

ULAŞTIRMA YAPILARINDA VE TÜNELLERDE YANGIN GÜVENLİĞİ VE TASARIM ESASLARI

İlker İbik

Efectis Era Avrasya Test ve Belgelendirme A.Ş.
İlker.ibik@effectis.com

ÖZET

Yapılarda yangın esnasında güvenliği sağlamak için geliştiren eylem planları, genellikle kullanıcıların yangına maruz kalan binadan ne kadar hızlı tasfiye edildikleri, itfaiyenin ne kadar zamanda yangını kontrol altına alabildiği/söndürdüğü ve yangının çevre yapılara sirayet edip etmediği gibi bir grup kriteri temel alır. Havalimanları, metro ve tren istasyonları gibi ulaştırma yapılarında ve bunların bağlantı tünellerinde ise, yüksek yaya ve/veya araç trafiği ve hidrokarbon temelli çok yüksek yangın yükü nedeniyle bu tarz kriterler genellikle panik, tali hasarlar ve kazalara sebebiyet verir, ki sonuçta oluşacak kayıp, çoğu durumda yangın olayının kendisinin yaratacağından çok daha fazla olabilir. Bu yüzden yangınla mücadele stratejisinin tamamen farklı olması gerekmektedir; yangın esnasında sürekli iletişimde kalarak görevli personeli mümkün olduğunca görev yerlerinde koruyabilmek, yapısal güvenliği sağlayarak yapının kısmen veya tamamen çökmesini engellemek, duman ve ısı yayılımını yangın durumu sona erene kadar sürekli kontrol altında tutabilmek ve belki de en önemlisi kullanıcıları doğru yangın senaryoları ile işleyen aktif yangın güvenlik sistemleri ve güvenlik (kaçış) tünelleri gibi yapısal çözümlerin desteğiyle kontrollü bir şekilde risk bölgesinden tahliye etmek gibi. Belirtilen konseptin karmaşıklığı ve gerekli olan güvenilirliğin çok yüksek olması nedeniyle, en yüksek teknolojilerin ve malzemelerin amaca uygun ve kabul edilebilir maliyetli şartlarda uygulanabilmesi için en uygun yöntem, tasarım ve yapım/inşa süreçlerinde yangın güvenlik mühendisliği kullanımıdır.

1.GİRİŞ

Yapılar için geliştirilen referans standart ve yönetmelikler her zaman koşul/mevzuat temellidir ve normal-standart durumların çözümüne odaklanır. Bu yaklaşım, fabrikasyon, terzi işi olmayan, diğer bir tabirle optimize edilmemiş çözümler sunar. Sonuç olarak, yapı yangın güvenliğini artırmaya yönelik çalışmalar, artık güvenlik odaklı değil, “koşul temelli yönetmelik” odaklı çabalar olarak kalacaktır. Dolayısıyla, sadece yönetmelik koşullarını sağlamaya odaklanan bu yaklaşım, özel yangın güvenlik ihtiyaçları bulunan yapılar, mesela havalimanları, metro ve tren istasyonları ve otogarlar gibi ulaştırma yapıları ve bunların arasındaki bağlantıları sağlayan karayolu ve raylı sistem tünelleri için ise son derece yetersiz kalacaktır.

Diğer bir yaklaşım ise, performans temelli yangın güvenliği veya diğer bir tabirle yangın güvenlik mühendisliğidir.

Yangın Güvenlik Mühendisliği, beraberinde iki temel avantaj getirir:

- Tasarımcı, tasarımı için risk değerlendirmesi yapar, bu risk değerlendirmesi yetkili otorite tarafından kabul görünür ve böylece gerçekçi risk seviyesine dayalı tasarım, yapının bütünsel yangın güvenlik seviyesini artırır.
- İlave olarak, optimize edilmiş uygulama, her noktada yangın yalıtımı yapılması, aktif yangın güvenlik sistemlerinin eksiksiz kullanımı gibi çözümlere kıyasla %3'e varan maliyet tasarrufları sağlar.

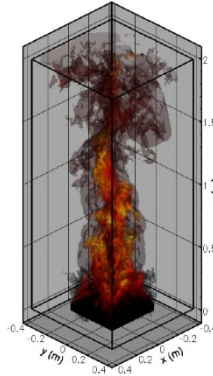
Ancak, bir dezavantajı da vardır; uygulanacak mühendislik metotlarının karmaşıklığı ve dolayısıyla uygulama zorluğu.

2. ULAŞTIRMA YAPILARINDA YANGIN GÜVENLİK MÜHENDİSLİĞİ

Yangın güvenlik mühendisliği ile şu kriterler değerlendirilir [1] [2]:

- Yangının gelişimi ve yayılması (ısı ve duman)

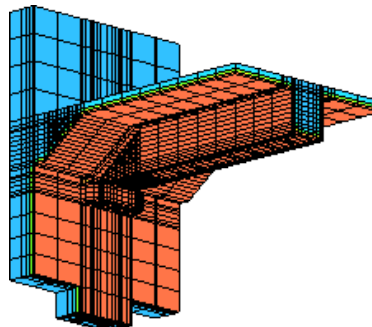
Yangın güvenlik mühendisliği uygulaması, yangının gelişim ve yayılma sürecini, ısı ve duman kriterleri temelinde değerlendirmek için idealdir. Üzerinde mutabakata varılan en kötü durum senaryosu (worst case scenario) üzerinden yangının gelişimi ve yayılımı Şekil 1'de görüldüğü gibi CFD yazılımları ile modellenir [3] ve değerlendirilir.



Şekil 1: C-FAST [4] ile yapılmış yangın ve duman gelişimi modellemesi çıktıları

- Isı Transferi

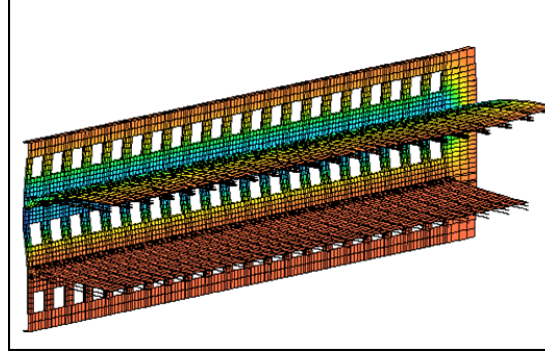
Belirlenen zaman-sıcaklık eğrisi Şekil 2'de görüldüğü gibi modelleme ile yapıya uygulanarak yapısal ısı artışı gözlemlenir.



Şekil 2: ANSYS [3] ile yapılmış üç boyutlu ısı transferi modellemesi çıktısı

- Yapısal Davranış

Modellenen-hesaplanan yapı sıcaklığı Şekil 3'te görüldüğü gibi artık yapıyı oluşturan malzemelerin termo-mekanik karakteristikleri doğrultusunda yapının artan ısı yükü karşısındaki davranışını belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 3: LENAS [5] üç boyutlu yapısal davranış modellemesi çıktısı

- Duman ve duman atım/havalandırma yönetimi

Duman atımı ve havalandırma bir CFD yazılımı ile (örneğin FDS) analiz edilerek pasif ve aktif yangın güvenlik sistemlerinin reel yangın senaryosuna göre adaptasyonu sağlanır.

Ana prensip, dumanın yangın bölgesinden çıkmasının engellenmesi ve güvenlik bölgesi ve kaçış yollarına temiz hava beslemesinin sağlanmasıdır. Bu amaçla, çıkış merdivenleri, geçiş bölgeleri ve yatay havalandırma alanları arasında pozitif basınç farkı sağlanır ve korunur. Bu uygulama, sadece insanların güvenli bir şekilde buldukları yerde kalmalarını sağlamaz, aynı zamanda itfaiyenin hızlıca yangın bölgesini ve kaynağını belirlemesine de yardımcı olur. Bu detayda bir duman yönetim sistemi, mutlaka diğer bölmelerden bağımsız ve tam korunmuş bir odadan gerçekleştirilmelidir.

- Kaçış-Çıkış Yönetimi

İnsanların çıkışları/yangının direkt etkilediği alandan kaçışları Şekil 4'teki örnekte görüldüğü gibi FDS-EVAC, PATHFINDER EXODUS vb. yazımlarla benzetim yapılır.

Kaçış, büyük ihtimalle yangından direkt etkilenen bir veya birkaç bölümün boşaltılmasından ibaret olacaktır. Yine de terörist saldırı vb. nedenler de göz önüne alınarak, binanın tam boşaltımı senaryosu da mutlaka değerlendirilmelidir.



Şekil 4: vrEXODUS [6] ile hazırlanmış örnek kaçış modellemesi çıktısı

Bahsettiğimiz tüm araçların doğru kombinasyonu; yapı yangın risk seviyesinin doğru belirlenebilmesi, yangın güvenlik seviyesinin optimizasyonu ile teknik çaba ve maliyetlerin uygun zamanda ve uygun yerlere harcanması sonuçlarını doğuracaktır.

3. TÜNELLERDE YANGIN GÜVENLİĞİ VE YANGIN DAYANIM TESTLERİ

Son otuz yıl içerisinde Avrupa ve Dünya’da hem demiryolları ve hem de karayolları tünellerinde meydana gelen birçok yangın, tünel yapılarında büyük maliyetler oluşturan ve bazı durumlarda onarım çalışmaları için tünellerin uzun süre kapanmasına sebebiyet veren önemli hasarlara neden olmuştur. Bazı tünel yangınları ise yangın felaketlerine dönüşmüş, can ve mal kayıplarının toplumlarda yarattığı hasar, Avrupa Birliği ve Birleşmiş Milletler nezdinde mevzuat çalışmalarının yapılarak tünel yangın güvenliğinin kontrol altına alınması çalışmalarına vesile olmuştur. [7]

Çizelge 1. Yıllara göre bazı tünel yangın felaketleri ve can kaybı bilançoları [8]

Yıl	Tünel	Uzunluk	Tüp adedi	Kayıplar
1978	Velsen (The Netherlands)	770 m	2	5 ölü, 5 yaralı
1979	Nihonzaka (Japan)	2 km	2	7 ölü ,2 yaralı
1980	Sakai (Japan)	460 m	2	5 ölü ,5 yaralı
1982	Caldecott (USA)	1,1 km	3	7 ölü ,2 yaralı
1983	Pecorile (near Genova, Italy)	660 m	2	9 ölü ,22 yaralı
1996	Isola delle Femmine (Italy)	148 m	2	5 ölü ,20 yaralı
1999	Mont-Blanc (France - Italy)	11,6 km	1	39 ölü
1999	Tauern (Austria)	6,4 km	1	12 ölü ,40 yaralı
2001	Gleinalm (Austria)	8,3 km	1	5 ölü ,4 yaralı
2001	St. Gotthard (Switzerland)	16,9 km	1	11 ölü
2006	Viamala (Switzerland)	750 m	1	9 ölü ,6 yaralı

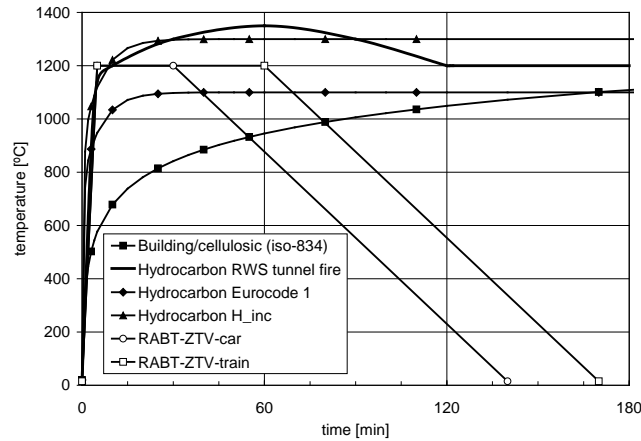
Ortaya çıkan bu küresel mevzuatın başlıca hüküm belirten dokümanları ve oluşturduklar temel yapısal yangın güvenliği parametreleri ise şöyledir;

- 2004/54/EC numaralı Avrupa Karayolları Ağı Tünel Güvenliği İçin Minimum Gereksinimler Direktifi; Tünellerin yapısal elemanlarının yangına dayanıklı olması zorunluluğu.

- PIARC-World Road Association - Kara Yolları Tünellerinin Yangına Dayanımı için Tasarım Kriterleri:
- Tünel betonunun donatısının kritik sıcaklığa ulaşmaması (250°)
- Tünel betonunun yangın koruyucu malzeme ile kaplanması (levha, püskürtme sıva vb.)
- Yangın koruyucu malzeme katmanı ile beton arasındaki noktada kritik sıcaklığa ulaşması (380°)
- 2008/163/EC numaralı AB komisyon kararı: Müşterek Avrupa Karayolları Ağı Tünel Güvenliği Teknik Özellikler

3.1 Tünel Yangın Senaryoları

Tünel yangınları sırasında ısı birkaç dakika içinde 1300°C'nin üzerine çıkabilir. Bina yangınlarıyla karşılaştırıldığında, bu, yapı için büyük termal şoklarla çok daha ciddi bir tehdit arz etmektedir. Binaların tasarımı için, akademisyenler ve profesyoneller arasında, şekil 1'de gösterildiği gibi daha yavaş bir sıcaklık gelişimini öngören ISO-834 ("standart") yangın eğrisinin kullanımı konusunda küresel bir fikir birliği vardır. Bununla birlikte, tüneller için birden çok yangın dayanımı tasarım eğrisi bulunmaktadır ki bunlardan birkaçı da Şekil 5'te gösterilmiştir.

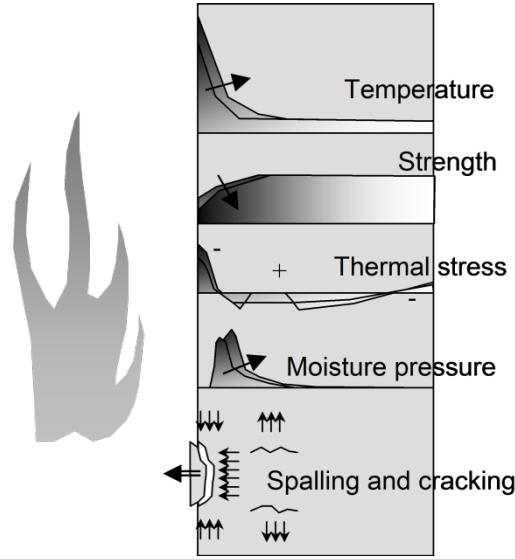


Şekil 5: Yangın tasarımı için Isı – Zaman eğrileri

Daha düşük bir yangın eğrisi kullanılarak genellikle daha ekonomik bir çözüm elde edilse de, bu güvenli olmayan durumlara yol açabilir, zira AB Komisyonu tarafından çalışmalar başlatılan UPTUN konsorsiyumu tarafından 2003 yılında gerçekleştirilen tam ölçekli tünel yangın testleri, yangın sıcaklıklarının hızla 1300°C ila 1400°C'ye ulaşabileceğini göstermiştir [9]. Birçok yalıtım malzemesi tasarım gereği 1200°C'nin üzerindeki sıcaklıklara dayanamadığından ve bu nedenle bir tünel kaplamasının korunması için uygun olmadıkları kanıtlandığından, bu durum hayati riskler içermektedir.

3.2 Tünel Betonunda Spalling (Aşınma – Kabarma – Çatlama)

Yangın sırasında beton en kesiti içerisinde gerilmeler oluşur. Termal gradyanlar ve nem basıncı, betonun çatlamasına ve ayrıca spalling durumuna neden olabilecek mekanik streslere yol açar. Şekil 6, ısı altında bir beton duvardaki gerilmelerin şematik bir görünümünü vermektedir.



Şekil 6: Isı altında betonda oluşan gerilmeler ve fiziksel değişimler

Betonda spalling, beton yapının zarar görmesinin nedenlerinden biridir. Yangına maruz kalma sırasında meydana gelen diğer hasar nedenleri ise; iç çatlama, geri dönüşü olmayan plastik ve sürünme gerilmeleri ve kimyasal geçişlerdir. Bu hasar formları sonunda eğilme, kesme, ankraj veya burkulma gibi bir göçme mekanizması nedeniyle beton yapının çökmesine neden olabilir.

Yangın testleri sırasında, betondaki spalling gözlemleri, geniş bir aralıkta olur: çok yavaş ($1^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ 'dan çok hızlıya ($250^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$), kademeliden aşınmadan, patlayıcı parçalanmaya, boylu boyunca çatlaklardan veya agrega bölgelerinde yerel çatlama, donatı seviyesinde duran spallinglerden donatıyı aşmış tüm beton yapı çökene kadar devam eden vakalara, vb. Özellikle beton kesitinin katman katman eridiği aşamalı spalling durumunda, zaman içinde geniş çaplı parçalanma derinlikleri meydana gelebilir ve spalling derinliği, donatı üzerindeki koruyucu kaplamadan çok daha fazla olabilir. Şekil 7'de, donatının çok gerisinde, 27 cm'ye kadar spalling derinliklerine sahip bir yangın testi sonucu gösterilmektedir.



Şekil 7: Efectis Era Laboratuvarı'nda bir yangın dayanım testi sonucu oluşan spalling derinliği

3.3 RWS / Efectis Tünel Betonunun Test Metodolojisi

1979'da beton tünel yapılarının yangından korunmasına yönelik ilk yangın testlerinden bu yana, RWS/Efectis test prosedürü sürekli olarak geliştirilmektedir. En son sürümü ise 2008'de

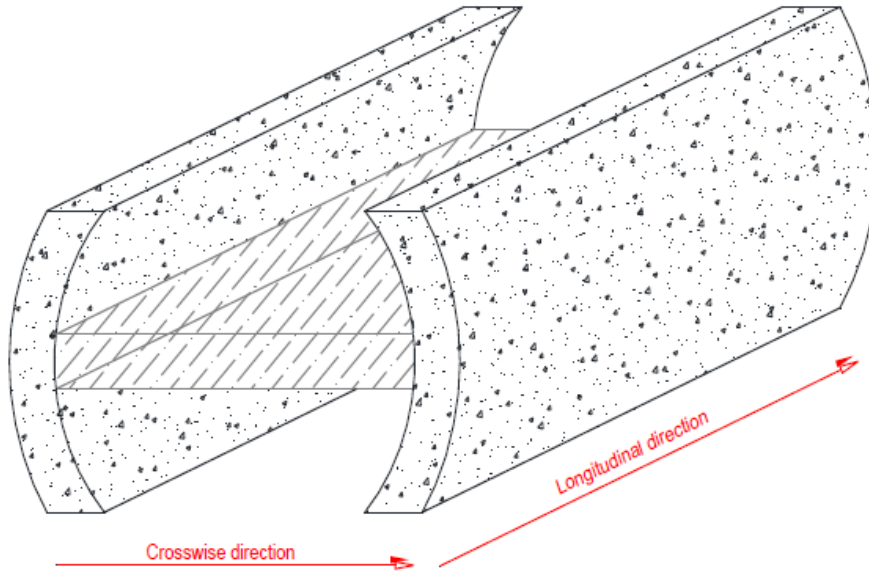
yapılmıştır [10] ve spalling durumunun kontrolü için bir dizi önemli hususu içerir. Parçalanma testi sonuçlarındaki çeşitlilik ve test sonuçlarının öngörülemezliği nedeniyle, bir tasarım testi her zaman aynı düzende iki kez tekrarlanmalıdır. Testin başarılı olması kabulü, yalnızca her iki test de başarılı olursa geçerlidir. Bu şekilde, testi “şanslı bir atış” ile geçme şansı büyük ölçüde azalır.



Şekil 7: Efectis Era Laboratuvarı’nda Avrasya Tüneli projesi için gerçekleştirilen beton tabya yangın dayanım (spalling) testi, Nisan 2014

Beton yangın dayanım testleri için gerçek beton karışımını ve geometrisini kullanmak önemlidir ve bu nedenle, ön dökümlü parçalar söz konusu olduğunda, tercihen prekast yapı elemanı üretim tesisinde üretilen gerçek segmentler kullanılmalıdır.

Spalling, beton elemanın döküm yönüne de duyarlıdır; örn. duvar olarak dikey yönde veya döşeme olarak yatay yönde. Bu nedenle, test numunesinin dökümü sırasında kalıbın oryantasyonu uygulamadaki ile aynı olacaktır.



Şekil 7: Yol tabyası test numune geometrisi, Avrasya Tüneli projesi, Nisan 2014 [9]

- Numuneye uygulanan basma gerilmesi
Spalling mekanizması, beton yapının iç geriliminden güçlü bir şekilde etkilenir. Bu basma gerilimi, tünelin yapısal hesaplamalarından kaynaklanmaktadır ve en azından test numunesinin yangına maruz kalan yüzeyine uygulanmalıdır. Basma geriliminin uygulanması için kullanılan iki yöntem, beton numune içerisine yerleştirilen kanallar aracılığıyla kablolar veya çubuklar ile dahili art-germe uygulamak veya numuneyi hidrolik aktüatörleri olan harici bir yükleme çerçevesi içinde sıkıştırmaktır.
- Numune nem içeriği
Betonun nem seviyesi en az uygulama durumundaki kadar yüksek olmalıdır; genel olarak daha yüksek nem içeriğine sahip bir numunenin parçalanma olasılığı daha yüksektir ve bu nedenle güvenilir bir test sonucu verir.
- Yaşlandırma
Numune, yıllar geçtikten sonraki durumuna yakın bir hidrasyon derecesine sahip olacak kadar yaşlandırılmalıdır. Bu gerekliliğin temel nedeni, spalling mekanizmasının serbest su içeriği, gözeneklilik ve geçirgenlik değerlerine güçlü bir şekilde bağlı oluşudur. 28 gün sonra nihai mukavemetin çoğuna ulaşılmıştır, ancak geçirgenlik hala azalmaya devam etmektedir. Dolayısıyla 28 gün yeterli olmayacaktır; test prosedürü, en az 90 günlük test öncesi yaşlandırma gerektirmektedir.
- Test fırını ısısı
Yangın testi, RWS yangın eğrisi gibi tünel yangınları için uygun bir yangın eğrisine göre yapılmalıdır. Testin ilk 5 ila 10 dakikasında ani ivmeyle ısı artışı elde etmek önemlidir, çünkü bu betona yüksek bir termal şok verecektir. Yeterince yüksek bir maksimum sıcaklığa ulaşmak da önemlidir, çünkü yalıtım malzemeleri 1200°C civarında eriyebilir.
- Yangın yalıtımı
Levha yalıtım malzemesi veya püskürtme harcı gibi koruyucu bir tabaka kullanılıyorsa, malzemenin beton yüzeye sabitlenme yöntemine dikkat edilmesi önemlidir. Ayrıca beton yüzeyindeki boşlukların kapatılması ve betona sabitlenen cisimlerin yeterince korunması gibi detaylar da son derece önemlidir. Örneğin, çelik cıvatalarla tünel tavanına sabitlenen bir yol levhası, aslında koruma tabakasından içeriye alevin nüfuz etmesini sağlar ve yerel olarak betona ısı vererek olası bir parçalanmaya yol açabilir. Bu kadar küçük bir bölgede spalling başladığında, dökülen beton parçaları kalan koruma malzemesini hızla uzaklaştırabilir ve tüm yüzeyi korumasız bırakabilir.

3.3 Beton Tünel Yapıları İçin Yangın Koruma Sistemleri

Beton bir yapının spalling nedeniyle hasar görmesini önlemek için çeşitli seçenekler vardır. En yaygın olarak uygulanan önlemler, harici bir yangın koruyucu malzemenin uygulanması, beton karışımının optimizasyonu ve polipropilen liflerin karışıma eklenmesidir.

- Yangın koruyucu malzeme uygulaması
Beton yüzeye yangından koruyucu bir yalıtım tabakası uygulandığında, ısıtma oranları ve sıcaklık gradyanları önemli ölçüde azaltılabilir. Bu nedenle, betona verilen hasar sınırlandırılabilir ve onarım maliyetleri ve bir yangın oluştuktan sonraki tamir süresi önemli ölçüde azalır.

Yalıtım tabakası uygun şekilde tasarlanmalıdır, çünkü kalınlık çok küçükse yapı spallinge karşı daha da hassas olabilir. Bununla birlikte, birçok durumda, yangına dayanıklı bir tabakanın spallinge karşı etkili olduğu kanıtlanmıştır ve yeterli kalınlıkta doğru malzeme ile beton yapı, yangından sonra yapının büyük onarım işlerinden kaçınmak için yeterince iyi korunabilir. Bir

beton tünel yapısı üzerinde belirli bir yangından korunma sisteminin doğru uygulama kalınlığı, yangın dayanım testleri kullanılarak belirlenebilir, örn. RWS/Efectis test prosedürüne göre.

Levha malzemesi veya püskürtme harcı gibi koruyucu bir tabaka kullanılıyorsa, malzemenin beton yüzeye sabitleme yöntemine dikkat edilmesi önemlidir. Ankrajların ve diğer sabitleme malzemelerinin tipi, çapı ve mesafeleri gibi detaylar yangından korunma sisteminin doğru çalışması için çok önemli olabilir. Ayrıca yangından korunma malzemesinin seçimi de çok önemlidir, çünkü malzemenin örn. RWS yangın eğrisi (maks. 1350 °C) uygulandıktan sonra yerinde kalabilecek kadar dayanıklı olması gerekecektir.

- Beton karışımı tasarımı

Spalling, büyük ölçüde karışım tasarımına bağlıdır. Spalling olasılığını doğrudan betonun basınç dayanımı ile ilişkilendirmek mümkün olmasa da, beton bileşenlerinin spalling davranışı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Önemli etkiye sahip parametreler; agrega tipi, maksimum agrega tane çapı, bileşenlerin nispi termal genişmesi, geçirgenlik, ince dolgu maddelerinin eklenmesi ve nem içeriğidir.

Nispeten düşük termal genişmeye sahip bir agrega tipi seçilerek, iç gerilimler sınırlandırılabilir. Bu etki, büyük tane çaplarından (örneğin 32 mm) kaçınılarak daha da geliştirilebilir. Betonun geçirgenliği büyük ölçüde su çimento oranına bağlıdır. Düşük su çimento oranları, ısıtma sırasında (daha düşük su içeriğine rağmen) yüksek boşluk basıncının oluşabileceği nispeten geçirimsiz betona yol açar. Ayrıca, geçirgenliği büyük ölçüde azaltıkları için silika dumanı gibi ince dolgu maddelerinden de kaçınılmalıdır.

- Polipropilen lifler (fiberler)

Spalling mekanizmasını önlemek için uygun seçeneklerden biri, beton karışımına polipropilen (PP) liflerin eklenmesidir. Bu lifler çok küçük boyutlardadır. Bu nedenle, beton karışımına metreküp başına birkaç kilogram eklendiğinde ve düzgün bir şekilde dağıldığında, beton hacmi içinde bir ağ oluştururlar. Bir yangın sırasında beton ısıtıldığında, lifler erir ve ayrışır, betonun gözenekliliğini ve geçirgenliğini artırır. Yangın testleri, PP liflerinin boşluk basınçlarını azalttığını ancak betonun termal genişmesi nedeniyle gerilmeleri değiştirmediklerini göstermektedir. Su buharı, belirli bir yapıda parçalanma için ana itici güç ise, PP liflerinin uygulanması, spallingi çok düşük derinliklerle sınırlayabilir. Etkili dozaj, spalling hassasiyeti çok sayıda faktöre bağlı olduğundan vakadan vakaya değişir. Yangın testleri genellikle, dökülmeyi önlemek için 1 ila 3 kg/m³'lük dozajların gerekli olduğunu göstermektedir.

PP liflerinin eklenmesi, betonun işlenebilirliğini ve dayanıklılığını azaltması gibi bir dezavantaja sahiptir. Spalling etkisini azaltmak için gereken lif çapı çok küçüktür (tipik olarak 18 veya 32 mikron). Bu nedenle, lifler suyun bir kısmını absorbe ederek karışımın işlenebilirliğini azaltır. Daha küçük çaplı lifler, bir kg lif içinde daha fazla sayıda lif adeti avantajına sahiptir, ancak diğer yandan işlenebilirliği daha fazla azaltırlar. Hangi lif çapının beton içinde en iyi ağ yapısını sağladığı ve dolayısıyla dökülmeyi en çok azalttığı, liflerin beton karışımına eklenmesindeki işçiliğe de büyük ölçüde bağlı olacaktır. Her şey uygun şekilde yapılırsa, PP lifleri, spalling oluşumuna karşı etkili bir önlem olabilir. Önerilen lif tipi (çap, uzunluk), karıştırma prosedürü ve dozaj kombinasyonunun beton dökülmesinde yeterli azalma sağladığını kanıtlamak için yangın dayanım testleri yapılmalıdır.

SONUÇ

Ulaştırma yapılarında ve tünellerde yangın güvenliğini sağlamak, uzmanlık gerektiren ve doğru risk analizinden başlamak üzere, yangın güvenlik senaryoları ve modelleri oluşturmak, tasarımın dijital modellerle doğrulamasını yapmak ve tünel beton elemanlarının testleri gibi

gerekli durumlarda uygun yangın dayanım testleriyle yapısal tasarımı onaylamak ihtiyaçları doğuran, zorlu ancak zaruri bir mühendislik misyonudur. Dolayısıyla, ulaştırma üst ve altyapılarında yetkin yangın güvenlik mühendisleri, akredite yangın deney laboratuvarları ve yangın güvenlik modellemesi uzmanları kullanılmalı, kamu sağlığı ve güvenliği doğru teknik altyapıyla ve kontrollü şartlar altında sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **ISO 23932: 2009**, Yangın Güvenlik Mühendisliği – Genel Prensipler.
- [2] **EN 1991-1-2: 2002**, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions; Actions on structures exposed to fire
- [3] **Swanson Analysis Systems, Inc.**, 1992. ANSYS User's Manual for Revision 5.0 - Volume IV – Theory, Houston U.S.A.
- [4] **National and Fire Research Laboratory**, 1994. CFAST Model of fire Growth and Smoke Transport - Hazard I Version, Maryland U.S.A.
- [5] **Le Centre Technique Industriel de la Construction Métallique**, 1994. LENAS - Logiciel de simulation du comportement mécanique des structures métalliques soumises à un échauffement, Présentation et justifications INC-98/171-GF/IM, Saint-Aubin, France.
- [6] **FSEG Fire Safety Engineering Group at the University of Greenwich**, 2001. vrEXODUS – The evacuation model for the building industry, v1.1.1, Greenwich, UK.
- [7] **Breunese, Arnoud, Van Der Waart Van Gulik, Tim**, 2015. Developments in fire protection design for concrete tunnels in The Netherlands, *Proc. of National Fire Safety Conference 2015*, Editör S. Bakhtiyari, Tehran, Iran.
- [8] **Transportation Research Board of National Academies**, 2011. NCHRP Synthesis 415 Design fires in road tunnels, Washington D.C., USA.
- [9] **İbik, İlker**, 2016. Developments in fire protection design for concrete tunnels, 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds, Istanbul, Türkiye.
- [10] **Breunese, A.J., Both, C., Wolsink, G.M.**, (2008). 2008-Efectis-R0695 – Fire testing procedure for concrete tunnel linings, Rijkswaterstaat and Efectis Nederland, Rijswijk, Netherlands.