

Marmaray Projesi Tünellerinde Pasif Yangın Koruma Çalışmaları

Serap Erdoğan

Avrasyaconsult Kalite Müdürü
E-Posta: serdogdu@avrasyaconsult.com

Devrim Gök

Avrasyaconsult İnş. Mühendisi
E-Posta: dgok@avrasyaconsult.com

Faik Aşçı

DLH Marmaray B. M. Makina Baş Müh.
E-Posta:faik.asci@ubak.gov.tr

Öz

Marmaray Projesi, dünyadaki en büyük ulaşım altyapı projelerinden birisidir. Toplam uzunluğu 76 km olan Proje'nin, 1,4 km'si Boğaz Tüp geçişi, 13,30 km'si yaklaşım tünelleri ve 63 km'si yüzey demiryolu hattından oluşmaktadır.

Bu bildiriye Marmaray Projesi kapsamında, yangın koruma yapılması planlanan alanların belirlenmesi için yapılan ön incelemeler, yöntem ve malzemenin belirlenmesi ve yangın anında betonun patlamasında ve dökülmesinde en kritik iki sıcaklık-zaman eğrisine (Rijkswaterstaat ve Hidrokarbon Eurocode1) göre yangın koruma tabakası kalınlığının belirlenmesi amacı ile yapılan deneyler açıklanmaktadır.

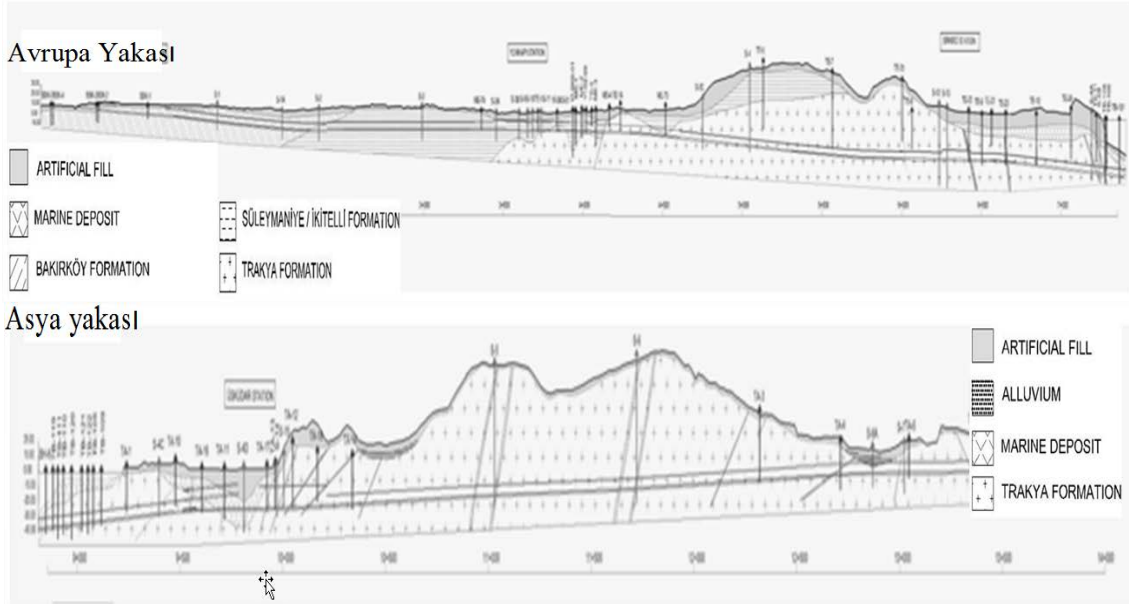
Anahtar sözcükler: Pasif Yangın Koruma, Batırma Tüp Tünel, Marmaray, RWS (Rijkswaterstaat), HC (Hidrokarbon Eurocode 1) , BC1

Giriş

Betonun yangına maruz kaldığında göstereceği davranış, içeriğindeki agreganın ve çimento harcının özelliğine, rutubet miktarına, beton içerisindeki hava yüzdesine ve yangın sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık derecesine bağlıdır. Beklenenin aksine, yüksek dayanımlı betonlar yangın durumunda oluşacak yüksek sıcaklığa karşı, düşük dayanımlı betonlara göre daha az dirençlidir ve bu davranış deneylerle kanıtlanmıştır. Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi Teknik Şartnamesi gereği, kullanılacak betonarme yapı elemanları 100 yıllık servis ömrünü sağlayacak şekilde yüksek dayanım ve düşük geçirimsizliğe sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Beton sınıfı yanında Marmaray Projesi'nin geçtiği hattaki trafiğin yoğunluğu ve Sirkeci ile Üsküdar arasında Marmara Denizi'nin altından geçen Tüp Tünel'in maruz kaldığı tüm etkiler hesaba katıldığında, yangına karşı betonarme yapının korunması zorunlu hale gelmiştir. Bu bağlamda, yangına karşı koruma çalışmaları, sözleşmede yangın senaryosunda ifade edilen şartlar dikkate alınarak yapılmıştır.

Ön Araştırmalar

Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi Teknik Şartnamesi gereği, yangın koruma tabakası, IMT Batırma Tüp Tünelin tamamında tavanlara ve duvarlara uygulanacaktır. Ayrıca delme tünellerde tünel kaplamasının hasar görmesi sonucu yolcu güvenliğini tehlikeye düşürecek yerlerde uygulanacaktır. Marmaray Projesi kapsamındaki TBM Delme Tünnelleri %80 anakaya, kalan kesimi ise yumuşak kaya-zemin içerisinde açılmıştır. Bu kaya-zemin profili, 1985 yılında, İstanbul Metro Ağı fizibilite çalışmaları sırasında belirlenmiştir. Bu zemin profilini araştırmak için 2002 ve 2004 yıllarında detaylı sondaj çalışmaları yapılmıştır. Böylece, hattın anakayadan geçen yerlerde 300m aralıklarla, yumuşak kaya-zemin profili içerisinde geçen yerlerde 200m aralıklarla araştırma sondajları yapılmış ve sondajlar tünel temel betonu alt kotunun 10m altına kadar devam ettirilmiştir. Yangın koruma tabakası uygulaması yapılacak Delme Tünelinde ana amaç, yolcu ve tünel üstündeki binaların güvenliğidir. Bu yüzden yangından sonra tünelin, göçmeden tamirat yapılınca kadarki sürede yıkılmadan ayakta kalması ana ilkedir. Bu projede, yangın koruma tabakası, Batırma Tüp Tünel'in tamamında, Delme Tünelinde araştırma sonuçlarından elde edilen zemin profiline dayanılarak %35'inde uygulanacaktır (Şekil 1).



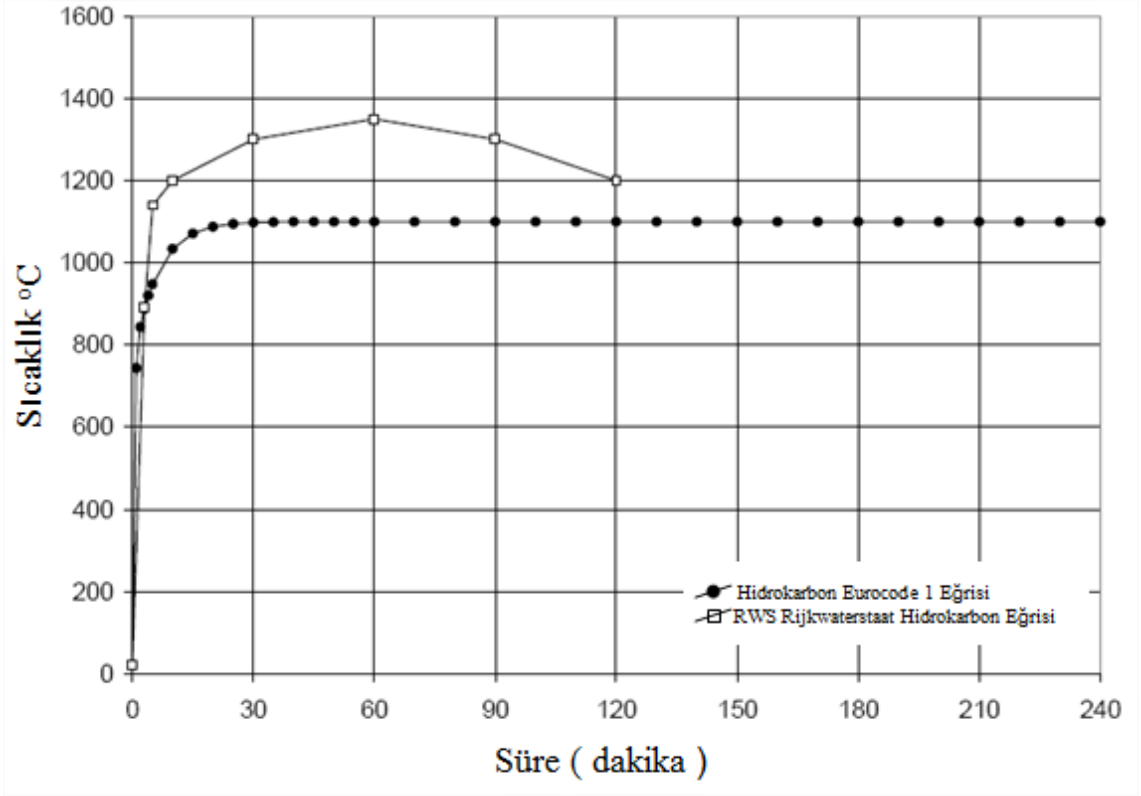
Şekil 1 BC1 projesi delme tünel güzergahı jeolojik kesiti

Tasarım Kriterleri

Yapılacak olan yangın deneylerinin temel amacı, yangın esnasında tünel elemanlarının yapısal bütünlüğünü kontrol etmektir.

Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi Teknik Şartnamesine göre;

- Yangın sırasında betonun patlamasına kesinlikle izin verilmeyecektir.
- Gaz sıcaklığı artışı en az 2 saat süreli RWS Hidrokarbon eğrisi veya en az 4 saat süreli HC eğrisine uyumlu olmalıdır (Şekil2).
- Beton ve yanmaz malzeme arasındaki bağlantı arayüzünün sıcaklığı hiçbir koşulda 380 °C'yi aşmamalıdır.
- Betondaki donatı veya yapısal çeliğin sıcaklığı hiçbir koşulda 250 °C'yi geçmemelidir [1].



Şekil 2. RWS ve HC sıcaklık-zaman eğrileri

RWS ve HC sıcaklık-zaman eğrilerinin hangisinin daha olumsuz davranış koşulları getireceği önceden bilinmemektedir. Bu nedenle, deneyler ikişer defa ve her iki deney sonucu da kriterleri sağlayacak şekilde sonuçlanmalıdır.

RWS eğrisi betonda parça kopma özelliğinin sınanması için kullanılacaktır. Bunun nedeni RWS eğrisinin, HC eğrisine göre daha dik eğime sahip olması ve daha yüksek sıcaklık öngörmesidir. Isıl iletkenlik deneyi için en kötü şartın ne olduğu tam olarak belirlenemediğinden HC eğrisi de uygulanmaktadır. Yüklenici tarafından şantiyede hazırlanan, deneye tabi tutulacak numune sayıları ve özellikleri aşağıdaki tablolarda uygulanacak RWS ve HC eğrilerine göre verilmektedir.

Tablo 1 RWS eğrisine göre deneye tabi tutulan numuneler

İki saat süreli RWS sıcaklık-zaman eğrisi			
IMT (4600(L) X 2400(W) X 400(H))		TBM (3800(L) X 1500(W) X 300(H))	
Asıl Deney ¹	Yedek ²	Asıl Deney ³	Yedek ⁴
2 Adet	2 Adet	8 Adet	2 Adet

1. Her iki örnek de ardgermelidir.
2. Asıl deneyin başarısız olması halinde ardgerme ve yangın koruma tabakası oluşturulmaktadır.
3. Her çifte dört farklı kalınlıkta yangın koruma tabakası uygulanmaktadır.
4. Asıl deney veya hasarlı numune için iki yedek numune hazır tutulmaktadır.

Tablo 2 HC eğrisine göre deneye tabi tutulan numuneler

Dört saat süreli HC sıcaklık zaman eğrisi			
IMT (2000(L) X 1500(W) X 400(H))		TBM (1900(L) X 1500(W) X 300(H))	
Asıl Deney ⁵	Yedek ⁶	Asıl Deney ⁷	Yedek ⁸
1 Adet	1 Adet	4 Adet	1 Adet

5. Ardgerme gerekli değildir.

6. Başarısızlık veya hasar durumu için yedek numune. Eğer, asıl RWS deneyi başarısız olursa, RWS deneyinde başarılı kalınlığa göre yeni kalınlık uygulanmaktadır.

7. Öngerme veya ardgerme gerekli değildir. Kalınlıklar asıl RWS deney numuneleriyle aynıdır. Asıl RWS deney sonucuna göre sadece deneyde başarılı kalınlık için deney yapılmaktadır.

8. Herhangi bir başarısızlık veya hasar için yedek numune hazır tutulmaktadır.

Yangına Karşı Koruma Deneyleri

Malzeme Seçimi

Yangın koruma malzemesi uygulanacak bölgeler ve kriterler belirlendikten sonra Marmaray Projesi sözleşmesi koşullarına göre uygulanacak malzemenin seçimi yapılmış ve uygulama sırası aşağıdaki şekilde belirlenmiştir [3].

1. Yangın koruma malzemesi ve sıvı yapıştırıcı,
2. Plastik kaplı galvanizli hasır,
3. Yangın koruma malzemesi,

Numunelerin Hazırlanması

Numuneler, Marmaray Projesi'nde kullanılan ve 100 yıllık servis ömrüne göre tasarlanmış beton karışımları ile hazırlanmıştır. Prejede batırma tüp tünelde C40 delme tüp tünellerde C50 sınıfı beton kullanılmıştır. Beton sınıfları 100 yıllık servis ömrü, dış etkenler ve standartlar dikkate alınarak seçilmiş ve ön deneylerle onaylanmıştır. Projede kullanılan beton karışım tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde oluşturulan Marmaray Laboratuvarında yapılan deneme karışımları ve ön deneyler sonucunda tespit edilmiştir. Bu denemelerde taze beton, sertleşmekte olan beton ve sertleşmiş beton özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve sonuçta proje şartnamelerine uygun beton karışım tasarımı belirlenmiştir. Karışım tasarımının belirlenmesi için yapılan çalışmalar sırasında projenin tüm yapıları için geçerli olan 100 yıllık servis ömrü hedefi doğrultusunda Batırma Tüp Tünel'in deniz suyu içinde maruz kalacağı yüksek basınç ve dış etkenler dikkate alınmıştır.

Numunelerin hazırlanmasında, beton dökümü öncesinde, Marmaray Projesi Sözleşmesi Teknik Şartnamesi'nde istenilen yangın kriterleri doğrultusunda, sıcaklıkların kayıt edilmesi için sıcaklık kayıt cihazları yerleştirilmiştir [2].

Numuneler kalıp sökülmesinden itibaren naylon ile sarılarak deney yapılacak zamana kadar aynı şekilde muhafaza edilmiştir.

Batırma Tüp Tünel IMT numunesi ile birlikte;

- 3 adet 10X10X10 küp numune
- 3 adet 15X30 silindir beton numunesi

basınç mukavemeti, yoğunluk ve nem oranı belirlemek için hazırlanmıştır.

Delme Tünel TBM numunesi ile birlikte;

- Numunelerin birinden çapları 100 ila 150 mm arasında değişen, 3 adet karot numune alınıp basınç deneyine tabi tutulmuştur.
- Ayrıca çapları 60 ila 100 mm çapları arasında değişen 3 adet karot numune alınmıştır. Bunlar yoğunluk ve nem oranı ölçümünde kullanılmıştır [4].

Tablo 1 ve 2 de belirtilen sayı ve boyuttaki deney numuneleri yüklenici tarafından şantiyede hazırlanıp Hollanda'da deneylerin yapıldığı kuruluş olan Efectis'e gönderilmiştir.

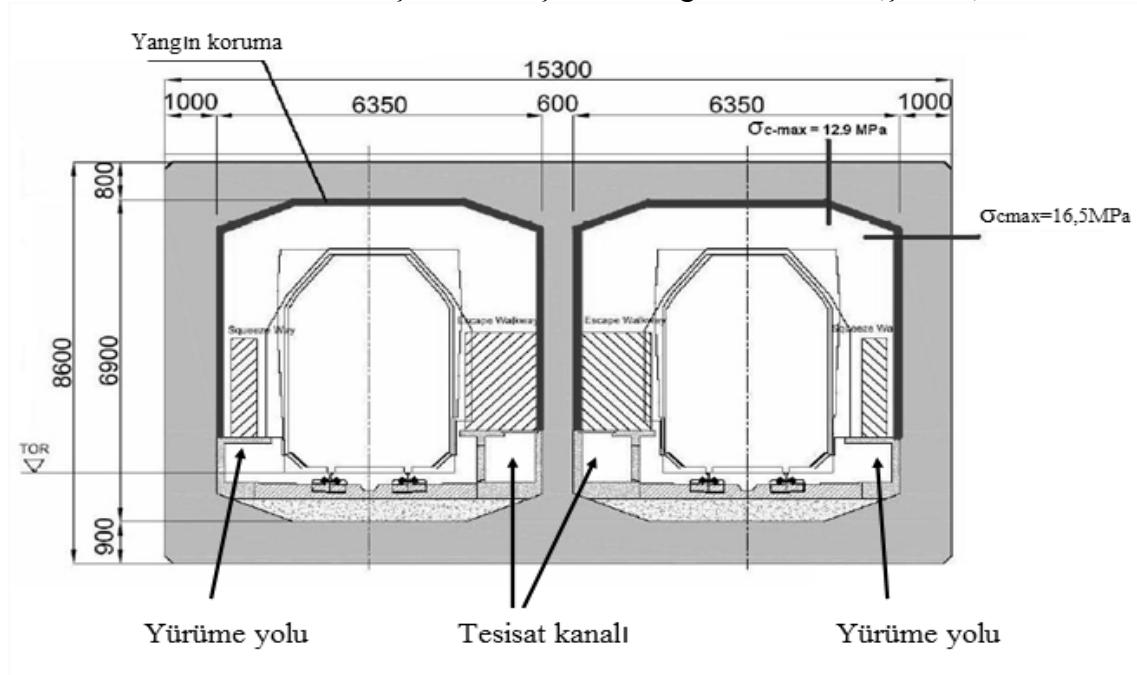
Malzemenin Uygulanması

Kullanılmasına karar verilen malzemeler, sıvı yapıştırıcı ile yangın koruma malzemesinin karıştırılmasından elde edilen bileşim, beton yüzeyi ile pasif yangın koruma kaplaması arasında aderansı arttırmak için yüzeye püskürtülmüştür. Daha sonra, plastik kaplı galvanizli hasır donatı beton yüzeye monte edilmiştir. Asıl pasif yangın koruma tabakasını oluşturacak olan yangın koruma malzemesi iki aşamalı olarak uygulanmıştır. İlk aşamada deneyler Tablo 1 ve Tablo 2 de belirtilen kaplama kalınlığının 1/3'ü, daha sonra kalan 2/3'ü uygulanmıştır. Uygulama yapılacak malzemeler arasında, püskürtme yangın koruma malzemesi ile birinci kademe yangın koruma malzemesi arasında 10 ila 36 saat, birinci kademe yangın koruma malzemesi ile ikinci kademe yangın koruma malzemesi arasında 10 ila 48 saat, çekme deneyinin yapılabilmesi için 1 ay, yangına dayanıklılık deneylerinin yapılması için 90 gün beklenmiştir.

Batırma Tüp Tünel (IMT) Yangın Deneyleri

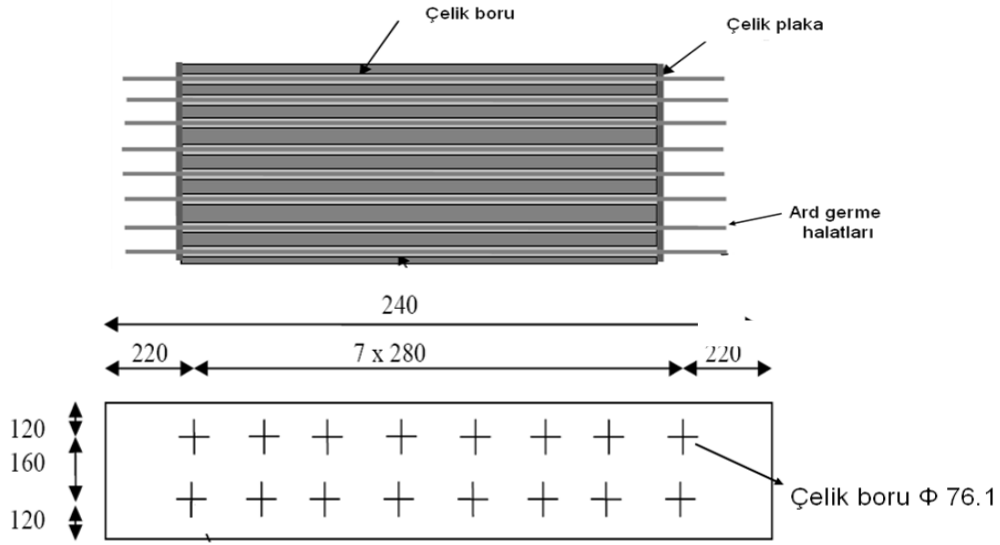
Betonda Kapak Atma Deneyi

Batırma tunelin tavanı yangında en fazla etkilenecek kısım olduğu için numuneler üzerinde deniz tabanındaki koşulların oluşturulması gerekmektedir (Şekil 3).



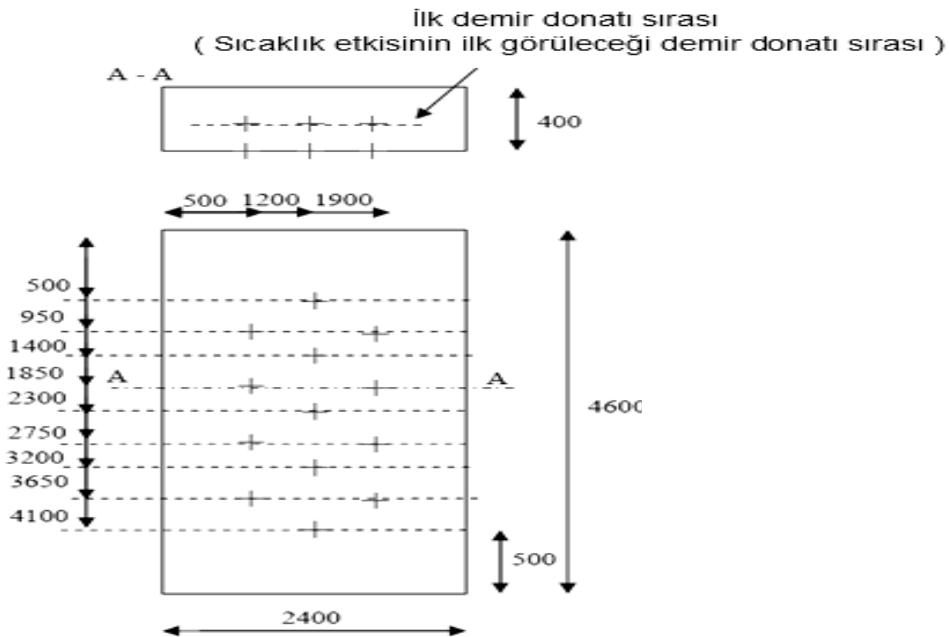
Şekil 3 Batırma Tüp Tünel'in tipik en kesiti

Bunun için numuneler üzerine yapılacak ard yükleme için toplam 16 adet çelik boru yerleştirilmiştir. Bu çelik borular içerisinde ard germe kabloları geçirilerek ard germe uygulanmıştır (Şekil4). Deneye başlamadan numune dökümü sırasında bırakılan çelik borulardan geçecek ard germe kablolarına betonda 16.5 MPa'lık basınç gerilmesi oluşturacak şekilde ard germe uygulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 4 Numuneler üzerine ard germe borularının yerleştirilmesi [2]

Deney numunesi içerisine toplam 34 adet sıcaklık ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Bunlardan 13 tanesi ilk donatı ile yüzey arasına, ikinci 13 tanesi numunenin zeminine, diğer 8 tanesi de ard germe için yerleştirilen çelik boruların, sıcaklık etkisine ilk maruz kalacağı yüzeyine yerleştirilmiştir (Şekil 5).

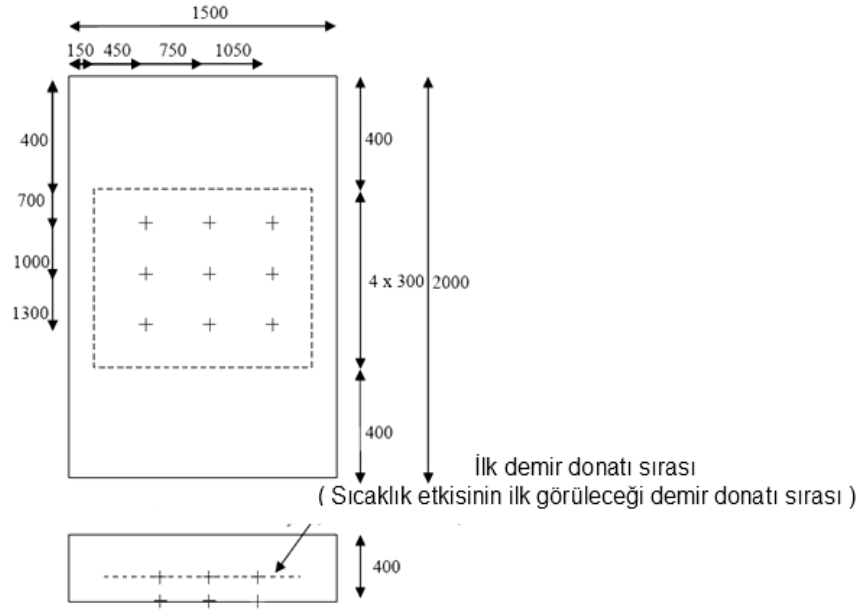


Şekil 5. RWS Eğrisine göre deney için sıcaklık ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi

Kullanılan eğri 2 saat süreli RWS sıcaklık-zaman eğrisidir. Bu deney iki defa tekrarlanması istenmekte ve ikisinde de başarılı sonuç elde edilmesi şartı aranmaktadır [2].

Isı Yalıtım Deneyi

Hazırlanan numune Batırma Tüp Tünelin küçük bir kesitidir. Boyutları 1,5mX2,0 m'dir (Şekil 6). Bu deneyde ard germe yapılmamıştır [2].



Şekil 6 HC Deneyi için sıcaklık ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi.

Test sırasında sıcaklık yükselmesini gözlemlemek için hazırlık aşamasında numune içerisine sıcaklık ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçerlerin 9 tanesi sıcaklık etkisinin görüleceği ilk demir donatı sırasına, diğer 9 tanesi numunenin zeminine yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında 4 saat süreli HC yangın eğrisi kullanılmış ve bu deney bir defa yapılmıştır. Bu deneyin sonucunda %100 başarı istenmektedir (Tablo3).

Tablo 3. Batırma tüp tünel numunesi deney özeti.

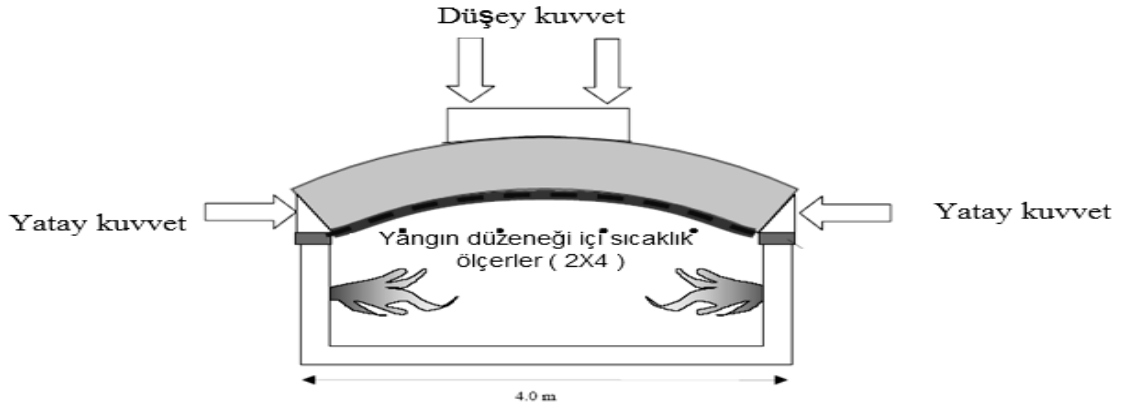
Sıcaklık-zaman eğrisi	Süre(dak)	Deney Numunesi	Deney	Miktar
RWS	120	Batırma Tüp Tünel numunesi betonda 16,5MPa'lık basınç gerilmesi oluşturacak şekilde ard germe ile yüklü	Beton kapak atma + Isıl İletkenlik	2
HC	240	Yüklenmemiş Batırma Tüp Tünel numunesi (1,5mx2,0m)	Isıl İletkenlik	1

Delme Tünel (TBM) Yangın Deneyleri

Betonda Kapak Atma Deneyi

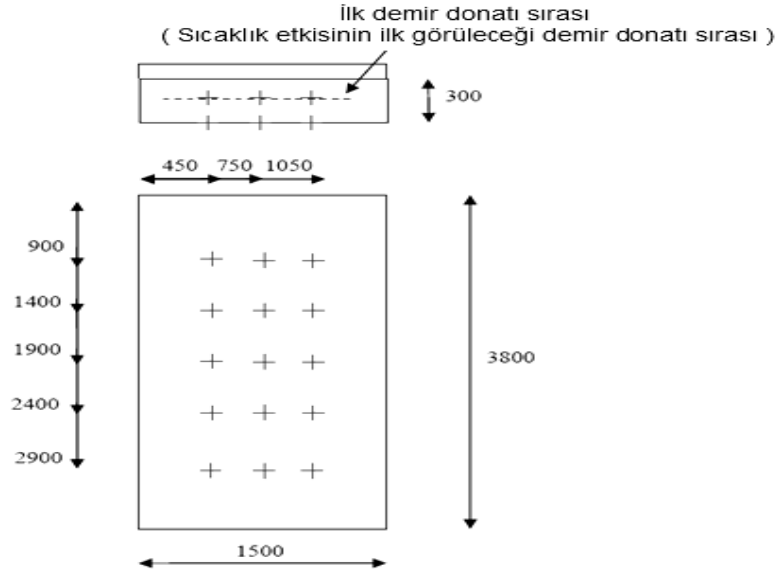
TBM tüneli için deney örneği, orijinal bir delme tünel kaplaması prekast elemanıdır. Numune en kötü durum senaryosuna göre fırının tepesine yerleştirilmiştir.

Yaklaşık olarak 3 yıl önce imal edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda tünel içerisindeki, delme tünel kaplaması betonarme prekast elemanı ile deney için gönderilen delme tünel kaplaması betonarme prekast elemanın nem içeriği %3 civarındadır [2]. Tünel elemanlarına gelmesi beklenen 16.2 MPa'lık gerilme, tünel betonarme prekast elemanı, yangın deney düzeneği üzerine yerleştirilmesinden sonra yükleme yapılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7 TBM Numunesinde yangına direnç için oluşturulan deney düzeneği [5]

Yangın deneyleri sırasında delme tünel kaplaması prekast elemanında oluşacak sıcaklık değişimlerinin gözlenmesi için sıcaklık ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Bu sıcaklık ölçerler toplam 30 tanedir. Sıcaklık ölçüm cihazları 3mmX3mm delikler açılarak ve açılan delikler çimento esaslı malzeme ile doldurularak yerleştirilmiştir (Şekil 8).



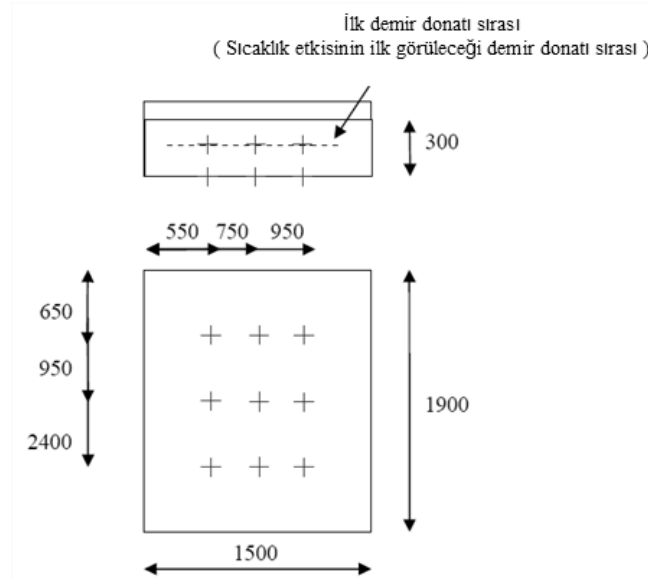
Şekil 8 RWS Deneyi için sıcaklık ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi

Yangın deneyleri sırasında kullanılacak olan eğri 2 saat süreli RWS sıcaklık-zaman eğrisidir. Bu deney iki defa tekrarlanmış ve deneye başlamadan önce fırın ile numune birleşim noktaları izolasyonu tam olarak sağlanmıştır.

Isı Yalıtım Deneyi

Deney delme tünel kaplama elemanından (3,44mx1,50m), kesilerek 1,5mX1,9m boyutlarında ki parça üzerinde yapılmıştır (Şekil 9).

Deney sırasında sıcaklık gelişimini gözlemek için numuneler hazırlanırken numune içerisine sıcaklık ölçüm cihazları yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçüm cihazlarının 9 tanesi yüksek sıcaklık etkisinin görüleceği ilk demir donatı sırasına, diğer 9 tanesi numunenin üst kısmına yerleştirilmiştir [2].



Şekil 9 HC Deneyi için sıcaklık ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi

Deneylerde 4 saat süreli HC sıcaklık-zaman yangın eğrisi kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak delme tünel kaplaması prekast elemanının ölçüleri 1,2mX1,2m'dir(Tablo 4).

Tablo 4 Delme tünel numunesi deney özeti.

Sıcaklık-Zaman eğrisi	Süre(dak)	Deney Numunesi	Deney	Miktar
RWS	120	Delme Tünel prekast kaplama numunesi 16,2MPa'lık basınç gerilmesi oluşturacak şekilde ile yüklenmektedir.	Betonda kapak atma + Isı yalıtım	2
HC	240	Yüklenmemiş Delme Tünel prekast kaplama numunesi	Isı Yalıtımı	1

Yapılan Deneylerin Sonuçları

Tablo 5 IMT numunesi deney sonuçları (C40).

Sıcaklık-Süre eğrisi	Deney sayısı	Deney	Deney kriteri	Sonuç
RWS sıcaklık-zaman eğrisine göre	2	Beton kapak atma	Beton kapak atmamalı	Başarılı
		Isı yalıtım	Bağlantı ara yüzeyi sıcaklığı < 380°C ve Beton içerisindeki donatı sıcaklığı < 250°C	
HC sıcaklık-zaman eğrisine göre	1	Isı yalıtım		

Tablo 6 TBM numunesi deney sonuçları (C50).

Sıcaklık-Süre eğrisi	Deney sayısı	Deney	Deney kriteri	Sonuç
RWS sıcaklık-zaman eğrisine göre	2	Beton kapak atma	Beton kapak atmamalı	Başarılı
		Isı yalıtım	Bağlantı ara yüzeyi sıcaklığı < 380°C ve Beton içerisindeki donatı sıcaklığı < 250°C	
HC sıcaklık-zaman eğrisine göre	1	Isı yalıtım		

Sonuç

Marmaray Projesinde, Batırma Tüp Tünelin tamamında ve Delme Tünellerin belirlenen kısımlarında yapılacak pasif yangın koruma kaplamasının performans deneylerinin hazırlık aşaması anlatılmıştır.

Numunelerin hazırlanması, gerçek ortam şartlarının oluşturulması ve yangın koruma kaplaması uygulama aşamalarının hepsi, özen gösterilmesi gereken işlerdir.

RWS ve HC Eğrilerine göre, deneylerin yapılmasının amacı en kötü yangın senaryosuna göre tünellerde hasar oluşmadan yangını atlatabilmektir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmaya verdikleri destekten dolayı;

Mehmet Ali Taşdemir'e, Hüseyin Belkaya'ya, Mehmet Öztürk'e, Öztürk Özgür'e ve Niyazi Şennazlı'ya teşekkür eder.

Kaynaklar

[1]. Marmaray Projesi BC1 Sözleşmesi.

[2]. Taisei Gama Nurol Joint Venture, CIQP for IMT Fire Test Specimens 07.10.2010

[3]. Taisei Gama Nurol Joint Venture, Material Submittal for Passive Fire protection Material Fendolite MII for Immersed Tunnel and Bored Tunnels. 05.01.2011

[4]. Taisei Gama Nurol Joint Venture, CIQP Passive Fire Protection Test Procedure for Immersed Tunnel and TBM Tunnels. 07.01.2011

[5]. www.effectis.com