray Hakkında Teknik Bilgiler

İlk fizibilite etüdü 1985'te yapılan, 1997'deki güzergâh güncellemelerinden sonra projesi tamamlanan Marmaray, Asya ve Avrupa yakalarındaki 63 kilometrelik banliyö hatlarının mekanik ve yapısal olarak iyileştirilmesini ve bu hatların bir kısmı İstanbul Boğazı'nın altından geçen toplam uzunluğu 13,6 kilometre olan tünellerle birbirine bağlanmasını içeriyor.

Marmaray Gebze'de başlıyor ve Ayrılıkçeşme'ye kadar yüzeyden geliyor. Daha sonra yeraltına inmeye başlayan hat, Boğaz'ı geçtikten sonra Kazlıçeşme'de tekrar yüzeye çıkıyor ve Halkalı'ya kadar devam ediyor. Proje ile daha önce Gebze-Söğütlüçeşme ve Kazlıçeşme-Halkalı arasında bulunan hat sayısı ikiden üçe çıkarılıyor. Hatların ikisini banliyö trenlerinin, birini ise şehirlerarası yük ve yolcu trenleri ile Ankara-İstanbul arasında çalışan Yüksek Hızlı Trenlerin (YHT) kullanması planlanıyor. Daha önce bu güzergâhta bulunan 37 yerüstü istasyonunun 36'sı yenileniyor. Kazlıçeşme'deki eski istasyonun doğusuna da yeni bir istasyon yapıldı. Buna ek olarak hattın yeraltına indiği kısımlarda yeni üç istasyon inşa edildi. Yolcuların yeraltı tünellerine ulaşmasını sağlayacak olan bu istasyonlar Üsküdar'da, Sirkeci'de ve Yenikapı'da.







**H**at, trenlerin saatte 100 kilometrelik hızla hareket edebileceği biçimde tasarlanmış. İşletme sırasında ise araçların saatte ortalama 45 kilometre yol alması planlanıyor. Böylece toplam uzunluğu 76 kilometreyi aşan Gebze-Halkalı hattının bir ucundan diğerine 105 dakikada ulaşılacaktır. Üsküdar istasyonundan Sirkeci istasyonuna gitmek -yani Boğaz'ı geçmek- ise sadece 4 dakika sürecek. 2-10 dakikada bir yapılacak seferlerle, bir yönde saatte 75.000 yolcu taşınabilecek.

Böylece raylı taşıma sistemlerinin İstanbul trafiğindeki payı %3'ten %27'ye çıkacak ve her gün bir milyon insan raylı sistemlerden yararlanacak.

Hattın Sirkeci, Üsküdar, Yenikapı, İbrahimağa ve Küçükçekmece istasyonlarında diğer metro ve hafif raylı ulaşım sistemlerine bağlantısı var. İleride yapılması planlanan bağlantılar ile Atatürk Havalimanı'ndan Sabiha Gökçen Havalimanı'na sadece raylı sistem ile ulaşılacaktır.





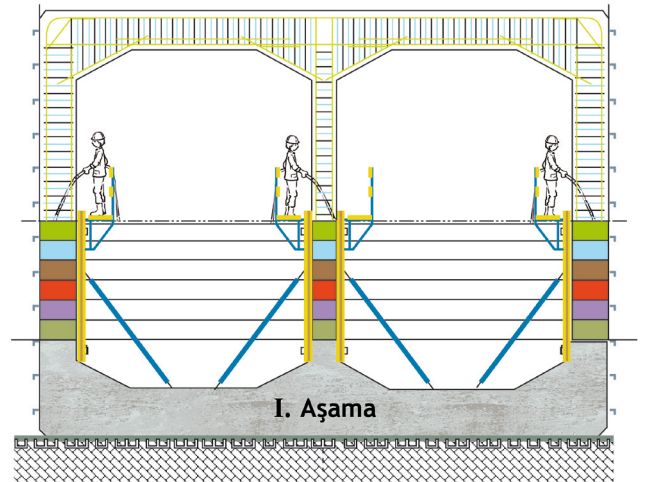
## Tüneller

Marmaray projesiyle iki kıtayı birbirine bağlamak için yeraltına 13,6 kilometre uzunluğunda tüneller inşa edildi. Ayrılıkçeşme istasyonunda başlayan tüneller Üsküdar istasyonundan geçtikten sonra Boğaz'ın altına giriyor. Avrupa yakasındaki ilk istasyon Sirkeci'de. Tüneller Yenikapı istasyonundan geçtikten sonra Kazlıçeşme'de son buluyor.

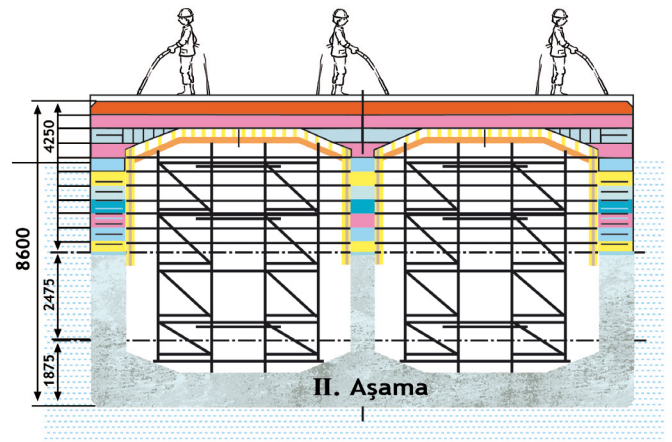
Marmaray'ın yer yüzeyinde olan kısmının aksine tünellerin olduğu kısımda sadece iki hat var. Biri gidiş biri geliş olan bu hatlar iki farklı tünelden oluşuyor. Tünelleri inşa ederken üç farklı yöntem kullanıldı. Yapılan tüneller inşa edilme yöntemlerine göre delme tüneller, aç-kapa tüneller ve batırma tüp tüneller olarak adlandırılıyor.

**Aç-Kapa Tüneller:** İnşa edilen aç-kapa tünellerin uzunluğu 2,4 kilometre. Daha çok yer yüzeyinden fazla derinde olmayan tünelleri açmak için tercih edilen bu yöntemde, önce kazı yapılıyor. Daha sonra tünel inşa ediliyor ve üzeri kapatılıyor. Bu teknik Marmaray projesi sırasında Yenikapı ve Üsküdar'da inşa edilen yeraltı istasyonlarında ve bu istasyonların civarında kullanıldı. Yenikapı istasyonu yer yüzeyinden 17 metre, Üsküdar istasyonu ise 26 metre derinde.

**Delme Tüneller:** Bu tüneller inşa edilirken yer yüzeyi kazılmaz. Tünel Delme Makineleri (*Tunnel Boring Machine, TBM*) yeraltında tüneli kazarak ilerler. Günümüzde bu makinelerin açabildiği tünellerin çapı 1 metre ile 20 metre arasında değişiyor. Sert kayalardan yumuşak topraklara kadar her şeyi delebilen TBM'ler kullanılarak Marmaray projesi kapsamında 9,8 kilometre tünel inşa edildi. Marmaray'ın karaların altında kalan kısımlarındaki tünellerin büyük bir bölümünü oluşturan delme tüneller yapılırken, gidiş ve geliş hatlarının birbirlerinin inşasını etkilemeyecek mesafede olmasına dikkat edildi. Fakat servis personelinin tüneller arasında kolayca gidip gelebilmesi ve acil durumda kaçış imkânı sağlanabilmesi için, paralel tüneller her 200 metrede bir birbirine bağlandı. Bu teknikle yapılan Sirkeci istasyonu yer yüzeyinin 45 metre altında.



Önce batırma tüp tünellerin tabanları ve yan taraflarının alt kısımları kuru havuz içinde inşa edildi.



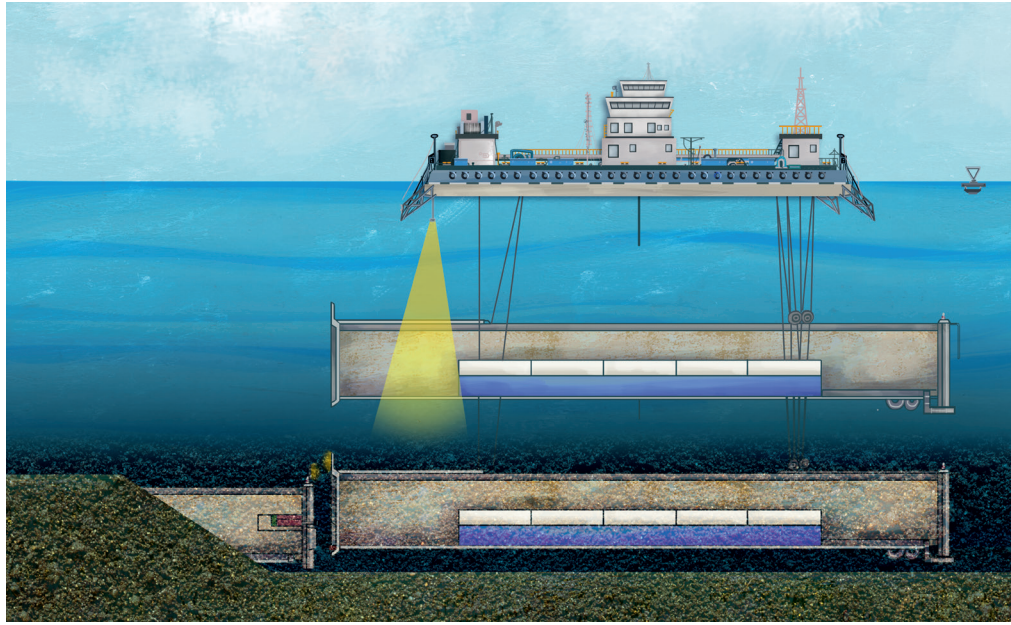
Batırma tüp tünellerin inşası rıhtıma çekilen tünel parçaları yüzer durumdayken tamamlandı.



Marmaray projesinde yapılan hat Gebze'de başlıyor ve Halkalı'da son buluyor. Ayrılıkçeşme'de başlayan yeraltı tünelleri Kazlıçeşme'de bitiyor.

dik

Gebze



Batırma tüp tünellerin birleştirilmesi. Ayrıntıları bu sayıyla birlikte verdiğimiz posterde bulabilirsiniz.

**Batırma Tüp Tüneller:** Su altında inşa edilen bu tüneller, başka bir yerde imal edilen tünel parçalarının birleştirilmesiyle oluşturulur. Tüneli meydana getiren tüpler imal edildikleri yerden tünelin yapılacağı bölgeye yüzdürülerek getirilir. Tünel, daha önce açılan hendeklerin içine batırılan tüplerin birleştirilmesi ile suyun dibinde oluşturulduktan sonra üzeri koruyucu bir tabaka ile kaplanır ve hendeğin üzeri kapatılır. Esasen suyun altına inşa edilen tünellerin delme tünel olarak da inşa edilmesi mümkündür. Fakat batırma tüp tüneller hem daha hızlı yapılabilir, hem sismik hareketlere karşı daha dayanıklıdır hem de daha ucuza mal olur. Bunun yanı sıra batırma tüp tünellerin inşası, delme tüneller göre çok daha güvenli koşullarda yapılır.

Marmaray projesinde Boğaz'ın altında kalan kısımlar batırma tüp tünel olarak inşa edildi. Bu tünellerin uzunluğu yaklaşık 1,4 kilometre. Bugüne kadar inşa edilmiş batırma tüp tüneller arasında en derine yapılmış tüneller olan Marmaray tünelleri en derin oldukları noktada deniz seviyesinin yaklaşık 58 metre altından geçiyor. Boğaz'ın altındaki kısımda Asya'dan Avrupa'ya doğru alçalarak giden tüneller eğimi en fazla %1,8.

Tüneli oluşturan parçalar Tuzla'daki Devlet Limanlar ve Hava Meydanları'na ait limanda imal edildi. İmalat sürecindeki

en önemli mesele, tünel parçalarının, kullanım ömürleri boyunca (100 yıl) tüneline bulunacağı koşullarda sorun çıkarmadan çalışacak bir biçimde tasarlanmasıydı. Bu amaçla tüneline su sızdırmaması ve üzerindeki yüksek basınca dayanabilmesi için çok sayıda çalışma yapıldı. Tüneli çevreleyen katmanların inşasında kullanılan beton Marmaray projesi için özel olarak geliştirildi. Malzeme istenen özelliklere sahip olup olmadığını belirlemek için hem laboratuvar ortamında hem de tüneline bulunacağı ortamda sınıandı.

Tünellerin imalatı iki aşamada tamamlandı. Birinci aşamada, her biri iki tünel parçasını alabilen iki kuru havuz içinde, önce tünellerin tabanları sonra da yan duvarlarının alt kısımları yapıldı. Bu aşama tamamlandıktan sonra tünel parçaları geçici olarak rıhtım bölgesine çekildi ve beton dökümü işinin geri kalan kısmı tek bir seferde, tüpler yüzer durumdayken yapıldı. Üretilen tünellerin beton kalınlıkları tabanda 90 cm, yan duvarlarda 100 cm, tavanda 80 cm, gidiş ve geliş yönlerini ayıran ara duvarda ise 60 cm oldu. Tünellerin su sızdırmazlığını sağlamak için, dış kısımları lastik ve çelikten mamul katmanlarla kaplandı. Ayrıca kullanım sırasında meydana gelebilecek korozyon etkinliklerini izleyebilmek amacıyla tünellere çeşitli cihazlar yerleştirildi. Bu cihaz-

lar arasında su sızdırmaz çelik katmanlardaki aşınmayı izlemek için çinko elektrotlar, betonların içindeki demirlerdeki aşınmayı izlemek için mangandioksit ( $MnO_2$ ) elektrotlar da var. Uzunlukları 98,5 metre ile 135 metre arasında değişen, 8,6 metre yüksekliğinde ve 15,3 metre genişliğindeki 11 tüp, imalatı tamamlandıktan sonra Tuzla'dan Üsküdar'a ve Sarayburnu'na kadar 40 kilometre yüzdürülerek getirildi. Tüpler taşınırken su sızdırmazlıklarını sınamak amacıyla Büyükkada açıklarında deneme batırışı yapıldı.

Tünellerin batırılma süreci, üzerinde uzun süre ön hazırlık yapılması gereken bir konuydu. Süreci zorlaştıran en önemli etken ise Boğaz'daki akıntılardı. Karadeniz'e dökülen ırmaklardan gelen az tuzlu su, denizin üst katmanlarında Marmara Denizi'ne doğru bir akıntı oluşturuyor. Derinlerde ise Karadeniz'e giden tuzlu suların oluşturduğu başka bir akıntı var. Yüzeyledeki akıntının hızı saniyede 3-4 metreye kadar çıkabiliyor, derinlerdeki akıntılar ise genellikle çok daha yavaş ve hızları saniyede 1 metreyi aşmıyor. Akıntının hızı mevsimlere ve hava koşullarına göre değiştiği ve batırma süreci zaman aldığı için, işlemlerin çalışanların güvenliğini tehlikeye atmadan yapılabileceği en uygun zamanların önceden belirlenebilmesi önemliydi. Ayrıca bu çalışmalar, İş-

tanbul Boğazı'nın genişliğinin yaklaşık 800 metre olduğu ve batırma için gerekli donanımların çalışabilmesi için 600 metre genişliğinde bir alanın kullanılması gerektiği düşünülürse, her yıl 50.000'den fazla ticari geminin geçtiği Boğaz'ın trafiğini aksatmamak için de gerekiyordu.

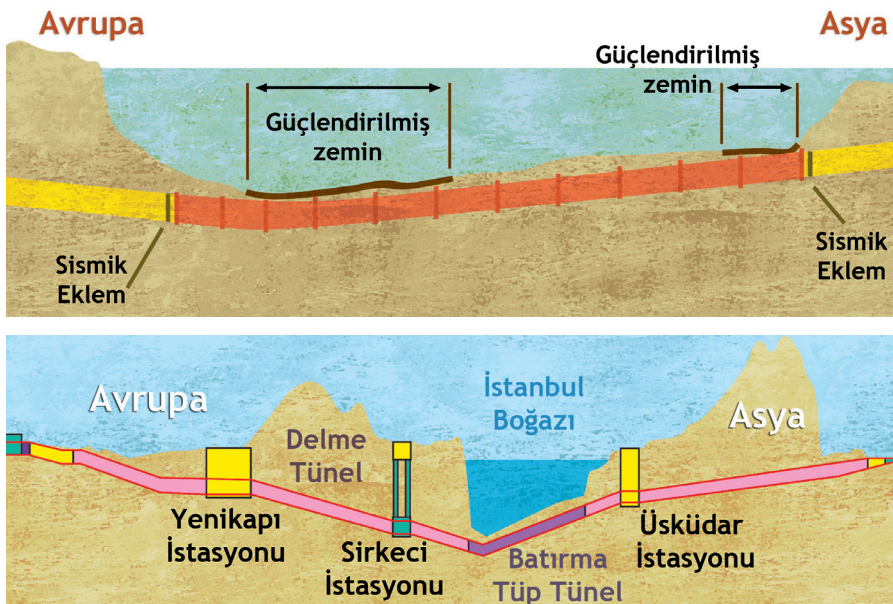
Batırma süreci için en uygun zamanın belirlenebilmesi amacıyla tünelin yapılacağı bölgedeki üç noktada akıntı hızları ölçülerek bir veritabanı oluşturuldu. Daha sonra da bu verileri tahmin edebilen bir bilgisayar programı yazıldı. Program tahmin yapabilmek için meteorolojik ve hidrolojik verileri kullanıyordu. Programın Karadeniz, Marmara ve bu denizlerin civarındaki karalar ile ilgili geçmişe ait verileri kullanarak belirli zamanlardaki akıntı hızlarını istenilen kesinlikte tahmin edebilmesi, güncel verileri kullanarak gelecekteki akıntı hızlarını da tahmin edebileceğini gösteriyordu. Marmaray projesinde inşa edilen batırma tünellerin batırılması sürecinde, akıntı hızının saniyede 1,5 metreyi aşmayacağı zamanlar tercih edildi. Batırılmalarını kolaylaştırmak için, iki ucu kapalı ve su sızdırmaz tüplerin içlerine işlemden sonra çıkarılacak olan, deniz suyu doldurulmuş tanklar yerleştirildi. Batırma tamamlandıktan sonra birleştirilecek tüplerin uygun konumda olup olmadığı tüplerin üzerine yerleştirilmiş süpersonik algı-

layıcılarla belirlendi. Tüm koşullar uygun duruma getirildikten sonra daha önce batırılmış tüpün içine yerleştirilmiş bir mekanizma ile yeni batırılan tüp inşa edilmekte olan tünel ile birleştirildi.

Marmaray'ın inşası sırasında önlem alınması gereken bir diğer konu depremlerdi. Kuzey Anadolu Fay Hattı, Marmaray'ın geçtiği bölgenin 13-20 kilometre güneyinde. Bu fay hattında geçmişte çok sayıda büyük deprem oldu ve yaşanan son depremler hattın batıya doğru hareket ettiğini gösteriyor. Bu fay hattındaki son büyük deprem olan İzmit depreminin üzerinden on dört yıl geçti ve İstanbul yakınındaki üç kırığın ikisi deprem döngülerinin sonlarına yaklaşıyor. Büyük bir olasılıkla bu hatta önümüzdeki 30 yıl içinde büyüklüğü -moment büyüklük ölçeğine göre- 7,5 civarında bir deprem yaşanacak. Marmaray'ın bir yüzyıl boyunca kullanılması planlandığı için deprem konusunda gerekli önlemlerin alınması şart. Bu amaçla Marmaray projelendirilirken şu kriterler göz önünde bulunduruldu:

- Deprem can kaybıyla sonuçlanmamalı
- Yapıda fonksiyon kaybı olmamalı
- Oluşan hasarlar kolay izlenebilir ve tamir edilebilir olmalı
- Batırma tüneller su geçirmezliğini devam ettirmeli
- Depremden sonra en kısa süre içinde Marmaray işleme devam edebilmeli

Depremlerin sebep olabileceği sivilaşmaları engellemek için riskli bölgelerde zemin güçlendirildi. Sismik eklemler yapının depremler sırasında bütünlüğünü korumasını sağlıyor.



Tüm bu kriterlerin karşılanması için Marmaray ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak projelendirildi. Marmaray'ın bulunduğu bölgede olası bir depremin sonuçlarını öngörebilmek için yapılan incelemelerde, hattın su altında kalan bazı kısımları civarındaki katmanlarda sivilaşma riski olduğu belirlendi. Bu riski ortadan kaldırmak için sivilaşma olması muhtemel bölgelerde zemin güçlendirme çalışmaları yapıldı.

Proje sırasında olası bir Marmara depreminde tsunami oluşması ihtimali de incelendi. Sonuçlar Adalar civarında su altındaki yamaçlarda meydana gelecek bir kaymanın, birkaç dakika içinde 3-6 metre yüksekliğinde tsunami dalgalarına sebep olabileceğini gösteriyor. Arşivlerde de daha önce meydana gelmiş benzer olayların kayıtları var. Bu yüzden sahile yakın yerlerdeki hemzemin istasyonların girişleri bir tsunami oluşması durumunda bile içeriye su giremeyecek şekilde yapıldı. Ayrıca Boğaz'ın her iki tarafına, su altında meydana gelebilecek baskınları engellemek ve böyle durumlarda yapının bütünlüğünü koruyabilmek için savaklar yerleştirildi.

Proje sırasında, depremin tahmin edilenden daha büyük olması ihtimali de göz önünde bulunduruldu. Yapı aşırı yüklenme durumunda hasar görse bile yıkılmayacak ve yolcuların güvenli bir biçimde kaçmalarına izin verecek süneklilikle inşa edildi. Ayrıca delme tünellerin, batırma tüp tünellerine yakın olan kısımlarında, olası bir deprem sırasında yapının bütünlüğünü koruyabilmek için, sismik eklemler yapıldı.

Çok sayıda mühendisin, mimarın ve işçinin yıllarca emek verdiği Marmaray'ın güzel günlere vesile olması dileğiyle.

Çizimler: Ayşe İnan Alican

#### Kaynaklar

- <http://www.marmaray.com.tr>
- Gökçe, A., ve ark., "The Challenges Involved in Concrete Works of Marmaray Immersed Tunnel with Service Life Beyond 100 years", *Tunneling and Underground Space Technology*, Cilt 24, s. 592-601, 2009.
- Lykke, S., Belkaya, H., "Marmaray Project: The Project and Its Management", *Tunneling and Underground Space Technology*, Cilt 20, s. 600-603, 2005.
- Ingerslev, L. C. E., "Considerations and Strategies Behind The Design and Construction Requirements of The Istanbul Strait Immersed Tunnel", *Tunneling and Underground Space Technology*, Cilt 20, s. 604-608, 2005.
- Lykke, S., van de Kerk, F., "Marmaray Project: Marine Operations, The Bosphorus Crossing", *Tunneling and Underground Space Technology*, Cilt 20, s. 609-611, 2005.
- Öztürk, M., Marmaray Projesi ve Boğaz Geçiş Kısımında Deprem Etkilerinin Analizi ve Tasarım Esasları, *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 2011.