



**KOMPOZİT DÖŞEMELERİN YANGIN
PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ**

Melih ERMANCIK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

2021

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KOMPOZİT DÖŞEMELERİN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ**

Melih ERMANCIK

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

17 / 09 / 2021

Melih ERMANCIK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT DÖŞEMELERİN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ

Melih ERMANCIK

Erzurum Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

Günümüzde yaygın olarak yapılarda kullanılan kompozit döşemeler, özellikle çok katlı ofis binalarında geniş hacimler sağladığı için tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra geleneksel beton döşemelere göre yapı ağırlığını önemli ölçüde avantaj sağladığından ötürü yeni binalarda olduğu kadar eski binaların yenilenmelerinde veya güçlendirmelerinde kompozit döşeme kullanımı yaygın ve ekonomik olmaktadır. Yangın dayanımı ve ısı izolasyonu gibi yapıya sağladığı avantajlardan ötürü, bina önem katsayısı yüksek olan binalarda da (okul, hastane vb.) sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, kompozit döşemelerin yangın etkisinde performanslarını etkileyecek potansiyel parametreler açıklık boyu (uzun veya kısa), kesitlerin yangına karşı korumalı olup olmaması ve farklı donatı meşsi kullanımı olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler Standart (ISO 834) yangın etkisinde kompozit bir döşemenin performansını hangi ölçülerde ne kadar etkilediği belirlenmiştir. Analizler yapılırken Eurocode dizayn eşitlikleri ve Excel programı kullanılarak yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Kompozit döşemenin altında bulunan çelik kirişe, pasif yangın koruyucu malzeme uygulanarak farklı kesitler için farklı kiriş sıcaklıklarında analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda yüksek sıcaklıklarda çeliğin mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca farklı yükleme durumlarına göre yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan yer değiştirmeler tespit edilmiştir.

2021, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kompozit döşeme, Yangın performansı, Isı transferi, Isı iletkenliği

ABSTRACT

MS. Thesis

DETERMINING THE FIRE PERFORMANCE OF COMPOSITE SLABS WITH VARIOUS PARAMETERS

Melih ERMANCIK

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Burak Kaan ÇIRPICI

Composite floors, which are widely used in buildings recently, are preferred especially in multi-story office buildings as they provide large volumes. In addition, the use of composite flooring is common and economical in the renovation or reinforcement of old buildings as well as in new buildings, since it provides a significant advantage in the weight of the structure compared to traditional concrete floors. Due to the advantages it provides to the structure such as fire resistance and heat insulation, it is frequently preferred in buildings with high building importance coefficient (school, hospital, etc.).

In this study, the potential parameters that will affect the performance of composite floors under fire were determined as span length (long or short), whether the sections are fire protected or not, and the use of different reinforcing mesh. It has been determined how much these parameters affect the performance of a composite flooring under the effect of Standard (ISO 834) fire. A new mathematical model was developed by using Eurocode design equations and Excel program while performing the analyses. Passive fire protection material was applied to the steel beam under the composite floor and analyzes were made at different beam temperatures for different sections. As a result of these analyzes, how the mechanical properties of the steel change at high temperatures was investigated. In addition, the displacements that occur as a result of the analyzes made according to different loading conditions have been determined.

2021, 77 pages

Keywords: Composite slab, Fire performance, Heat transfer, Thermal conductivity

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Tez çalışması boyunca her türlü desteğini ve bilgisini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleri ile destek veren iş yeri arkadaşlarıma, Şube Müdürüm Nurullah SOYLU 'ya ve meslektaşım M. Ziya BİNGÖL 'e teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca her daim yanımda olan ve her zaman bana destek olan eşime teşekkür ederim.

Melih ERMANCIK

Eylül 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Tezin Yapısı	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR	8
3.1. Beton	8
3.2. Profillenmiş Çelik Sac.....	10
3.3. Kayma Bağlantısı	12
3.4. Çelik Kiriş	14
3.5. Donatı Çeliği	15
3.6. Yapısal (Konstrüktif) Kurallar	15
3.6.1. Döşeme Kalınlığı, Donatı ve Agrega	15
3.6.2. Mesnetlenme Koşulları	16
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	18
4.1. Oda Sıcaklığında Genel İlke ve Tasarımlar	18
4.1.1. Taşıma Sınır Durumu	18
4.1.2. Kullanım Sınır Durumu	19
4.1.3. Yük ve Malzeme Güvenlik Katsayıları.....	19
4.1.4. Kompozit Döşemelerin Yapısal Süreci.....	21
Çatlak Genişliği Formülü.....	32
4.2. Yangına Karşı Tasarımda Genel İlkeler.....	32
4.2.1. İngiliz Standartları BS 5950 Bölüm 8 (BSI 1990).....	32

4.2.2. Limit Sıcaklık Yöntemi ile Moment Kapasitesi Yönteminin Karşılaştırması	36
4.2.3. Eurocode 3 Bölüm 1.2 Metodu (CEN 2005a).....	38
4.3. Eurocode 3 Yönteminde Yapılan Değişiklikler	45
4.4. Çelik Kirişlerde Sıcaklık Hesaplamaları	47
4.5. Malzemelerin Isıl (Termal) Özellikleri	48
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	53
5.1. Matematiksel Model Özellikleri	53
5.2. Sonuçlar.....	55
5.2.1. Uzun ve Kısa Açıklıklı Döşemeler	55
5.2.2. Tüm Kesitlerin (Ana Kiriş ve Tali Kiriş) Tamamen Korunmalı Olması Durumu	63
5.2.3. Farklı Donatı Meşi Kullanımı	65
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_m	Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı (m^2/m)
A_p	Çelik sacın çelmede en kesit alanı (gerekli ise azaltma yapılmış)
C_c	Betonun özgül ısısı (J/kgK)
C_p	Yangından koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı (J/kgK)
C_{st}	Çeliğin özgül ısısı (J/kgK)
d_p	Yangından koruma malzemesinin kalınlığı (m)
d_p	Etkili çelik sac alanı tarafsız ekseninin döşeme üst kotuna uzaklığı
E_{em}	Kısa yüklemeler altındaki betonun elastisite modülü
E_s	Donatı elastisite modülü
f_{ck}	Betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı
$f_{ctk 0.05}$	Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctm}	Betonun çekme dayanımı
f_{ts}	Donatı karakteristik çekme dayanımı
f_{yp}	Çelik sacın akma dayanımı
f_{ys}	Donatı karakteristik akma dayanımı
h_{net}	Birim alana düşen net ısı akısının tasarım değeri (W/m^2)
k_{sh}	Gölgeleme etkisi için düzeltme faktörü
$k_{y,T}$	Çelik kirişin yüksek sıcaklıktaki etkin akma mukavemetindeki azalma faktörüdür
M_c	Plastik momentteki eğilme
M_f	Yangına maruz kirişteki maksimum eğilme momenti
T_{fi}	Yangın sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_s	Çelik sıcaklığı ($^{\circ}C$)
γ_{ap}	Çelik sac için malzeme güvenlik katsayısı
δ_{max}	Döşemenin toplam sehim
$\delta_{v,g}$	Döşeme toplam ağırlığındaki sehim
$\delta_{v,q}$	Uzun süreli değişken yükleme altında sehim

λ_c	Betonun ısı iletkenliği (W/mK)
λ_p	Yangından koruma sisteminin (malzemenin) ısı iletkenliği (W/mK)
ρ_p	Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi (kg/ m ³)
ρ_{st}	Çeliğin birim hacim kütlesi
Δt	Zaman adımı (sn)
ΔT_{fi}	Δt süresince ortam yangın sıcaklığındaki artış (K)
V	Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m ³ /m)
(A_m/V)	Kesit faktörü (1/m)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Kompozit döşeme sistemi.....	8
Şekil 3.2. Beton dökümü.....	9
Şekil 3.3. Profillenmiş Sac.....	10
Şekil 3.4. Kompozit döşemelerde kullanılan çelik sac tipleri.....	11
Şekil 3.5. Profillenmiş Çelik Sac	11
Şekil 3.6. Kompozit Döşeme Plaklarında Beton-Çelik Bağlantı Türleri (a) Sürtünmeli bağlantı, (b) Mekanik bağlantı, (c) Hasır çelik ile bağlantı,(d) Uç ankrajları (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005)	13
Şekil 3.7. Başlıklı Saplama	13
Şekil 3.8. Kayma Bağlantısı – Stud Çivisi.....	14
Şekil 3.9. Kompozit Döşeme ve Kiriş Birleşimi.....	14
Şekil 3.10. Çelik Profil Kiriş	15
Şekil 3.11. Çelik Sac ve Döşeme İçin Boyutlar	16
Şekil 3.12. Minimum mesnetlenme koşulları	17
Şekil 4.1. Kompozit döşemelerde rijit davranış biçimleri	23
Şekil 4.2. Tekil Yükün Yayılışı	25
Şekil 4.3. Taşıma Sınır Durumunda Kritik Kesitler	27
Şekil 4.4. Pozitif moment bölgesinde plastik tarafsız eksen çelik sac üzerindeki beton blok içinde gerilme dağılımı	29
Şekil 4.5. Göçme biçimleri	30
Şekil 4.6. Çelik kirişin sıcaklık-yük oranını durumlarının grafiği.....	34
Şekil 4.7. Çizelge 4'deki hesaplamalar için veriler.	36
Şekil 4.8. Çeliğin yangındaki mukavemet azaltma faktörüne göre narinliği.....	40
Şekil 4.9. Yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulma modifikasyon faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.	43
Şekil 4.10. İnce döşemeli çelik kirişteki sıcaklık dağılım gösterimi.	47
Şekil 4.11. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi	49
Şekil 4.12. Çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi	50
Şekil 4.13. Betonun ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi	51
Şekil 4.14. Betonun sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi	52
Şekil 5.1. Referans alınacak yapının (ofis binası) ayrıntılı planı	53

Şekil 5.2. ATAPANEL Kompozit Döşeme Sacının özellikleri.....	54
Şekil 5.3. Ana kiriş ve tali kirişin korumalı ve korumasız sıcaklıkları.....	56
Şekil 5.4. Akma dayanımı-sıcaklık değişimi	57
Şekil 5.5. Çeliğin Elastisite modülü-Sıcaklık değişimi	57
Şekil 5.6. Beton içerisinde farklı derinliklerde donatı (meş) sıcaklıkları	59
Şekil 5.7. Uzun açıklıklı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmesi	60
Şekil 5.8. Uzun açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu	61
Şekil 5.9. Kısa açıklıklı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmeleri.....	62
Şekil 5.10. Kısa açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu	63
Şekil 5.11. Uzun açıklıklı sistemde tüm kirişlerin korumalı olması durumunda İyileşme- Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu	64
Şekil 5.12. Uzun açıklıklı ve tüm kirişlerin tam korumalı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmeleri	64
Şekil 5.13. Beton içerisinde farklı derinliklerde A142 donatının (meşinin) sıcaklıkları	66
Şekil 5.14. A142 (Ø6) donatı meşinin kullanıldığı uzun açıklıklı sistemde İyileşme- Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu	67
Şekil 5.15. A142 (Ø6) donatı meşli döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmesi...	68
Şekil 5.16. Beton içerisinde farklı derinliklerde A393 donatının (meşinin) sıcaklıkları	69
Şekil 5.17. A393 (Ø10) donatı meşinin kullanıldığı uzun açıklıklı sistemde İyileşme- Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu	70
Şekil 5.18. A393 (Ø10) donatı meşli döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmesi.	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Beton Sınıfı ve Karakteristik Değerleri	9
Çizelge 3.2. Donatı Çeliği Sınıfları ve Karakteristik Değerleri.....	15
Çizelge 4.1. γQ ve γG yük güvenlik katsayıları	20
Çizelge 4.2. Malzeme güvenlik katsayıları.....	20
Çizelge 4.3. Çelik kirişlerin sıcaklık sınırlamaları	33
Çizelge 4.4. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi için örnek hesaplamalar.	35
Çizelge 4.5. Plastik eğilme moment kapasitesi yönteminin kullanımı ve hesaplanması.	37
Çizelge 4.6. Yanal burulma burkulma için İngiliz Standardı (BSI 1990) ve Eurocode 3 (CEN 2005a) hesaplamalarının karşılaştırılması.	40
Çizelge 5.1. A252 meşinin özellikleri.....	55
Çizelge 5.2. Döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları.....	58
Çizelge 5.3. A142 ve A393 meşlerinin özellikleri.....	65
Çizelge 5.4. A142 (Ø6) donatılı kompozit döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları	66
Çizelge 5.5. A393 (Ø10) donatılı kompozit döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları	69

1. GİRİŞ

Geleneksel betonarme döşemelerde 1920'lerden itibaren kalıp görevi görmesi için kullanılan çelik saclar, 1950'lerden sonra betonun çekme donatısı olarak kullanılmasıyla ilk kompozit döşeme yapı elemanlarının kullanımı ortaya çıkmıştır. 1960'larda bahsi geçen çelik saclarda oluşturulan girinti ve çıkıntılarla birlikte modern kompozit döşemelerin ilk örnekleri ortaya çıkmıştır. Kompozit döşeme sistemini oluşturan malzemelerde zaman içinde yaşanan gelişmelerle ve tasarım standartlarında yapılan değişikliklerle yapı elemanlarının daha hafif ve ekonomik olması sağlanmaktadır.

Günümüzde yaygın olarak yapılarda kullanılan kompozit döşemeler, özellikle çok katlı ofis binalarında geniş hacimler sağladığı için tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra geleneksel beton döşemelere göre yapı ağırlığını önemli ölçüde avantaj sağladığından yeni binalarda olduğu kadar eski binaların yenilenmelerinde veya güçlendirmelerinde kompozit döşeme kullanımı yaygın ve ekonomik olmaktadır. Bunlara ek olarak, yangın dayanımı ve ısı izolasyonu gibi yapıya sağladığı avantajlardan ötürü, bina önem katsayısı yüksek olan binalarda da (okul, hastane vb.) sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, kompozit döşemelerde yangına karşı tasarım ve genel olarak yangın performansı ile ilgili ve yüksek sıcaklıklar altında davranışı literatürde halen analitik yöntemlerle çok detaylı bir şekilde ortaya koyulamamış olduğu için yüksek sıcaklıklar altında dayanım ve davranışının matematiksel model geliştirilerek belirlenmesi hedeflenmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Kompozit döşemelerin yangın etkisinde performansını araştırmak amacıyla hazırlanan bu tez çalışmasında performansı etkileyecek birçok parametre araştırılmış ve incelenmiştir. Yapılan ön araştırma ve analizler sonucunda döşemenin açıklık tipi, çelik profillerin tamamının korumalı olup olmaması ve beton blok içinde kullanılan farklı donatı meşleri parametreleri en etken parametreler olarak belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Belirlenen bu parametreler, Avrupa Standartlarında kabul görmüş Standard (ISO 834) yangın etkisinde kompozit bir döşemenin performansını hangi

1. GİRİŞ

ölçülerde ne kadar etkilediği araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizlerde Eurocode dizayn eşitlikleri ve Excel programı kullanılmış ve yeni bir matematiksel model geliştirilmeye çalışılmıştır. Kompozit döşemenin altında bulunan çelik kirişe, pasif yangın koruyucu malzeme uygulanarak farklı kesitler için farklı kiriş sıcaklıklarında analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda yüksek sıcaklıklarda çeliğin dayanımının nasıl değiştiği incelenmiştir. Ayrıca farklı yükleme durumlarına göre yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan deformasyon ve hasarlar tespit edilmiştir.

1.2. Tezin Yapısı

Bu yüksek lisans tezi ana bölüm olarak toplam 7 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler;

1. Bölümde, tez konusu hakkında genel bir giriş ve amaç ve kapsamından bahsedilmiştir.
2. Bölümde, kompozit döşeme ile ilgili genel kaynak özetleri verilmiştir.
3. Bölümde, kompozit döşemeyi oluşturan genel elemanlar ve özellikleri detaylıca verilmiş ve genel konstruktif (yapısal) kurallardan bahsedilmiştir.
4. Bölümde kompozit döşemelerin oda sıcaklığında ve yangına karşı dizayn metotları karşılaştırmalı olarak verilmiş ve korumalı/korumasız çelik sıcaklık hesaplamaları ve tezde verilen matematiksel modelde kullanılacak olan malzemelerin (çelik ve beton) ısısal (termal) özellikleri detaylıca belirtilmiştir.
5. Bölümde geliştirilen matematiksel model sonucunda elde edilen bulgular ve sonuçlar gösterilmiş ve tartışılmıştır.
6. Bölümde bu tez çalışması sonucunda ulaşılan sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.
7. Bölümde bu tez çalışmasında kullanılan kaynaklar ve referanslar verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Önceki çalışmalarda, kompozit döşemelerin yangın performansı ile ilgili yapılan çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Aşağıda, çalışmamızın kapsamını da içeren literatür çalışmaları sunulmuştur.

Çelik sac, başlangıçta betonarme yapıların döşemelerinde kalıcı beton kalıbı olarak kullanılmıştır böylece kompozit döşemelerin ilk örnekleri ortaya çıkmıştır. Bu elemanlar değişik zamanlarda farklı elemanlar olarak kullanılmıştır. Farklı sac tiplerinin çıkmasıyla birlikte her ülke kendi standartlarını oluşturmaya başladı. Örneğin Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü 1967’de karma plaklarla ilgili araştırmalar başlatmıştır. Bu araştırmalar kompozit tasarım sistemleri ile ilgili Amerika, İngiliz ve Avrupa standartlarının (ASCE 1985, BSI 1994 ve CEN 2001) temelini oluşturmuştur (Yorgun ve Odabaşı 1993) (Yorgun 2005).

Kompozit döşemelerde çelik kiriş ile kesme çivileri arasında olan bağ yükünden daha büyük yorulma yüklerinin uygulanması genellikle kesme bağı kopmasıyla sonuçlanır (Mahachi 1994, Mahachi 1995).

Bailey ve Moore (2000) yaptıkları çalışmada, yangına maruz kalan kompozit döşeme plakaları ile çelik çerçeveli yapıların tasarımı için yeni bir yöntemi araştırmışlardır. Çalışma kapsamında tam ölçekli çelik çerçeveli binada yangın testleri yapılmıştır. Testler sonucunda, yangın sınırı durumu için mevcut tasarım prosedürlerinin kompozit döşeme sistemlerinin performansının yetersiz kullanıldığını göstermiştir.

Üstündağ ve Çelik (2006) yılında yaptıkları çalışmada çok katlı çelik yapılarda kullanılan kompozit döşeme sistemleri hakkında bilgi vermişlerdir. Çalışmada, günümüz teknolojik ilerlemelerine göre yeni sistemler anlatılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

Bingöl (2008) yaptığı doktora çalışmasında oluşturduğu beton numuneleri yüksek sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonra numuneleri farklı yöntemlerle soğutup beton ile donatı arasında oluşan aderans kuvvetlerinin ve beton basınç dayanımlarının değişimleri

2. KAYNAK ÖZETLERİ

araştırılmıştır. Oluşturulan numuneler, 50°C-700°C aralığında 12 farklı sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra havada veya suda soğutulmuştur. Numuneler üzerinde çekip çıkarma (pull-out) ve basınç mukavemeti deneyleri yapılmış, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış kontrol numuneleri ile karşılaştırılmak suretiyle yüksek sıcaklıkların aderans ve basınç mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıcaklığın artmasıyla 150°C'ye kadar, beton-donatı aderans kuvvetinde ve basınç mukavemetinde artışlar tespit edilmiş, ancak bundan sonraki tüm sıcaklıklar için aderans kuvvetleri ve basınç mukavemetleri azalmıştır. Suda soğutulan numunelerin basınç mukavemetinde daha fazla kayıp gözlenirken beton-donatı aderans kuvveti için soğutma şeklinin etkisi çok belirgin olarak görülmemiştir. Ayrıca beton mukavemetinin ve gömme boyunun artması ile beton-donatı aderans kuvvetinin arttığı belirlenmiştir.

Yılmaz (2008) yaptığı yüksek lisans çalışmasında kompozit döşeme elemanlarda pozitif moment taşıma kapasitesini incelemiştir. Çalışmada, trapez şeklinde sac elemanlar döşemede kullanılmış, benzer sac kalınlığı ve döşeme yüksekliğine sahip 6 adet 4,10 m açıklıklı basit kiriş kompozit döşeme numunesi düşey yükler etkisinde denenmiştir. Elde edilen kuramsal ve deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Kompozit döşemelerin kullanımı değişik uygulamalarda yaygınlaşmaya başladı. Yönetim binaları ve ofisler için geniş hacimler önemli olduğu için geniş hacimler sağlayan kompozit döşemelerin yapımı geniş açıklıklı çelik yapı binalar modern dönemde tercih edilmektedir. Tabi bu uygulamalar aynı zamanda depo, hastane, ev, okul ve garajlarda gerçekleştirilmektedir. (Emre 2010)

Borhan (2011) yaptığı doktora çalışmasında bazalt elyaf takviyeli cam betonun termal ve yapısal davranışını araştırmıştır. Çalışmanın birinci aşamasında farklı yüzdelerde kullanılan bazalt elyaf katkısının beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise küçük ölçekli döşeme deneyleri ile bazalt elyaf takviyeli kompozit döşemelerin yangın performansı araştırılmıştır. Bunlara ek olarak ABAQUS programı ile gerilme davranışları modellenmiştir.

Cordeiro ve Silva (2016) yaptıkları çalışmada, kompozit bir çelik-beton levha tasarlamak için üç yöntem düşünülmüş ve bir metro istasyonunda uygulanmıştır. Metroda

bulunan asma kat 90 dakika yangın etkisine maruz bırakılmıştır. Çelik kirişler yangına karşı koruma sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar da kullanılarak membran etkisi VULCAN yazılımı ve basitleştirilmiş Bailey yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

Selamet ve Yolaçan (2017), yaptıkları yangın deneysel çalışmada, yüksek katlı çelik bir yapı için tasarlanmış kompozit döşemenin iki kenarında simetrik bir birleşim mekanizması kullanıp deney alanından (fırın) daha büyük bir döşeme alanı testi imkânı sağlamışlardır. Teste tabii tutulan beton döşeme yangın ve yükleme esnasında membran davranışı göstererek yük taşıyıcı özelliğini yangın boyunca devam ettiği tespit edilmiş ve kompozit kat döşemelerinde ikincil (tali) çelik kirişlerin yalıtımsız kalmasını önermişlerdir.

Mahachi ve Dundu (2012) tarafından lineer elastik kırılma mekaniği kullanılarak kompozit döşemelerinin bahsi geçen bağ açma/kayma yükünü hesaplamak için teorik çözüm geliştirilmiştir.

Ayrıca, Lakshmikandhan vd. (2013)'nin çalışmasında cıvata ve/veya çelik çubuk gibi herhangi bir kesme bağlayıcısı kullanılmadan kompozit levhanın ayrılması ve ayrılma başarısızlığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ortaya çıkan çelik blok (sac ve kiriş) ve beton parçalar ayrı ayrı hareket etmektedir.

Li ve Wang (2013) tarafından çelik-beton kompozit kirişlerin yangına dayanıklılığı için kritik sıcaklığa dayalı basitleştirilmiş bir yaklaşım, kompozit kirişlerin kritik sıcaklık ve yangından korunma değerlerinin belirlenmesiyle, hâlihazırda yük taşıma limit durum yöntemine dayalı olarak geliştirilmiş Çelik yapıların yangın güvenliği için Çin Teknik Standardında yer alan bir yaklaşım önerilmiştir.

Çelik sacın açıkta olmayan üst yüzeyindeki sıcaklık, yangın doğrudan saca maruz kalmadığında özellikle önemlidir (Tan ve Nguyen 2015) (Cirpici vd. 2019a, Cirpici vd. 2019b; Cirpici vd. 2019c). Ancak, herhangi bir nedenle yangın betonun üst yüzeyine etkidiğinde, betonun üst kısmı daha fazla önem kazanabilir ve bu da beton blokta çatlakların oluşmasına ve yangının döşeme ve çelik dahil olmak üzere çelik parçalara

yayılmasına neden olabilir. Bu konu, Wang vd. (2021) gibi araştırmacıların hala ilgi alanındadır.

Nguyen vd. (2015) ayrı bir çalışmada, yangın testi ve sayısal modellerle döşeme davranışını sehim ve yük taşıma kapasitesi açısından anlamak için korumasız ikincil ve iç kirişler ve korumalı kenar kirişleri ile küçük ölçekli kısmen korumalı bir kompozit zemin geliştirdiler. Hiçbir yapısal bozulma elde edilemediğinden ve korunan kenar kirişleri boyunca dönme kısıtlamasının, döşemede bu kirişlerin üzerinde yoğun stres konsantrasyonuna neden olduğu için iç kirişlerin korumasız bırakılabileceği sonucuna varmışlardır.

Erişilebilir bir örnek üretmek için kiriş ve kabuk elemanları kullanılarak gerçek ölçekli bir yangına maruz bırakılan sonlu elemanlar programı olan Abaqus kullanılarak bir kompozit döşemenin hem termal hem de yapısal analizi için gelişmiş hesaplama modellerinin doğrulanması için bir kıyaslama önerilmiştir (Both vd. 2016).

Nguyen ve Tan (2017), korunan kenar kirişlerin eğilme rijitliğinin etkisini yangın testi ve elemanların sıcaklıkları ile orta açıklık sehimleri arasındaki ilişkiyi içeren yüklemeli sayısal çalışmalara dayalı olarak araştırmıştır. Korunan ana kirişlerin rijitliği artırılarak döşeme sehiminin azaltılabileceği ve kirişler arasındaki kompozit hareketin bu yararlı etkide kilit rol oynadığı tespit edilmiştir.

Eurocode tasarım yöntemini ihtiyatlı bir şekilde tartışmak ve kesme bağlantısının kapasitesini belirlemek ve yeni bir tasarım formülü önermek için enine trapez sac ve döşemeye bağlanan başlı kesme çivilerinin davranışı hem ortam hem de yangın koşullarında araştırılmıştır. Kesme saplamalı döşeme tipinden bağımsız olarak, çelik kirişlerin doğrusal olmayan davranışını yakalamak için sayısal üç boyutlu modeller yürüterek, önceki olası deprem nedeniyle hasar görmüş çelik I-kesitli kirişlerin artan sıcaklıklarda dönme kapasitesi incelenmiştir (Pantousa ve Mistakidis 2017).

Alam vd. (2018) tarafından yangına karşı korumasız ve korumalı ince döşemelerin yangındaki davranışını modellemek için bir sonlu eleman analizi yaklaşımı hedeflenmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, 60 dakikalık standart yangına maruz kalma

2. KAYNAK ÖZETLERİ

sonrasında çelik sıcaklığının 400°C içinde kalması nedeniyle korumalı ince zeminlerin daha yüksek bir yangın direnci sunduğunu ortaya koymaktadır.

Jiang vd. (2018) yaptıkları çalışmada kompozit döşeme elemanlarında kaynaklı tel örgü takviyesi her zaman gerekli olmadığı ancak çatlamayı kontrol etmeye yardımcı olduğu sonucuna varmışlardır. Buna ilaveten yüksek sıcaklıklarda yüklemenin de etkisiyle çelik sacın betondan ayrılması ve oluşan çatlaklardan ötürü ısıнын nüfuz etmesiyle betonun dökülmesi durumu ve sacın direk yangına maruz kalıp burkulması Lim ve Wade (2002)'nin yaptıkları test çalışmasında belirtilmiştir. Bu çalışmada 20 dakikalık yangın testinden sonra çatlaklar, yarığın üst kısmı ile beton levha arasındaki kesişme noktasından yaklaşık 45 derecelik bir açıyla yukarı doğru yayıldı.

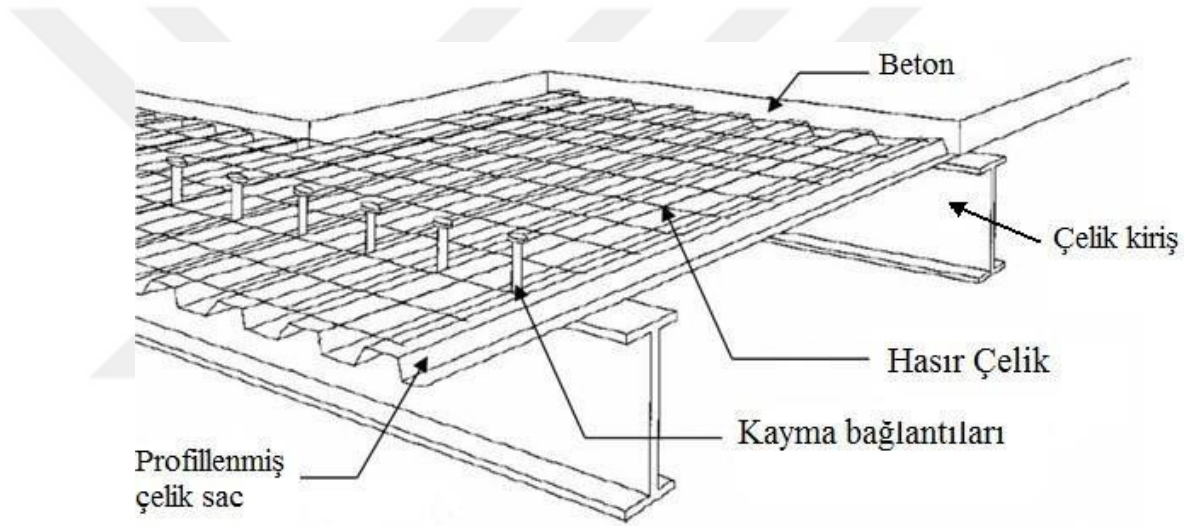
Khorasani vd. (2019) tarafından yürütülen bir parametrik çalışmada modelleme yaklaşımı, yangın eğrileri, uygulanan yerçekimi yükleri ve tehlike senaryoları gibi çeşitli parametrelerin bir prototip kompozit döşeme sistemlerinin yangın performansı üzerindeki etkisini araştırmak için çalışma geliştirmişlerdir. Bu çalışmaya göre ABD'nin performansa dayalı yangın tasarımının özellikle doğal yangınlara maruz kaldığında sağlam olduğunu belirtiyorlar.

Cirpici vd. (2020) çalışmasında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, kompozit döşemeye yükleme olmaksızın beton kısmından (üstten) Hızlı ve Standard (ISO 834) yangınlar 1 saat boyunca etki ettirerek döşemede ısı transferi analizleri yapmışlardır. Geliştirdikleri numerik modelde çelik profil ve saca yangın koruması uygulamışlardır ve döşemenin yapı elemanlarında sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir.

Son yıllarda, bir yangına maruz kalma sırasında çelik profillerin hızlı ısınması nedeniyle beton ve çelik blok arasındaki bağ ayırma etkisine ilişkin sayısal çalışmalar, Piloto vd. (2020a), Piloto vd. (2020b) ve Piloto vd. (2020c) tarafından yük seviyesi ve bağ ayırmayı dikkate alarak kompozit levhaların yangına dayanıklılığını tanımlamak için yeni bir basit hesaplama modeli üretmek üzerine yapılmıştır.

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR

Kompozit döşeme yapı elemanları başlıca; çelik profil kiriş, kayma bağlantısı, şekil verilmiş çelik sac ve beton bloktan (donatılı veya donatısız) oluşur (Şekil 3.1). Karma döşemelerin yapımında elemanlar üzerindeki gerilmeleri azaltmak ve sehimini minimuma indirmek amacıyla kompozit olarak tasarlanan döşemeler arasındaki mesafeleri azaltmak gerekmektedir. Aynı zamanda bu durum tasarımda en uygun yol olarak belirlenmektedir. Bundan dolayı, yapı elemanları içerisinde ana kirişlere ek olarak 3 m arayla atılacak tali kirişlerin bu sorunu ortadan kaldırabileceği kabul görmüştür (Emre 2010) (Zoltan ve Szatmari 1998).



Şekil 3.1. Kompozit döşeme sistemi

3.1. Beton

Kompozit döşemelerde beton sınıfı olarak genellikle hafif ağırlıklı beton tercih edilir. Birim hacim ağırlığı $\rho = 1600 - 1900 \text{ kg/m}^3$ arasındadır (Emre 2010). Fakat normal betonun kullanıldığı durumlar da vardır.

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR



Şekil 3.2. Beton dökümü

Yaygın olarak kullanılan beton sınıfları ve karakteristik değerleri Eurocode 2'ye göre Çizelge 3.1'de verilmektedir. f_{ck} betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı, f_{ctm} çekme dayanımı, $f_{ctk 0.05}$ karakteristik çekme dayanımı ve E_{em} kısa yüklemeler altındaki elastik modülüdür (Emre 2010).

	Beton sınıfı			
Karakteristik değerler	C20	C25	C30	C35
$f_{ck} (N/mm^2)$	20	25	30	35
$f_{ctm} (N/mm^2)$	2,2	2,6	2,9	3,2
$f_{ctk 0.05} (N/mm^2)$	1,5	1,8	2,0	2,2
$E_{em} (kN/mm^2)$	30	31	32	34

Çizelge 3.1. Beton Sınıfı ve Karakteristik Değerleri

Hafif beton için karakteristik çekme gerilmesi değerleri tablo 2.1'deki değerlerin η katsayısıyla çarpılması sonucu elde edilir.

$$\eta = 0.30 + 0.70(\rho/2400) \quad (3.1)$$

Kompozit döşemelerde kullanılacak betonun minimum dayanımı $20 N/mm^2$ ve C50'den sınıfından daha yüksek betonların tasarımda kullanılmaması Eurocode 4'e (CEN 2005c) önerilmektedir (Emre 2010).

3.2. Profillenmiş Çelik Sac

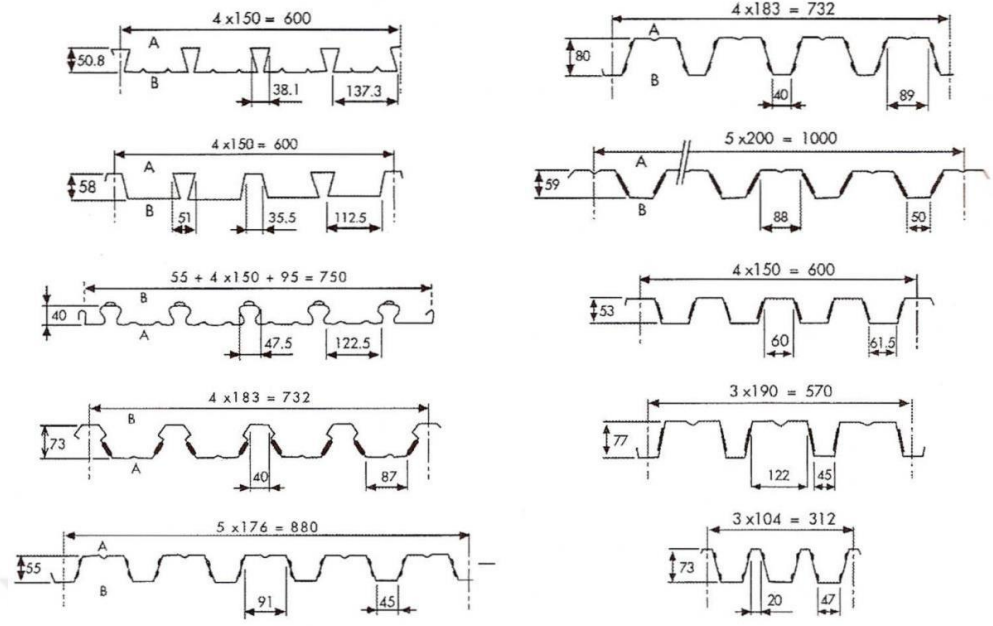
Beton ile mekanik yönden kenetlenmeyi sağlayan beton altı trapez sac ekonomik olarak elverişli olmadığından pek fazla tercih edilmemektedir. Beton ile çelik sac arasındaki bağ kuvvetini oluşturmak için farklı tiplerde ve soğukta biçimlendirilmiş çelik sac en kesitleri kullanılmaktadır. Bu çelik sacların farklılığını oluşturan etmenlerse; sacın en kesit olarak şekil verilme biçimi, olukların derinliği ve yüksekliği, tekrarlama aralığı, genel sac boyutları ve sac ile betonun tutunmasını sağlayan farklı bağlantı türlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Profillenmiş Sac

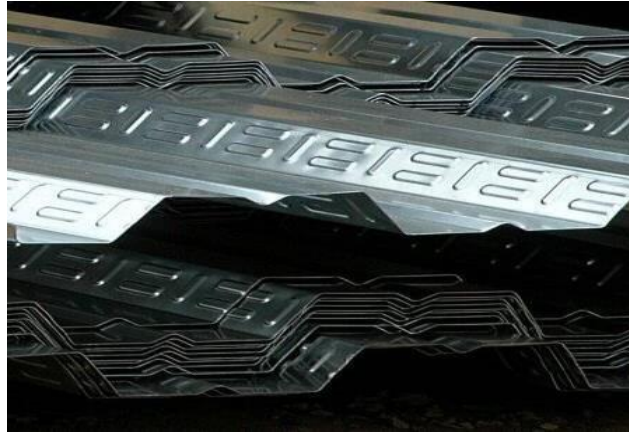
Şekil 3.4’de kompozit döşemede tercih edilen sac en kesitlerinin bazı örnekleri gösterilmektedir. Ayrıca beton ile çelik sac arasındaki mekanik bağlantıyı sağlayacak olan, beton altı trapez sacın girinti ve çıkıntı boyutları gösterilmektedir. Eurocode 4’de sac için minimum kalınlık 0,70 mm olarak önerilmiştir (CEN 2005c).

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR



Şekil 3.4. Kompozit döşemelerde kullanılan çelik sac tipleri

Kompozit döşemede kullanılacak çelik sacın minimum akma dayanımı 220 N/mm² olmalıdır. Pratikte ise bu akma dayanımı genel olarak 280 N/mm² ile 350 N/mm² arasında olan çelik sac malzemeler tercih edilmektedir (Emre 2010).



Şekil 3.5. Profillenmiş Çelik Sac

Çelik sacların korozyondan korunmaları için kullanılacak olan malzemenin galvanizlenmiş olma zorunluluğu bulunmakta ve de 275 g/m² miktarında galvaniz ile kaplanması önerilmektedir (Emre 2010).

3.3. Kayma Bağlantısı

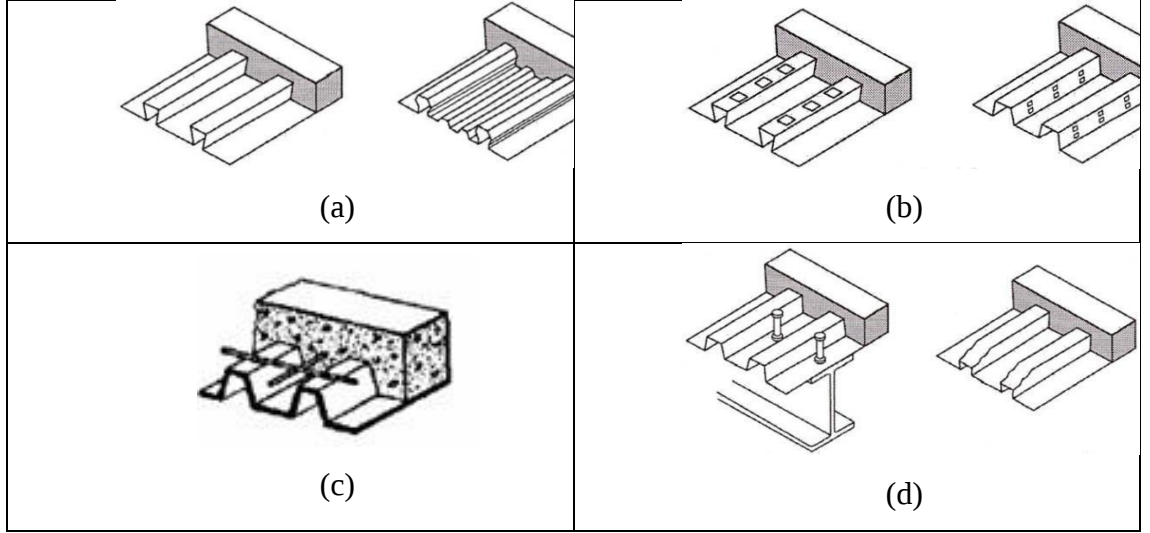
Bir kompozit döşemede kullanılacak olan profillenmiş çelik sac ile beton arasındaki mekanik bağlantıyı daha iyi sağlayabilmek için birleşim kısmında kaymayı önlemek gerekmektedir.

Beton ile profillenmiş çelik sacın arasındaki yatay yöndeki kayma kuvvetini karşılayabilmek için, sac tipi yani sacın girinti çıkıntılarının değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, başlıklı saplamalar hem standartlarca kabul gören hem de uygulanabilirlikte pratik olması açısından günümüzde yaygın olarak kullanılan mekanik kayma bağlantılarıdır.

Beton ile sac arasındaki aderansı sağlayabilmek için aşağıdaki yöntemlerden biri veya birkaçı kullanılır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005):

- Kapalı oluklu olarak imal edilmiş çelik sac en kesitine şekil verilerek kesme kuvvetinin aktarılması ile (Şekil 3.6-a),
- Sacın yüzeyinde oluşturulan girinti ve çıkıntılarla sağlanan mekanik bağlantı ile (Şekil 3.6-b),
- Katlanmış/kıvrılmış bir saca hafif çelik donatı hasırı kaynaklanması ile (Şekil 3.6-c),
- Döşemenin uç bölgelerine konulmuş kayma bağlantıları veya sac ucunda bulunan oluklara şekil verilmesi ile (Şekil 3.6-d).

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR



Şekil 3.6. Kompozit Döşeme Plaklarında Beton-Çelik Bağlantı Türleri (a) Sürtünmeli bağlantı, (b) Mekanik bağlantı, (c) Hasır çelik ile bağlantı, (d) Uç ankrajları (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005)

Başlıklı kayma bağlantıları (Şekil 3.7) kirişin üst başlığına eritilerek ve kayma bağlantısının ucuna özel seramik halka uygulanarak kaynaklama işlemi yapılır. (Emre 2010).



Şekil 3.7. Başlıklı Saplama

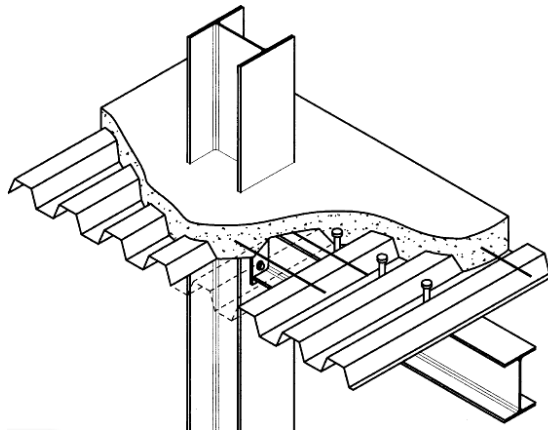
Kaymayı engelleyecek bir diğer örnek ise, kompozit bir döşeme plağını oluşturan beton ile aynı zamanda kalıcı kalıp görevi gören çelik sacın birlikte çalışmasını sağlamak amacıyla Şekil 3.8’de görülen stud çivileri ve kayma bağlantıları kullanılmaktadır. Bu şekilde beton, çelik sac ve profillenmiş çelik kiriş arasında oluşabilecek kayma hareketi engellenmiş olur (Yorgun 2005).



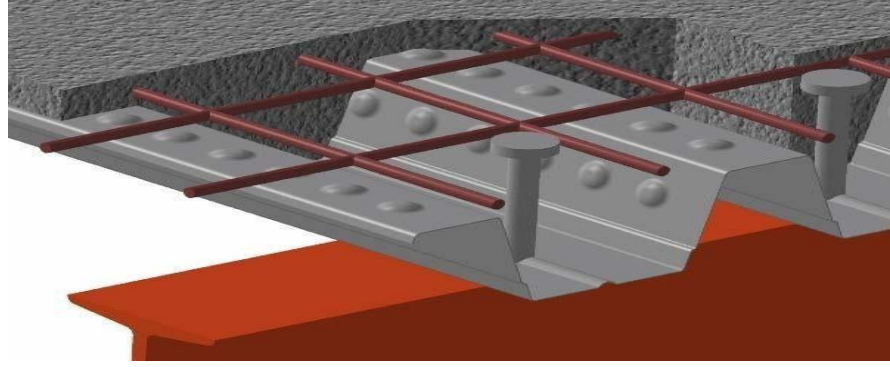
Şekil 3.8. Kayma Bağlantısı – Stud Çivisi

3.4. Çelik Kiriş

Kompozit yapı elemanlarından biri olan kompozit kirişin davranışını etkileyen temel unsurlarından biri çelik kiriş ile betonarme döşeme arasındaki kesme kuvveti transferinin büyüklüğüdür. Aynı zamanda kompozit kiriş ile beton plak arasında mekanik kenetlenmeyi oluşturmak amacıyla kayma bağlantıları kullanılarak kompozit döşeme sisteminin bir elemanı olan çelik kirişinin betona bağlantısı sağlanmakta böylece iki malzeme beraber çalışmaktadır (Yorgun 2005). Şekil 3.9 ve 3.10’da kompozit döşeme ve kiriş birleşimi ve sac-kiriş birleşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kompozit Döşeme ve Kiriş Birleşimi



Şekil 3.10. Çelik Profil Kiriş

3.5. Donatı Çeliği

Kompozit döşemede kullanılacak olan donatı çeliği betonarme yapılardaki standartlara uygun olmalıdır. Negatif moment ve yangın donatısı olarak normal sünekliğe sahip donatıların kullanılması önerilir.

Çizelge 3.2. Donatı Çeliği Sınıfları ve Karakteristik Değerleri

Donatı çeliği sınıfı	S 500 (nervürlü)	S 550 (hasır çelik)
f_{ys} (N/mm ²)	500	550
f_{ts} (N/mm ²)	550-600	580
E_s (kN/mm ²)	210	210

Kompozit döşemelerde sıkça kullanılan donatı çeliği için karakteristik değerler Çizelge 3.2’de verilmiştir. f_{ys} donatı karakteristik akma dayanımı, f_{ts} donatının karakteristik çekme dayanımı ve E_s elastik modülüdür.

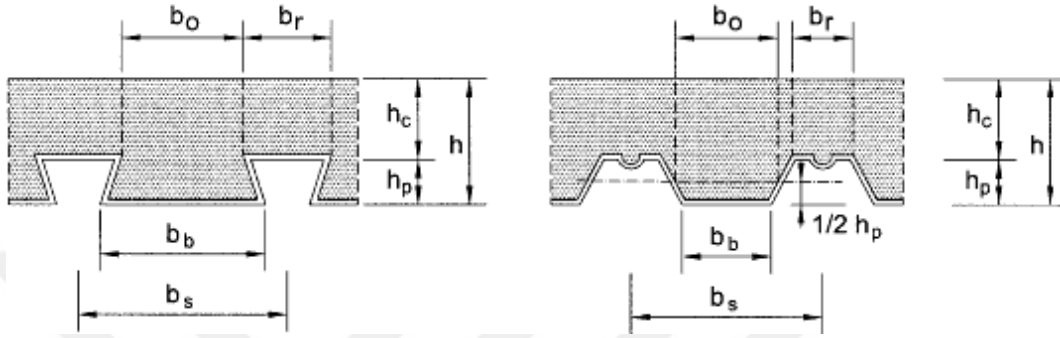
3.6. Yapısal (Konstrüktif) Kurallar

3.6.1. Döşeme Kalınlığı, Donatı ve Agrega

Eurocode 4’e göre kompozit döşemelerde CEN. (2005c);

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR

- Şekil 3.11’de gösterilen boyutlara göre h değeri minimum 80 mm ve sac üstündeki beton kalınlığı olan h_c minimum 40 mm olmalıdır. Kiriş ve sac rüzgâr bağlantıları için yanal olarak taşıyıcılığı varsa h 90 mm ve h_c 50 mm’den az olmamalıdır.
- Boyuna ve enine doğrultuda donatı miktarı $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ ’den az olmamalıdır.
- Donatıların aralıkları $2h$ ve 350 mm’yi geçmemelidir.



Şekil 3.11. Çelik Sac ve Döşeme İçin Boyutlar

Betonda kullanılan agregaların dane çapı için maksimum değerler şöyledir;

- $0,4h_c$
- $b_o/3$
- $< 31,5 \text{ mm}$

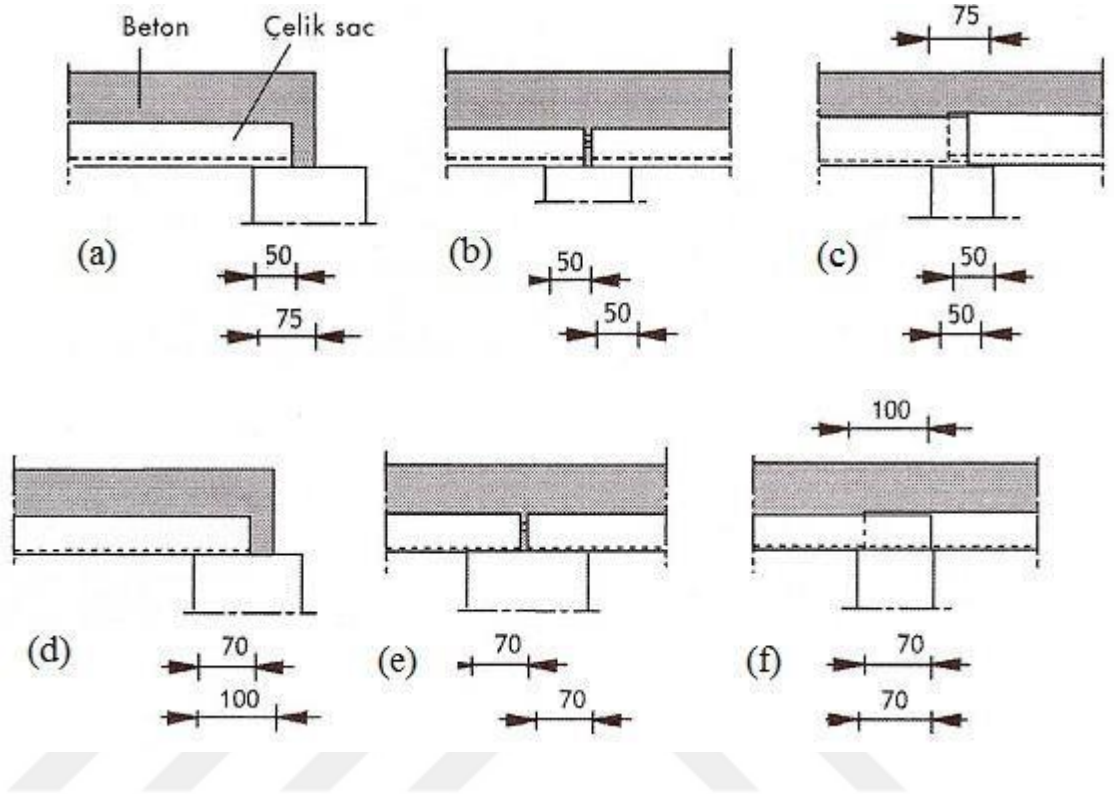
Kompozit döşemelerde meydana gelecek rötre çatlaklarını minimize etmek için, her iki doğrultuda da tüm döşeme alanını kapsayacak şekilde donatılar montajlanmalıdır. Hasır çelik olarak boyuna ve enine doğrultuda beton en kesitinin %0,2’si kadar bir oranda yerleştirilmelidir. Donatı türü olarak nervürlü donatı olması önerilmektedir. (Yorgun 2003).

3.6.2. Mesnetlenme Koşulları

Kompozit döşemelerde kalıp görevi gören çelik sac, döşeme ve kiriş gibi sabit mesnetlerde kullanıldığı gibi geçici mesnetlerde de kullanılabilir. Eurocode 3’e göre sabit mesnetler üzerine çelik sacın mesnetlenmesi için gerekli koşullar Şekil 3.12’de gösterilmektedir.

3. KOMPOZİT DÖŞEMEYİ OLUŞTURAN ELEMANLAR

- Çelik veya beton üzerine mesnetlendiğinde (Şekil 3.12-a,b,c)
- Dolgu duvar gibi diğer malzemelere mesnetlendiğinde (Şekil 3.12-d,e,f)



Şekil 3.12. Minimum mesnetlenme koşulları

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Oda Sıcaklığında Genel İlke ve Tasarımlar

Günümüzde kompozit döşemelerin tasarımında, beton ve çeliğin gerçek davranışına dayanan "Sınır Durumlar Yöntemi" kullanılmaktadır. Taşıma gücü ilkelerine dayanan bu yöntemde kontroller iki sınır durum için yapılmaktadır.

- Taşıma Sınır Durumu
- Kullanma Sınır Durumu

4.1.1. Taşıma Sınır Durumu

Yapı elemanlarının boyutlandırılması, etkiler başlığı altında verilen yüklere karşılık yapı kullanma süresince olabilecek etkiler altında boyutlandırmaktır. Bunlar, ölü yükler, kar yükleri, rüzgâr yükleri, deprem yükleri, hareketli yükler, çarpışma, patlama ve yangın yükleri gibi etkilerdir. En elverişsiz durumlara göre değerlendirme yapılmalıdır. Kalıp olarak çalışma aşamasında çelik sacın dayanımı veya kompozit çalışma aşamasında döşemenin dayanımı dış yüklere karşı yeterli olmalıdır. Her bir kesit veya eleman yapının analiziyle belirlenmiş iç kuvvetleri karşılayabilmelidir.

Mukavemet tasarım değerinin etkilerin öngörülen değeri ile aşağıdaki gibi karşılaştırılırlar;

$$S_d \leq R_d \quad (4.1)$$

Burada S_d etkilerin tasarım değerleri ve R_d ise mukavemetin tasarım değeridir.

Örnek olarak;

$$(N_{Sd}, V_{Sd}, M_{Sd}) \leq (N_{Rd}, V_{Rd}, M_{Rd}) \quad (4.2)$$

Şekilde gösterilebilir. İç kuvvetler veya momentler ayrı ayrı veya aralarındaki etkileşim $((V, M), (N, M) \dots)$ göz önüne alınarak gerekli irdelemeler yapılır (Emre 2010) ve (Yorgun 2005).

4.1.2. Kullanım Sınır Durumu

Aşırı deformasyon, betonda çatlakların genişlemesi ya da titreşim gibi yapının kullanılabilirliğini kaybetmesi gibi durumların göz önüne alınan sınır konusudur. Genel olarak; E_d göz önüne alınan tasarım etkisine karşı gelen en büyük yer değiştirme, dönme veya çatlak genişliği ve C_d göz önüne alınan tasarım etkisi için izin verilen en büyük yer değiştirme, dönme veya çatlak genişliği değeri olmak üzere (Emre 2010);

$$E_d \leq C_d \quad (4.3)$$

şartının sağlanması gerekir.

4.1.3. Yük ve Malzeme Güvenlik Katsayıları

Tasarım kuralları alınırken Eurocode'lar baz alındığında, dikkat edilecek yükler ve katsayıları da Eurocode'a bağlı kalınarak özetlenmiştir. Sınır şartlarının kontrol aşamasında dikkat edilecek yükler etkime sıklığı etkisinde; sürekli (G), değişken (Q) ve seyrek olarak etkiyen (A) olmak üzere üç başlıkta toplanmaktadır. Değişken olan yüklerden en büyük değerlerin birlikte etkimesi çok nadir olduğundan bu yükler azaltma katsayıları ψ_{0i} ile çarpılarak etkisi hesaplanmaktadır. Genel olarak tasarım esas yük değeri F_d karakteristik F_k değerinin γ_f yük güvenlik katsayısı ile çarpılması ile elde edilmektedir.

$$F_d = F_k \gamma_f \quad (4.4)$$

Sabit ve değişken yükler için aynı yük katsayıları kullanılmaktadır;

$$G_d = G_k \gamma_d \quad (4.5)$$

$$Q_d = Q_k \gamma_Q = \gamma_Q \left(Q_k + \sum_i \psi_{0i} Q_i \right) \quad (4.6)$$

γ_Q ve γ_G yük güvenlik katsayılarının değerleri, yükün değerini artırarak elverişsiz bir durum yapmasına veya azaltarak elverişsiz bir durum yapmasına bağlı olarak değişmektedir. (Çizelge 4.1)

Malzemeler uzun süreli yük etkisi altında bulunmaktadır. Özellikle beton dayanımı için çok fazla şartın (sıkıştırma, hava şartları, agrega kalitesi, vs.) etkisi dikkate alındığında, tahmin edilen dayanımdan daha düşük bir dayanımla karşılaşma ihtimali çeliğe göre daha fazladır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Çizelge 4.1. γ_Q ve γ_G yük güvenlik katsayıları

Yük Çeşitleri	Sabit yük katsayısı		Değişken yük katsayısı	
	Elverişli	Elverişsiz	Elverişli	Elverişsiz
Taşıma sınır durumu	1,35	1,35	1,5	0
Kullanma sınır durumu	1,0	1,0	1,0	0

Sünme, rötre ve çatlama gibi özellikleri göz önüne alındığında beton için daha büyük malzeme katsayısının kullanıldığı görülmektedir. Dayanımlar malzeme özelliklerinin tasarım değeri (X_d) kullanılarak belirlenmelidir:

$$X_d = X_k / \gamma_m \quad (4.7)$$

Burada X_k deneylerle belirlenen karakteristik dayanımı γ_m ise malzeme güvenlik katsayısıdır. (Çizelge 4.2)

Çizelge 4.2. Malzeme güvenlik katsayıları

Malzeme γ_m	Çelik γ_a	Donatı γ_s	Çelik Sac γ_{ap}	Beton γ_c	Kayma Bağlantısı γ_v
Taşıma Sınır Durumu	1,10	1,15	1,10	1,50	1,25
Kullanma Sınır Durumu	1,0	1,0	1,0	1,0 veya 1,30	1,0

4.1.4. Kompozit Döşemelerin Yapısal Süreci

Kompozit döşemelerin tasarımında iki yapısal sürece dikkat edilmesi gerekir:

- Yüklerin sadece kullanılan çelik sac tarafından taşındığı geçici inşaat süreci
- Beton ve çelik arasındaki aderansın sağlanması ile oluşan kompozit çalışma süreci

İnşaat Sürecinde Davranış

İnşaatin yapımı sırasında beton ıslak haldeyken gelen basınçları, eğilme momentleri ve kesmeleri profillenmiş çelik elemanlar karşılar. Gelen basınç kuvvetinden dolayı profilin başlık veya gövde kısmının bir kısmı basınç kuvveti etkisi altında kalır ve kesmelerde genellikle profilin mesnetlendiği kısımlarda bulunur. Eğilme momenti veya basınç etkisi altında olan bu kısımlarda basınç gerilmelerinin değeri akma gerilmesine ulaşmadan yerel burkulma meydana gelebilir. Bu da çelik sacın dayanımını ve rijitliğini azaltır. Bu tip ince elemanları hesabı için bir yöntem olarak yönetmeliklerde “etkili genişlik” kavramı kullanılır. Basınç başlığının etkili genişliği, en kesitin tarafsız ekseninin yerine ve başlıktaki maksimum gerilmeye bağlıdır. Bu süreçte, profillenmiş çelik sac en kesit karakteristikleri ince cidarlı çelik elemanlar ile ilgili boyutlandırma kurallarına göre ele alınarak gerekli kontroller yapılmalıdır (Emre 2010).

İnşaat Sürecinde Göz Önüne Alınacak Yükler

Kalıp olarak profillenmiş çelik sac kullanıldığında, sacın emniyetinin ve kullanılabilirliğinin kontrolü gereklidir. Eğer geçici ara destekler kullanılmış ise bu malzemelerde hesaba katılmalıdır. Profillenmiş çelik sacın hesabında aşağıdaki yükler göz önüne alınmalıdır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005);

- Çelik sacın kendi ağırlığı,
- Islak beton ağırlığı,
- Göllenme etkisi (çelik sacın sehiminden dolayı beton derinliğinin artması)
- İnşaat süresindeki yükler,
- Geçici depolama yükleri.

İnşaat Sürecinde Tasarım

Kompozit döşemeyi oluşturan profillenmiş çelik sac, inşaat sürecinde göz önüne alınan yükler altında, taşıma ve kullanma sınır durumları için gerekli güvenliği sağlanmalıdır. Çoğu çelik sac üreticileri yapım esnasında saca gelebilecek olan yükler etkisindeyken üniform yayılı yükleri tasarım değerlerini veren tablolar hazırlanmaktadır.

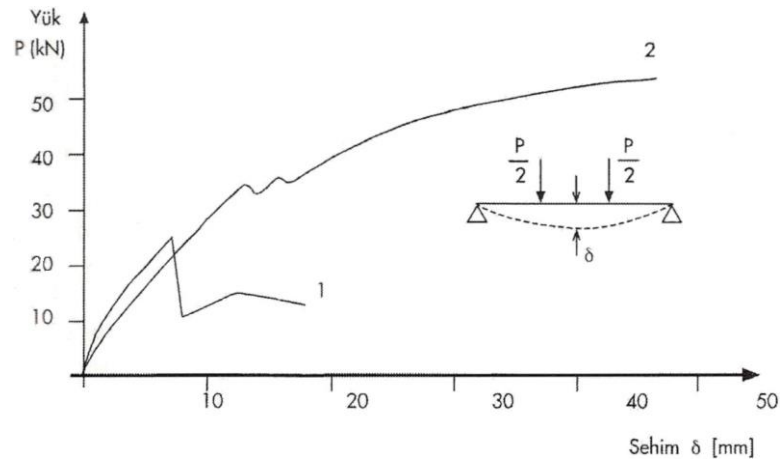
Genellikle, çelik sacın seçimi ve tasarımı, çelik sac üreticileri tarafından yönetmeliklerde, esasları verilen deneyler sonucu belirlenmiş tablolar kullanılarak kompozit tasarım ile birlikte yürütülür. Tasarım tablolarının hazırlanmasında kabul edilen yükler, genellikle en elverişsiz durum için üniform yayılı konstrüksiyon yükleri ve kendi ağırlıklarıdır. Eğer üretici tabloları yetersiz ise, ince cidarlı çelik elemanlarla ilgili yönetmeliklerde verilen kurallara göre kapsamlı tasarım yapılmalıdır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Kompozit Çalışma Sürecinde Davranış

Kayma bağlantı elemanları kullanılarak, profillenmiş çelik sac ile beton arasında bağlantı kurularak oluşturulan kompozit döşeme davranışı, beton ile çeliğin bir arada kullanılması ile oluşan betonarmenin davranışından farklıdır.

Karma bir eleman olan betonarmede, çelik ile beton arasındaki birliktelik aderans ile sağlanır. Diğer türlü ise kayma elemanları kullanılarak kompozit bir kesit oluşturuluyor. Bağlantıların tasarımı oluşturulacak elemanın maksimum dayanımına göre tasarlanır. Eğer kayma elemanları bu dayanıma göre sayısı belirlenirse “tam kayma bağlantılı” olarak isimlendirilir. Eğer kayma bağlantıları bağlantının tam olarak sağlanabilmesi için gerek duyulan sayıdan az ise tasarım "kısmi kayma bağlantılı" olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda elemanın taşıma gücü yapım metoduna, kiriş açıklığına, kayma bağlantılarının sayısına ve bağlantıların yük-kayma diyagramının eğimine bağlıdır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Profillenmiş çelik sac-beton kompozit döşemeler bahse konu iki sistem arasındadır. İki sistemin de özelliğine sahiptir. Çelik sac aynı betonarme sistemdeki donatıya benzemektedir. Kompozit kirişte ise eğilme rijitliğine sahip parçadır. Çekme yükleri etkisinde yapı rijitliği boşluklardan dolayı azalır. Beton ve çelik sac arasındaki aderans çatlaklara rağmen kayma kuvveti transferi için yeterlidir. Tasarım yükünden daha yüksek bir yük kompozit döşemeye etki ettirildiğinde, göstereceği tepki çelik sacın tipine bağlıdır. Elemanlar arasında oluşan kayma gerilmeleri kayma dayanımından daha büyük olduğunda, kompozit döşemelerde bir miktar rölatif kayma ortaya çıkabilir (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).



Şekil 4.1. Kompozit döşemelerde rijit davranış biçimleri

Kompozit döşemelerde göçme tipi, sadece kullanılan profillenmiş sacın tipine bağlı olarak değil yapılacak olan yerin boyutlarına göre de değişkenlik gösterir. Eğer gelen yük profillenmiş çelik sacın dayanımını aşarsa profilin tipine bağlı olarak ani bir şekilde göçebilir bu durumda döşeme davranışı “gevrek davranış” gösterir. Eğer yük yavaş yavaş artarsa bazı profil tiplerine göre döşeme sehim yapar ve burada da döşeme davranışı “sünek davranış” gösterir (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Belirli çelik sacların oluşturulması için deneyler yapılır ve sacın davranışına göre çelik sacın tipi belirlenir ve Eurocode 4’e göre de bu deneyler yapılarak profilin tipinin belirlenmesini önermektedir. Profillenmiş çelik sac en kesiti ile teşkil edilmiş kompozit döşemede yer değiştirme kontrollü yükün dereceli olarak arttırıldığı deneyler yapılarak, Şekil 3.1’e göre iki davranış modundan hangisinin ortaya çıkabileceği belirlenmektedir.

Gevrek Davranış Biçimi

Profillenmiş çelik sac ile beton arasındaki aderansın azalmasıyla iki eleman arasında rölatif kayma gerçekleşir ve yükte azalma görülür. Böylelikle kayma kuvvetinin tümü iki eleman arasında sürtünme oluşturur ve buna ilave döşemenin ek bir deformasyonu ile birlikte yükte ani bir artış görülür ve bunun sonucu olarak da döşemedeki kayma bağlantı elemanları yetersiz kalır ve göçer.

Sünek Davranış

Mekanik bağlantı kompozit döşemede göçme meydana gelinceye kadar kayma kuvveti transferini sağlar. Göçme, tam kayma bağlantılı tasarımlarda kayma kuvvetinin eğilme dayanımını aşmasıyla veya tam kayma bağlantılı olmayan tasarımlarda boyuna kayma dayanımının sona ermesiyle ortaya çıkar. Eğer göçme yükü ilk kaymaya sebep olan yükün %10'undan daha fazla ise davranış “sünek” olarak sınıflandırılır. (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Kompozit Dizayn Sürecinde Dikkate Alınacak Yükler

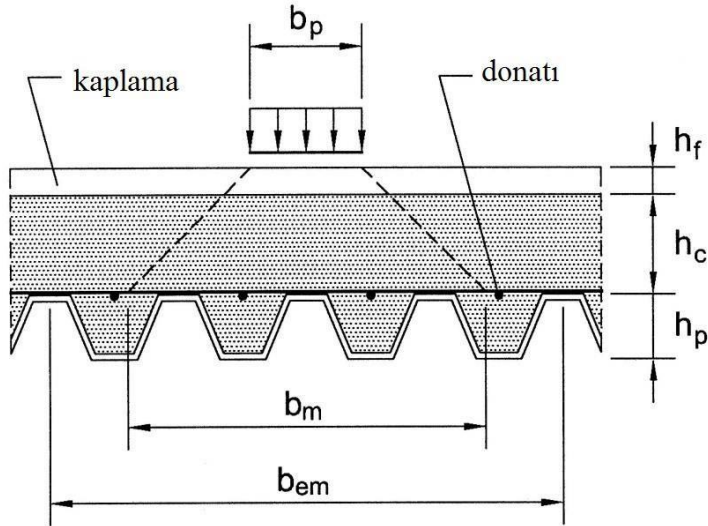
Kompozit çalışma sürecinde;

- Döşeme ağırlığı
- Sıva ve kaplama ağırlığı
- Hareketli yük

değerleri belirlenerek hesap yapılır. Çelik sacın yalnız başına kalıp olarak çalıştığı inşaat sürecinde, geçici ara mesnetler kullanılmış ise kompozit çalışma sürecindeki tasarım hesaplarında bu mesnetler göz önüne alınmaz.

Etkili Döşeme Genişliği

Kompozit döşemenin dayanım hesapları üniform yayılı yükler için birim genişlikte yapılmaktadır. Tekil veya çizgisel yük durumlarında ise hesaplarda etkili döşeme genişliği kullanılmaktadır (Yorgun 2005).



Şekil 4.2. Tekil Yükün Yayılışı

Tekil yük veya döşemenin açıklığına paralel çizgisel yük durumunda, etkili döşeme genişliğini belirlemek için aşağıdaki formül ile hesaplanan değer kullanılır:

$$b_m = b_p + 2(h_c + h_f) \quad (4.8)$$

h_c : Çelik sac üstündeki beton döşeme kalınlığı

h_f : Eğer varsa beton üstündeki sıva ve kaplama kalınlıklarıdır.

Yapısal analiz ve dayanım hesabı için göz önüne alınacak etkili döşeme genişliği aşağıdaki bağıntılardan hesaplanabilir:

Eğilme ve boyuna kayma için:

- Sürekli döşemelerin kenar açıklıkları ve basit açıklıklı döşemeler için:

$$b_{em} = b_m + 2L_p[1 - (L_p/L)] \leq \text{döşeme genişliği} \quad (4.9)$$

- Sürekli döşemelerin iç açıklıkları için:

$$b_{em} = b_m + 1.33L_p[1 - (L_p/L)] \leq \text{döşeme genişliği} \quad (4.10)$$

Kesme kuvveti için:

$$b_{em} = b_m + L_p[1 - (L_p/L)] \leq \text{döşeme genişliği} \quad (4.11)$$

L_p : Yükün mesnete en yakın uzaklığı

L : Açıklıklar

Döşemenin enine doğrultuda homojen olarak çalışmasını sağlamak için tüm yükleme durumlarında gerekli minimum enine donatı yerleştirilmelidir. Tekil veya çizgisel yük durumunda hesapla bulunacak gerekli enine donatı etkili döşeme genişliği belirlenerek yerleştirilir (Yorgun 2005).

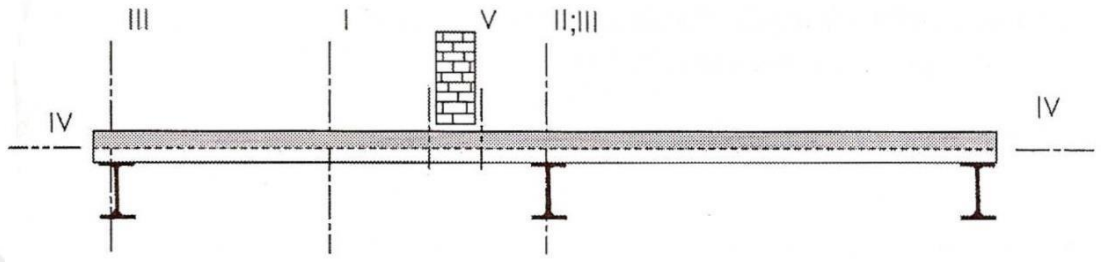
Genelde,

- Tekil yükler ≤ 7.5 kN
- Tekil çizgisel yükler ≤ 5 kN/m

sınırlar aşılmadığından minimum donatı (%0,2) yeterli olmaktadır.

Taşıma Sınır Durumu

Profillenmiş çelik sac-beton kompozit döşeme plaklarının taşıma gücünün belirlenmesinde tasarım formülleri beklenen göçme biçimleri üzerine kurulmuştur. Beton sertleşip yeterli mukavemeti kazandığında, yani kompozit çalışma gerçekleştiğinde, Şekil 4.3’de görülen kesitlerde göçme ortaya çıkabilir.



Şekil 4.3. Taşıma Sınır Durumunda Kritik Kesitler

Eğilme Dayanımı (I ve II Kesitlerinde Göçme): Eğilme göçmesi halidir ve tasarım eğilme dayanımına çelik sac ve beton arasındaki bağlantı tam olarak sağlanmış yani kayma tam olarak önlenmiş ise ulaşılabilir (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Kesme Dayanımı (III Kesitinde Göçme): Kesme kuvvetine dayanım kapasitesinin aşılması özel hallerde, örneğin, büyük tekil kuvvetler etkisindeki kısa açıklıklı derin döşemelerde ortaya çıkar. Tekil yükten dolayı zımbalama dayanımı ayrıca kontrol edilmelidir (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Boyuna Kayma Dayanımı (IV Kesitinde Göçme): Döşemenin taşıyabileceği maksimum yük, kayma dayanımının bağıntıları ile belirlenmektedir. Eğer çelik sac ile beton arasındaki bağlantı yeterli değilse, kompozit döşemede taşıma gücü moment dayanımına, yani I kesitinde eğilme dayanımına ulaşamaz. Bu durumda bağlantı "kısmi kayma bağlantısı" olarak tarif edilmektedir (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

Eğilme Dayanımı ve Kontrolü

En kesit tasarım plastik eğilme $M_{p,Rd}$ pozitif ve negatif moment bölgelerinin her ikisinde hem beton hem de profillemiş çelik sac için dikdörtgen eğilme diyagramları kabulü ile hesaplanmaktadır.

Pozitif moment bilgisi genellikle sık karşılaşılan $h_p \leq 60 \text{ mm}$ derinliğinde çelik sac ve $h_c = 50 \text{ mm}$ minimum beton kalınlığında pozitif moment altında kompozit döşemenin plastik tarafsız eksenini çelik sac en kesitinin üstündeki beton bloğun içindedir. Daha derin çelik saclarda ise tarafsız eksen çelik sac derinliği içinde kalır. Kompozit döşeme en kesiti için;

$$\frac{A_p f_{yp}}{\gamma_p} \leq \frac{b \cdot 0.85 f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4.12)$$

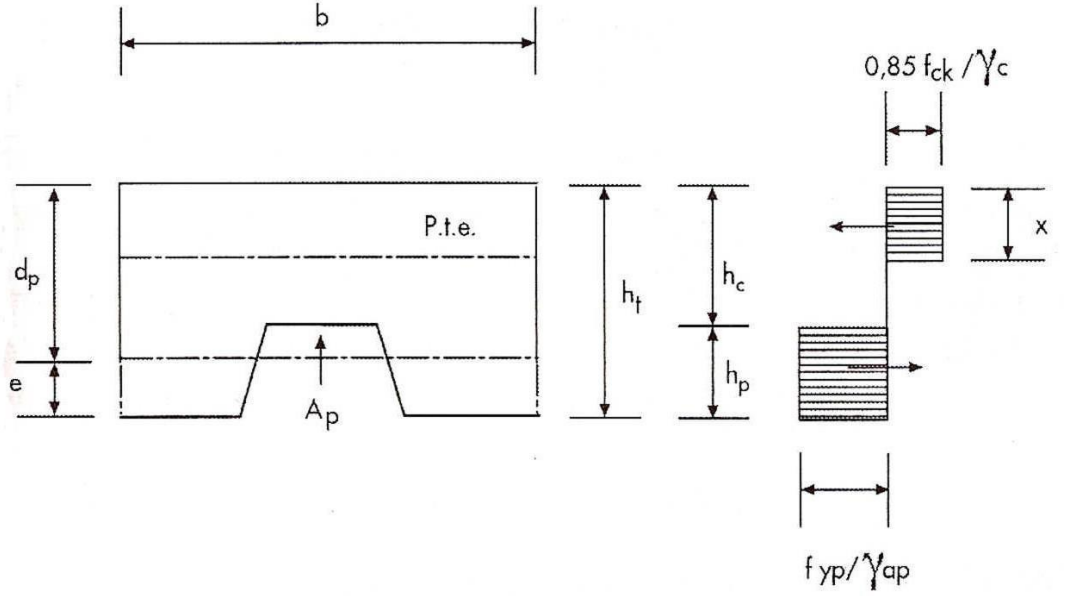
ise tarafsız eksen beton bloğun içindedir ve çelik sacın taşıyabileceği eğilmenin çekme bileşeni;

$$N_{cf} = A_p f_{yp} / \gamma_{ap} \quad (4.13)$$

olmak üzere, beton gerilme bloğunun derinliği;

$$x = \frac{N_{cf}}{b \cdot 0.85 f_{ck} / \gamma_c} \quad (4.14)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 4.4. Pozitif moment bölgesinde plastik tarafsız eksen çelik sac üzerindeki beton blok içinde gerilme dağılımı

$x < h_c$ olan bu durumda Şekil 4.4'da görülen gerilme dağılımı kabulü göz önüne alınarak kompozit döşemenin en kesit eğilme dağılımı;

$$M_{+p,Rd} = N_d(d_p - 0.5x) \quad (4.15)$$

A_p : Çelik sacın çelmede enkesit alanı (gerekli ise azaltma yapılmış)

f_{yp} : Çelik sacın akma dayanımı

γ_{ap} : Çelik sac için malzeme güvenlik katsayısı

d_p : Etkili çelik sac alanı tarafsız ekseninin döşeme üst kotuna uzaklığı

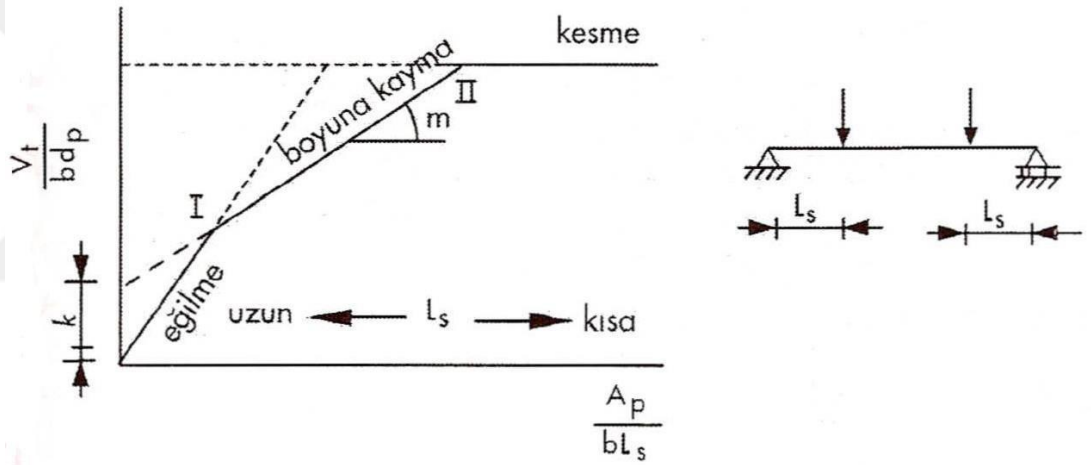
f_{ck} : Betonun karakteristik basınç dayanımı

γ_c : Beton için malzeme güvenlik katsayısı

Boyuna Kayma Dayanımı Kontrolü

Boyuna kayma dayanımı, çelik sac yüzeyinde oluşturulan çıkıntılara, ilave donatı veya açıklık uçlarına yerleştirilen bağlantı araçlarına veya çelik sac ve beton arasındaki doğal aderansa bağlıdır. Bu bağlantıların dayanımları sadece testlerle belirlenmektedir.

Testlerde ortaya çıkabilecek mümkün göçme değerleri Şekil 4.5’de gösterilmektedir, fakat bu testlerin amacı boyuna kayma dayanımını belirlemek olduğundan sonuçların Şekil 4.3’de gösterilen I-II bölgesinde toplanması istenir. Boyuna kayma göçmelerinin tipik işareti çelik sac ve beton arasında test numunesinin uçlarında ortaya çıkan uç kaymasıdır.



Şekil 4.5. Göçme biçimleri

Bu kontrol döşemede aderans göçmesi olup olmayacağını gösterir. Eğer boyuna kayma (aderans) göçmesi ihtimali varsa I kesitindeki eğilme dayanımına ulaşılmayabilir.

Kullanma Sınır Durumu

Kompozit döşemelerde birkaç kullanma sınır durumu vardır (Yorgun 2005).

- Betonun Çatlaması: Normal olarak iç mesnetler civarında beton çatladığından minimum donatı yerleştirmek gereklidir.

- **Sehim:** Pozitif momentler bölgesinde maksimum sehim kontrolüdür.
- **Uç kayması:** Döşeme kenarında beton döşeme ve çelik sac arasında oluşabilecek kaymanın kontrolüdür.
- **Titreşim:** Genel olarak sadece ağır makineler veya kaldırma araçlarından dolayı ortaya çıkar. Ofis binalarında titreşim sadece çok büyük açıklıklarda insanların yürümesiyle ortaya çıkabilir. Yönetmeliklerde titreşimleri sınırlamak için belirli döşeme derinliği/ açıklık oranları önerilmektedir.

Sehim Kontrolü

Kompozit döşemenin kullanımıyla ilgili olarak sehimler sınır değerleri aşamaz. Eğer kompozit döşeminin narinliği (açıklık/etkili derinlik) Eurocode 2’de verilen sınır değerleri aşmıyorsa, sehim kontrolü gerekli değildir. Bir doğrultuda sürekli döşemeler için bu sınır;

$$L/d_p \leq 32 \quad (4.16)$$

olarak verilmektedir.

Eğer bu oran aşıyorsa, aşağıdaki kontroller yapılmalıdır;

$$\delta_{max} = \delta_{v,g} + \delta_{v,q} \leq L/250 \quad (4.17)$$

$$\delta_2 = \delta_{v,q} \leq L/300 \quad (4.18)$$

L : Kompozit döşeme açıklığı

δ_{max} : Döşemenin toplam sehim

$\delta_{v,g}$: Döşeme toplam ağırlığındaki sehim

$\delta_{v,q}$: Uzun süreli değişken yükleme altında sehimdir.

Çatlak Genişliği Formülü

Normal koşullarda, mesnetlere yerleştirilen minimum donatı yeterlidir. Zararlı fiziksel ve kimyasal çevre koşulları etkisi bulunmadığı, çatlaklardan başka hasar olmadığı, döşemenin sudan korunması gerekmediği normal koşullarda çatlaklar tolere edilebilir. Döşeme basit mesnetli kiriş serileri olarak tasarlandığında, çatlak kontrolü için donatıya gereksinim vardır ve betonlama sırasında ara destek kullanılmış ise:

$$\rho_{min} = A_s/d_{hc} = \%0.4 \quad (4.19)$$

Betonlama sırasında ara destek kullanılmamış ise:

$$\rho_{min} = \%0.2 \quad (4.20)$$

ile belirlenen minimum donatı miktarı belirlenmelidir.

4.2. Yangına Karşı Tasarımda Genel İlkeler

4.2.1. İngiliz Standartları BS 5950 Bölüm 8 (BSI 1990)

Eğilme elamanları olan kirişler için, yangına karşı dayanıklı tasarım iki yöntem sunar.

- Limit Sıcaklık Yöntemi
- Eğilme Momenti Kapasitesi Yöntemi

Çizelge 4.3. Çelik kirişlerin sıcaklık sınırlamaları

	<i>Yük oranında sınırlayıcı sıcaklıklar</i>						
	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Durum-1	520	555	585	620	660	715	N/A
Durum-2	460	510	545	590	635	690	N/A
Durum-3	590	620	650	680	725	780	880
Durum-4	540	585	625	655	700	745	811

Limit Sıcaklık Yöntemi

Yük Oranı (R)

Eğilme altındaki bir çelik kiriş için, yük oranı (R) formülü;

$$R = \frac{M_f}{M_c} \quad (4.21)$$

M_f – Yangına maruz kirişteki maksimum eğilme momenti.

M_c – Plastik momentteki eğilme.

Çelik kiriş eğilme altında burulursa, M_c ikinci bölümdeki (Denklem 1)’deki çelik kesitin plastik bükme momenti kapasitesine eşit olur.

$$M_c = M_p = P_y S \quad (4.22)$$

Yanal burulma burkulma direnci ikinci bölümdeki (Denklem 3)’e eşit olur.

$$M_b = M_p = P_b S_x \quad (4.23)$$

Kirişin limit sıcaklığı; Limit sıcaklığı – Yük oranı Çizelge 4.3’den elde edilir. (Şekil 4.6)’de Limit sıcaklıkları – Yük oranları farklı gerinim seviyelerinde, çelik kirişlerin sıcaklık düşürme mukavemeti ile karşılaştırılır. Bu yöntem uygulanırken dört durum dikkate alınmalıdır;

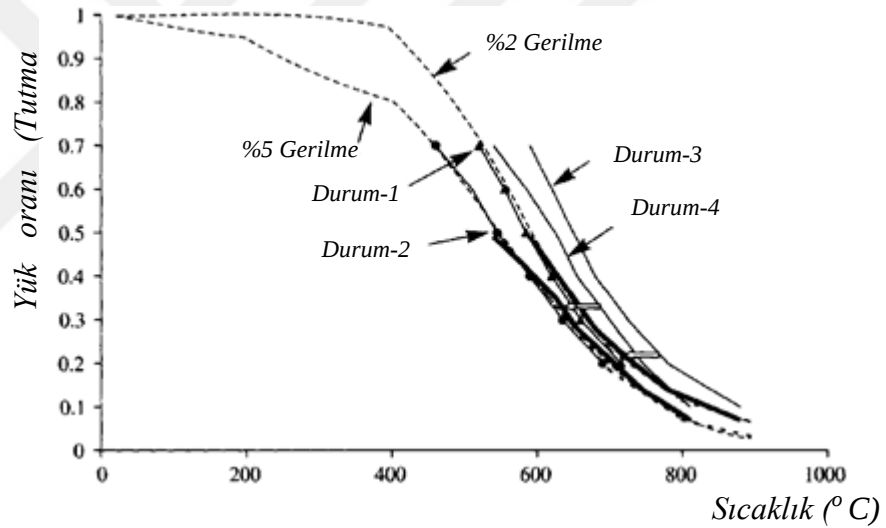
Durum – 1

Eşit derecede ısıtılan ve herhangi bir koruyucu kullanılmamış çelik kirişlerin bulunduğu durumdur. Sıcaklık – Çelik mukavemeti ilişkisinde kirişler % 2 gerinim ile çalışmaktadır.

Durum – 2

Eşit derecede ısıtılan ve koruyucu kullanılmış çelik kirişlerin bulunduğu durumdur.

Bu durum yangın koruma malzemesi sayesinde %0,5 oranında bir gerinim güvenle devam ettirebilir. Böylece Şekil 4.6’de Limit sıcaklık – Yük oranı ilişkisinden çelik kiriş %0,5 gerinimde çalışmaktadır.



Şekil 4.6. Çelik kirişin sıcaklık-yük oranını durumlarının grafiği.

Durum – 3

Üç tarafı sadece üst kısmından ısıtılan bir çelik kiriş için geçerlidir. Bu durumda başlık, başlık destekleyici ve beton döşemeler ile korunmaktadır. Dolayısıyla çelik kiriş kesitinde sıcaklık dağılımı düzensizdir. Üst başlık sıcaklığı kritik, alt başlık çok daha serindir. Kiriş üniform varsayılarak hesaplanana göre daha yüksek bir bükülme moment kapasitesine sahiptir. Alt başlık sıcaklığı aynıdır.

Durum – 4

Üç tarafı sadece üst kısmından ısıtılan bir çelik kiriş için geçerlidir. Ancak çelik kiriş büyük yangınlardan yangın koruma malzemesiyle korunmaktadır. Yük oranında (Durum–3) ve (Durum–4)’deki kirişleri, (Durum–1) ve (Durum–2) kirişlerinin 0,7 katı ile ilişkilidir. Yani bir kirişin plastik bükme moment kapasitesi üniform olmayan sıcaklık dağılımı, düzgün olmayan sıcaklık dağılımının yaklaşık 0,7 katıdır. Alt başlık sıcaklığı aynı olduğunda Şekil 4.6’de (Durum–3) ve (Durum–4) kirişlerinin yük oranları 0,7 ile çarpılarak elde edilen üniform sıcaklık dağılımına sahip koyu renkli çizgiler (Durum–1) ve (Durum–2) kirişlerine çok yakın oldukları görülmektedir.

Çizelge 4.4. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi için örnek hesaplamalar.

<i>Çelik kiriş Noktaları</i>	<i>Sıcaklık T_i (°C)</i>	<i>Bileşke kuvvet F_i $= p_y(T_i) \cdot A_i$ (kN)</i>	<i>Mesafe d_i (mm)</i>	<i>Eğilme momenti $F_i \cdot d_i$ (kN.m)</i>
<i>Üst başlık</i>	650*0,8=520	-565,81	8	-4,53
<i>Gövde 1</i>	528,13	-86,08	39,8	-3,43
<i>Gövde 2</i>	544,38	$\frac{-24,10}{55,96}$	$\frac{70,76}{94,56}$	$\frac{-1,71}{5,29}$
<i>Gövde 3</i>	560,63	73,93	135,0	9,98
<i>Gövde 4</i>	576,88	67,74	182,6	12,37
<i>Gövde 5</i>	593,13	61,56	230,2	14,17
<i>Gövde 6</i>	609,38	55,75	277,8	15,49
<i>Gövde 7</i>	625,63	50,21	325,4	16,34
<i>Gövde 8</i>	641,88	44,68	373,0	16,66
<i>Alt başlık</i>	650,0	266,16	404,8	107,74
<i>Total</i>	NA	0	NA	188,39

Limit sıcaklık yöntemi tamamlandığında yüksek sıcaklığa maruz çelik kirişlerin veriminin bu metotta deforme olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda çelik kirişin dayanım ve sertliğinde azalmalar olduğu saptanmıştır (Emre 2010) (Yorgun 2003) ve (Yorgun 2005).

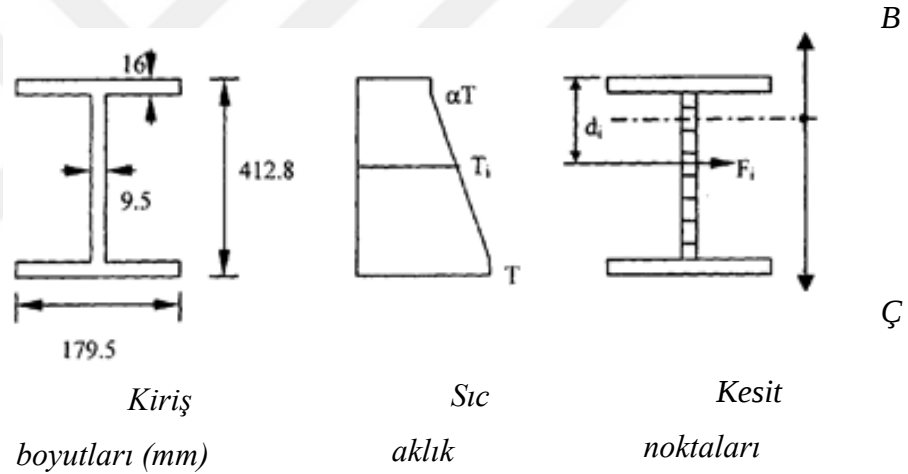
Eğilme Momenti Kapasitesi Yöntemi

Limit sıcaklık yönteminin kullanımı kolaydır, ancak çelik kiriş düzgün olmayan

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Sıcaklık dağılımına maruz ve yanal burulma burkulmadan engelleniyorsa, eğilmeyi hesaplamak için daha doğru sonuçlar verebilecek yöntem kullanmak her zaman daha yararlıdır. O nedenle bükülme için, moment kapasitesi yöntemi kullanılarak hesaplanmalar yapılmalıdır. Metodun nasıl uygulandığına bakarsak, çelik kirişin kesit alanı yaklaşık olarak aynı sıcaklıktaki birkaç dilime bölünmüştür. Enine kesitlerin plastik bükme moment kapasitesi, bu dilimlerin sıcaklıklarında indirgenen çelik mukavemetine göre hesaplanır. Bu metodu göstermek için bir örnek verilmektedir.

Kesit bilgileri ise Şekil 4.7’de verilmektedir, bu bilgiler ile Çizelge 4.4’deki formüllerle hesaplanır. Moment kapasitesi yöntemi görüldüğü üzere birçok hesaplama gerektirir. Dolayısıyla bu daha ayrıntılı yöntemi kullanmanın faydası, çelik kirişin kesitindeki düzensiz sıcaklık dağılımının olası yararlarını keşfetmektir. Özellikle korumasız çelik kirişlerin kullanımının doğruluğu için %2 çelik gerinim kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. Çizelge 4’deki hesaplamalar için veriler.

4.2.2. Limit Sıcaklık Yöntemi ile Moment Kapasitesi Yönteminin Karşılaştırması

Şekil 4.7’da boyutları (406 x 178 x 74)’lük bir kiriş boyutu göz önüne alındığında, plastik bükme momentini hesaplamak için moment kapasitesi yöntemi kullanılarak yük oranları 0.3, 0.5 ve 0.7 için kesitle yangın etki kapasitesi hesaplanır. Limit sıcaklık yönteminde kirişin alt başlık sıcaklığını sınırlamadan elde edilen değere eşittir. Farklı düzensiz sıcaklık dağılımları Şekil 4.7’da gösterilmiştir. S275 çelik kullanılmıştır.

Bir örnek yapacak olursak;

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Yük oranı (R) - 0,5

Sıcaklık gradyan faktörü (α) - 0,8

- i. Limit sıcaklık yöntemi; Oda sıcaklığında kesitin plastik moment kapasitesini ikinci bölümdeki (Denklem 1)'den hesaplayalım.

$$M_c = P_b S = 0,275 \times 1481,4 = 408,1 \text{ kN.m}$$

$$R = 0,5 \Rightarrow M_c = 0,5 \times 408,1 = 204,05 \text{ kN.m}$$

- ii. Moment kapasitesi yöntemi; Çizelge 4.4 ve Durum 3'den alınacak değerlerden örnek yapacak olursak, 0,5'lik bir yük oranında kirişin limit sıcaklığı 650° C'dir. Bu daha başlık sıcaklığıdır. Metodu uygulamak için kiriş kesitini üst başlık, alt başlık ve gövdesini de sekiz parçaya bölerek toplam on parça elde edilir. Her parçanın sabit bir sıcaklığa sahip olduğunu kabul edelim ve kesitin merkezindeki değerlerle hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.4'de sıralanmıştır. Kesit deki her bir kısmı için, merkez sıcaklık (T_i), sonuç kuvveti (F_i), kuvvetler arası mesafe (d_i) ve kesitin plastik bükme moment kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Plastik nötr eksen ikinci gövdede olduğu için ve üst kısım basınç ile alt kısım çekme olarak iki katmana ayrılmıştır.

Çizelge 4.5. Plastik eğilme moment kapasitesi yönteminin kullanımı ve hesaplanması.

Yük Oranı (R)	T_{lim} (°C)	Limit sıcaklık yöntemi	$\alpha = 0.6$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 0.8$	$\alpha = 1.0$
0.3	725	122.43	145.34 ($\Delta T = 290$ °C)	130.85 ($\Delta T = 218$ °C)	116.74 ($\Delta T = 145$ °C)	79.58 (üniform)
0.5	650	204.05	217.18 ($\Delta T = 260$ °C)	205.95 ($\Delta T = 195$ °C)	188.39 ($\Delta T = 130$ °C)	137.53 (üniform)
0.7	590	285.67	282.63 ($\Delta T = 236$ °C)	274.41 ($\Delta T = 177$ °C)	260.75 ($\Delta T = 118$ °C)	205.93 (üniform)

Aynı prosedür kullanılarak, farklı yük oranı kombinasyonları ve sıcaklık gradyan faktörü için kesitin plastik bükme moment kapasitesi hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 4.5'de

detaylı görülmektedir. $\alpha = 0.6, 0.7$ ve 0.8 'deki üç sıcaklık derecesi, üç tarafı yangına maruz kalan bir çelik kirişin düzgün olmayan sıcaklık dağılımına sahip olduğunun göstergesidir. Üst başlık ise beton döşeme levhası ile korunur. Alt başlık limit sıcaklık derecesinde, sıcaklık farkı üst ve alt başlıklar arasında yaklaşık $100^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Aşağıdaki gözlemler Çizelge 4.5'deki sonuçlar neticesinde saptanmıştır.

- i. Bir çelik kirişte düzgün olmayan sıcaklık dağılımları altında, kiriş bükme moment kapasitesi, kirişin üst başlığındaki sıcaklığa karşı çokta hassas değildir.
- ii. Limit sıcaklık yönteminden elde edilen sonuçlar tüm yük oranları için bükme moment kapasitesi içinde aynıdır.
- iii. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi, alt başlık ve üst başlık arasında yaklaşık 250°C veya daha yüksek sıcaklık farkı verecek şekilde sıcaklık eğimi yüksek olduğunda kirişi arttırılmış bir bükme momenti kapasitesi sağlamak için kullanılabilir.

4.2.3. Eurocode 3 Bölüm 1.2 Metodu (CEN 2005a)

Plastik Eğilme Momenti Kapasitesi

Eurocode 3, bir çeliğin plastik bükme moment kapasitesini hesaplamak için iki yöntem sunar. Birinci yöntem Bölüm 4.2.1 kısımdaki bükme momenti kapasitesi yöntemi ile aynıdır. Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Bu yöntemdeki hesaplama adımları, Eurocode 3 kullanımı çok daha basit alternatif bir yöntem sunar. Bu basit yöntemde bir kirişin plastik bükme momenti kapasitesi şöyledir;

$$M_{p,fi} = k_{y,T} M_p / (k_1 k_2) \quad (4.24)$$

Formülde;

M_p – Ortamdaki kesitin bükme moment kapasitesidir.

$k_{y,T}$ – Çelik kirişin alt başlıktaki, maksimum sıcaklıktaki etkin akma mukavemetindeki azalma faktörüdür.

$k_{y,T}M_P$ – Çelik kirişin üniform bir T sıcaklıkta plastik bükme moment kapasitesini azaltan faktördür.

k_1, k_2 – Çelik kirişte, düzensiz sıcaklıklar da hesaba dahil edilen faktörlerdir.

Önceki örnek için, $k_1=0.7$ ve $k_2=1.0$ alınır. Üniform sıcaklık etkindir. M_p değerlerinin (113.69kN.m, 196.47kN.m ve 294.19kN.m) sırasıyla $\alpha = 0.7$ 'ye bölünmesiyle sırasıyla üç yük oranı elde edilir. Bu değerlerin bükme momenti kapasitesi yönteminden hesaplanıp, oluşturulan Çizelge 4.5 sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle, üniform olmayan sıcaklık dağılımlarına sahip çelik kirişler için, limit sıcaklık yöntemi, her iki koddaki bükme momenti kapasitesi yöntemi ve Eurocode 3'teki basit alternatif yöntem, kesitin plastik bükme momenti kapasitesi için çok benzer sonuçlar verir. Bununla birlikte, eğilme momenti kapasitesi yöntemi, uygulamak için en zahmetli yöntemdir. Bu nedenle, bükme momenti kapasite metodunu kullanmak için güçlü bir gerekçe olmadıkça (örneğin, yangından korunmanın ortadan kaldırılmasını haklı kılmak için), limit sıcaklık yöntemi ve Eurocode 3'te basit alternatif yöntem tercih edilir.

Çelik Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulması

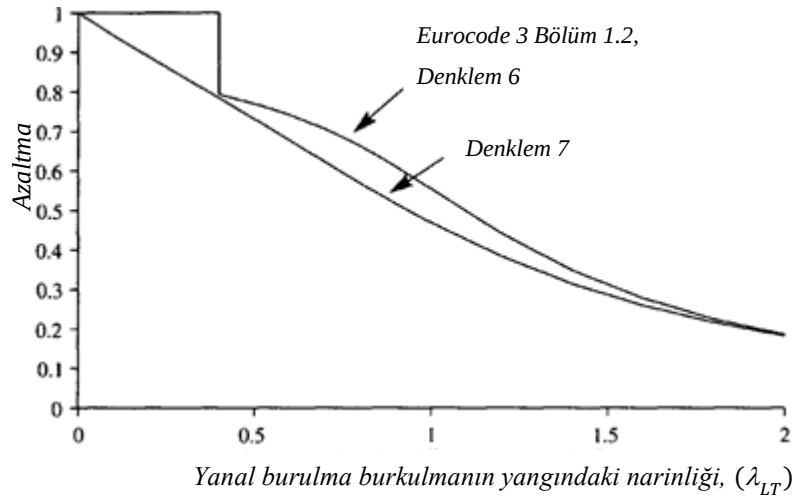
Çelik kirişin eğilme direnci genellikle kesitin plastik bükme momenti kapasitesi tarafından kontrol edilmesine rağmen, bazen yangın anındaki bir çelik kirişin yanal burulma burkulma direncini değerlendirmek gerekir. Eurocode 3' te yanal burulma burkulma direncini değerlendirmek gerekir. Eurocode 3' te yanal burulma burkulma direnci çevre sıcaklığında olduğu gibi hesaplanır. Yüksek sıcaklıklardaki çelik kirişin narinlik derecesi aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\bar{\lambda}_{LT,fi} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,T,com}}{k_{E,T,com}}} \quad (4.25)$$

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 4.6. Yanal burulma burkulma için İngiliz Standardı (BSI 1990) ve Eurocode 3 (CEN 2005a) hesaplamalarının karşılaştırılması.

		0.208(20)		0.411(40)		0.606(60)		0.790(80)		0.962(100)		1.342(150)	
		BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC
0.7	(1)	0.7	0.716	0.698	0.556	0.606	0.507	0.5	0.435	0.412	0.354	0.265	0.213
	(2)		0.716		0.554		0.502		0.426		0.343		0.204
	(3)		0.716		0.553		0.498		0.418		0.333		0.197
	(4)	0.7	0.718	0.698	0.558	0.606	0.508	0.5	0.435	0.412	0.353	0.265	0.212
	(5)		0.718		0.554		0.499		0.420		0.334		0.197
	(6)	0.7	-	0.657	-	0.534	-	0.419	-	0.329	-	0.199	-
0.5	(1)	0.5	0.5	0.498	0.386	0.427	0.348	0.357	0.293	0.294	0.234	0.189	0.138
	(2)		0.5		0.389		0.355		0.306		0.249		0.150
	(3)		0.5		0.386		0.348		0.292		0.233		0.137
	(4)	0.5	0.517	0.498	0.398	0.427	0.358	0.357	0.300	0.294	0.238	0.189	0.140
	(5)		0.517		0.399		0.359		0.302		0.241		0.142
	(6)	0.5	-	0.469	-	0.381	-	0.299	-	0.235	-	0.142	-
0.3	(1)	0.3	0.191	0.199	0.149	0.171	0.135	0.143	0.116	0.118	0.094	0.076	0.560
	(2)		191		0.147		0.131		0.108		0.085		0.049
	(3)		0.191		0.148		0.133		0.112		0.089		0.053
	(4)	0.3	0.212	0.199	0.161	0.171	0.141	0.143	0.113	0.118	0.087	0.076	0.050
	(5)		0.212		0.164		0.147		0.124		0.099		0.058
	(6)	0.3	-	0.188	-	0.152	-	0.120	-	0.094	-	0.057	-



Şekil 4.8. Çeliğin yangındaki mukavemet azaltma faktörüne göre narinliği.

$\bar{\lambda}_{LT}$ – Çevre sıcaklığında kiriş yanal burulma burkulma narinliğidir. (Eurocode 3 Part 1.1 (CEN 2005b) kullanılarak hesaplanmıştır.)

$k_{y,T,com}$ ve $k_{E,T,com}$ üst başlıktaki basınç sıcaklığındaki çelik mukavemet ve elastik modülü için kalıcı faktörlerdir.

Üst başlıktaki basınç davranışı, bir kirişin yanal burulma burkulması kritik olduğu için, yüksek sıcaklıklarda kiriş narinliklerini değiştirmek için üst başlık basınç sıcaklığının kullanılmalıdır. Ancak, daha sonra gösterileceği gibi Çizelge 4.6 ve Eşitlik (4.25) için kullanılması beklenen sonuçlarda farklılıklara yol açabilir. Yangından dolayı değişmiş kiriş narinliklerini kullanarak, mukavemet azaltma faktörü;

$$\chi_{kt,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,fi} + \sqrt{\phi_{LT,fi}^2 - \bar{\lambda}_{LT,fi}^2}} \quad (4.26)$$

$$\phi_{LT,fi} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,fi} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,fi}^2] \quad (4.27)$$

α_{LT} başlangıçtaki hataların etkisini açıklayan bir sabittir ve $\alpha_{LT} = 0,21$

$$M_{b,fi} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} M_{p,fi} \quad (4.28)$$

$M_{b,fi}$ – Yangında kiriş kesitinin yanal burulma burkulma direnci.

Eşitlik (4.24) kullanılarak veya moment kapasitesi yöntemi ile hesaplanır. Eşitlik (4.28)'deki değiştirme faktörü olan 1,2 yangın için düzeltme faktörüdür. Birtakım etkilere izin vermek için kullanılır. Örneğin sıcaklık artış ise gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Şekil 4.8) artık doğrusal değildir. Kiriş narinliği($\bar{\lambda}_{LT,fi}$), 0,4'den az ise yanal burulma burkulmadan söz edilemez. Eşitlik (4.24) ve (4.25) kirişin alt başlık sıcaklığını, kesitin plastik bükme momenti kapasitesini ve üst başlık sıcaklığını, kirişin narinlik derecesini belirler. Böylece, çelik kirişin alt ve üst başlık sıcaklıkları verilirse yanal burulma burkulma direnci için hesaplamalar yapılabilir. Bu yöntemle çelik sıcaklıklar tahmin edilir ve kirişin yanal burulma burkulma direnci hesaplanır. Ardından sıcaklık farkı kabul

edilebilir derecede küçük olana kadar, sonraki uygun sıcaklık değerlerini belirlemek için bu yangındaki uygulanan yüklerle karşılaştırılır (Wang 2002).

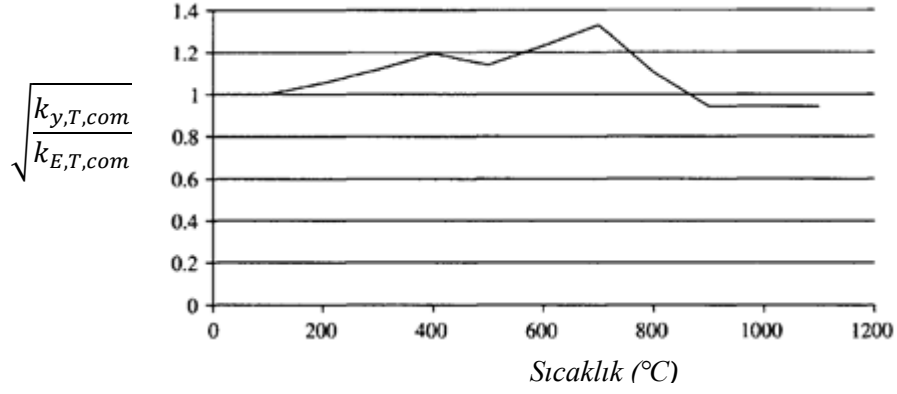
Yanal Burulma Burkulma İçin İngiliz Standardı (BS 5950) İle Eurocode 3 Karşılaştırması

Kiriş yangın sıcaklıklarının hesaplanmaları limit sıcaklık yöntemi kullanımı Eurocode 3'deki hesaplardan daha kolaydır. Karşılaştırılması Çizelge 4.6'da kesiti 406x128x74 UB olan çelik kirişin yanal burulma burkulma direncini verir. Bu karşılaştırmada dikkate alınan değişkenler kiriş yanal burulma burkulma narinliği, alt başlık ve üst başlık sıcaklığıdır. Üç kiriş için alt başlık sıcaklığı, (Bölüm 3)'deki limit sıcaklık yöntemi kullanılarak 0.7, 0.5 ve 0.3 yük oranlarından elde edilmiştir. Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından daha düşüktür. (0°C, 150°C ve 250°C aradaki oluşabilecek farklar).

0°C'lik bir fark kirişte üniform bir sıcaklık verimi sağlar. 150°C ve 250°C arasındaki farklar, bir kirişin enine kesitindeki eşit olmayan sıcaklık dağılımının olası iki uç noktasıdır. Çizelge 4.6 yüksek sıcaklıktaki bir kirişin yanal burulma burkulma ve eğilme momenti direncini vermektedir, ortam sıcaklığında kesitin plastik bükme momenti direncine getirir. Her yük oranı için aşağıdaki altı durum göz önüne alınmıştır:

Durum – 1

Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından daha düşüktür, 250°C kadar düşürür ve Eurocode 3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.25)'ten elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulma modifikasyon faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.

Durum – 2

Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından 150°C daha düşüktür ve EC3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.25)'ten elde edilmiştir.

$$\bar{\lambda}_{LT,fi} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,T,com}}{k_{E,T,com}}} \quad (4.29)$$

Durum – 3

Kiriş üniform olmayan bir şekilde ısıtılır ve kiriş narinliği, Denklem (4.25) yerine ortam sıcaklığı değerinin 1,2 katı ile çarpılarak elde edilir.

Durum – 4

Kiriş eşit şekilde ısıtılır ve Eurocode 3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.25)'ten elde edilir.

Durum – 5

Kiriş üniform şekilde ısıtılır ve kiriş narinliği, Denklem (4.25) yerine ortam sıcaklığı değerinin 1,2 katı ile çarpılarak elde edilir.

Durum – 6

Hesaplamalar Bölüm 4.2 denklemlerini takip eder; ancak, yangında kiriş narinlik derecesi, ortam sıcaklığında kiriş narinlik derecesinin 1.2 katına çıkarılarak elde edilir. 1-

5 arasındaki durumlarda, Bölüm 4.2 hesaplamaları için kiriş narinlik derecesi değişmemiştir. Bölüm 4.2 hesaplamaları sıcaklığa bağlı değildir ve kiriş hassasiyeti değişmeden, Bölüm 3 hesaplamaları için 1-5 arasındaki durumlar için aynı değer elde edilir. Çizelge 4.6'da sunulan sonuçlardan bazı gözlemler yapılabilir:

- Alt başlık sıcaklığında, Eurocode 3'den (Durum 1) ve (Durum 2) gelen sonuçlar, kirişin üst (basınç) başlığındaki sıcaklıklara karşı hassaslığı, yüksek kiriş narinlik ve düşük yük oranı hariçtir.
- Eurocode 3 hesaplamasında, kiriş narinliği Denklem (4.25) kullanılarak değiştirilirse, aynı alt başlık sıcaklığında daha yüksek bir üst başlık sıcaklığı, kirişin yanal burulma burkulma direnci artışına Çizelge 4.6'daki sonuçlara neden olabilir. Bu, beklenilenle çelişkilidir ve tamamen, kiriş yanal burulma burkulma narinliğini değiştirmek için sadece üst (basınç) başlık sıcaklığının kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.9'da gösterildiği gibi, bu modifikasyon faktörü sıcaklık artışı ile monoton olarak artmaz. 400 °C ve 500 °C 'den daha büyük 700 °C arasındaki sıcaklıklarda, bu modifikasyon faktörü sıcaklık arttıkça azalır. Böylece, eğer üst başlık sıcaklığı yukarıdaki bölgelerde ise, daha yüksek bir üst başlık sıcaklığı Denklem (4.25) kullanılarak azaltılmış kiriş narinliği verecektir. Kirişin alt başlık sıcaklığı ve plastik bükülme momenti kapasitesi aynı olduğunda, kirişin yanal burulma burkulma direnci üst başlık sıcaklığından daha yüksektir.

- Şekil 4.9'da gösterilen 300°C-800°C gerçekçilik bölgelerindeki sıcaklıklarda, Denklem (4.25)'te görülen narinlik modifikasyon faktörünün 1,2 sabitine çok yakın olduğunu göstermektedir. Denklem (4.25)'te değiştirme faktörü yerine bu sabit kullanılarak, (Durum 3)'ün sonuçlarının üniform olmayan ısıtma için (Durum 1), (Durum 2) ve (Durum 5)'in olguların sonuçlarını karşılaştırarak nihai sonuçlarda çok az fark olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 1,2 sabitini kullanmanın yararı, hesaplama işleminin basitleştirmesi ve yinelemelerin ortadan kalkmasıdır.
- Kesitin plastik verimi başarısızlığı yönettiği düşük kiriş açıklığında ($\bar{\lambda}_{LT} = 0.208$ veya $\lambda_{LT} = 20$), İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 çok benzer sonuçlar verir. Yanal burulma burkulmanın daha önemli hale geldiği daha narin kirişler için İngiliz Standardı (BS 5950) Eurocode 3' den daha yüksek bir direnç verir. Ortam sıcaklığındaki farka ilaveten, yangında bu iki yöntem arasındaki farka iki faktör katkıda bulunur:

(1) İngiliz Standardı (BS 5950)'da, kiriş narinliği yüksek sıcaklıklarda artmamaktadır;

(2) Eşitlik (4.28)'de Eurocode 3'teki direnç tarafında 1,2'lik bir azalma faktörü uygulanır. Bu örnekte incelenen kiriş için tesadüfen, ortam sıcaklığında ve yüksek narinlikte ($\bar{\lambda}_{LT} > 0.79$ veya $\lambda_{LT} > 80$), Eurocode 3 (Bölüm 2.1) kullanılarak hesaplanan kirişin yanal burulma burkulma direnci, BS 5950 Bölüm 1 kullanılarak hesaplanan yaklaşık 1,2 kat daha fazladır

Bu, Eşitlik (4.28)'de azalma faktörü 1,2 olan kullanmanın etkisini iptal eder. Bu nedenle, farklı bir narinliğin kullanılması,

İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 arasındaki hesaplanan sonuçların farklılığının tek nedeni haline gelir. İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 hesaplamalarında aynı kiriş narinliği kullanıldığında Durum 6 ile Çizelge 4.3'deki Eurocode 3'teki Durum 1 ile Durum 5 arasındaki sonuçların karşılaştırılması, her iki yöntem de çok benzer sonuçlar verir. Bu karşılaştırmalı çalışmadan, İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3'ün yangında bir kirişin yanal burulma burkulma direnci için benzer sonuçlar verdiği sonucuna varılabilir. İki yöntemi kullanarak öngörülen sonuçların farkı, yalnızca yükseltilmiş sıcaklıklarda kiriş için farklı yanal burulma burkulma direnç değerlerini kullanmasıdır. İngiliz Standardı (BS 5950)'deki yanal burulma burkulma narinliğinin, yüksek sıcaklığa maruz çelikteki mukavemet ve sertlikteki değişiklikleri yansıtacak şekilde değiştirilmesi uygun görünüyor. Yaklaşık olarak, yangında kiriş narinliği ortam sıcaklığından 1,2 kat daha fazladır (Wang 2002).

4.3. Eurocode 3 Yönteminde Yapılan Değişiklikler

İngiliz Standardı (BS 5950) ve EC3 (Eurocode 3) hesaplamalarında ortam sıcaklığı tasarım metodu korunur.

Kastedilen yükleme, çelik gerilme-gerinme ilişkisinin doğrusal elastik-plastik olmasıdır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda, çeliğin gerilme-gerinme ilişkisi son derece doğrusal değildir ve uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak kirişin teğet sertliği başlangıç değerinden çok daha düşük olabilir. Kirişin narinlik derecesini üç bölüme ayrılırsa, yüksek kiriş narinliğiyle uygulanan gerilme genellikle düşüktür ve kiriş teğet sertliği başlangıç değerine yakındır. Çelik veriminin tasarımı yönettiği durumlarda düşük narinlikte bir kiriş için kirişin eğilme direnci, teğet sertliğine duyarlı değildir. Bununla birlikte, uygulanan gerilmenin ve yanal burulma burkulmanın önemli olduğu, ortam

sıcaklığındaki hassas bir kiriş için $(\bar{\lambda}_{LT,fi} - 1)$ tasarım yaklaşımı ve yanal burulma burkulma direncinin büyük olacağı yangında tahmin edilebilir. Eurocode 3, bunu hesaba katmak için Eşitlik (4.28)'de 1,2 sabiti getirirse de, bu yaklaşım, yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulmanın karmaşık davranışını yansıtmaz. Yangına maruz çelik kirişlerin yanal burulma burkulmaları incelendiğinde Bailey vd. (1996) ve Vila Real ve Franssen (2000), sonlu elemanlar teknikleri kullanılarak her iki araştırmacı da aynı sonuca varmışlardır.

Eurocode 3 yaklaşımındaki bir değişiklik olarak, Vila Real ve Franssen (2000) yanal burulma burkulma için mukavemet azaltma faktörünü hesaplamak için alternatif bir yöntem önerdi şöyle ki, Eşitlik (4.28) kullanılması yerine, yanal burulma burkulma direnci için değişime uğramış güç azaltma faktörü kullanılmıştır,

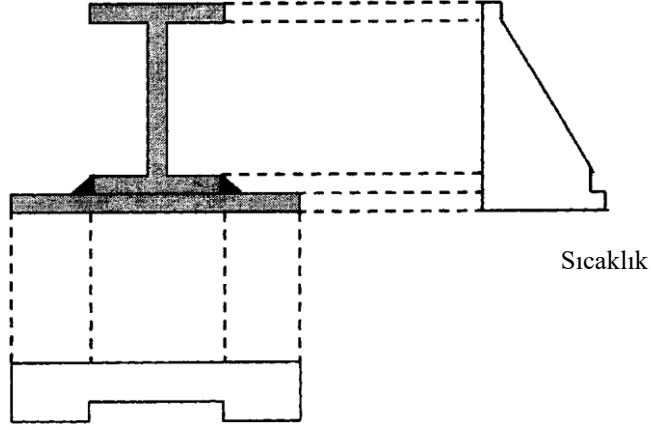
$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,fi} + \sqrt{\phi_{LT,fi}^2 - \bar{\lambda}_{LT,fi}^2}} \quad (4.30)$$

$$\phi_{LT,fi} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,fi} + (\bar{\lambda}_{LT,fi})^2] \quad (4.31)$$

Eşitlik (4.30) ve (4.31)'de $\alpha = \beta \varepsilon$ bir kusur faktörü, $\beta = 0,65$ şiddet faktörü, eğri uydurma ile sunulan tahminler sayısal sonuçlara göre elde edilmiştir. Bilgisayar programı SAFIR kullanılarak, Eşitlik (4.28) ve Eşitlik (4.30) ve (4.31) kullanılarak elde edilen indirgeme faktörleri amaçlandığı gibi, yaklaşım Vila Real ve Franssen, hassas kirişler için daha düşük bir narinlikle, yanal burulma burkulma direnci sağlar.

Vila Real ve Franssen tarafından önerilen değişiklik iki avantaja sahiptir:

- (1) Eurocode 3'deki aşırı tahmini ortadan kaldırır;
- (2) Adım değişimini ortadan kaldırır, $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0,4$



Şekil 4.10. İnce döşemeli çelik kirişteki sıcaklık dağılım gösterimi.

4.4. Çelik Kirişlerde Sıcaklık Hesaplamaları

Önceki denklemlerde özetlendiği gibi hesaplamaları yapmak için, çelik kirişteki sıcaklıklar hakkında mevcut bilgilerin olması gerekir. Korumasız bir çelik kiriş veya yaklaşık olarak eşit sıcaklıktaki korunmuş bir çelik kiriş için aşağıda gösterilen şekilde Denklem (4.32) ve (4.33) kullanılabilir. Yangın koşulları altında sayısal yöntemler kullanılmalıdır.

Korumasız Çelik Yapı

$$\Delta T_{st} = k_{sh} \frac{A_m/V}{\rho_{st} C_{st}} \frac{A_s}{V} \dot{h}_{net} \Delta t \quad (4.32)$$

k_{sh} - Gölgeleme etkisi için düzeltme faktörü

(A_m/V) – Kesit faktörü (1/m)

A_m – Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı (m²/m)

V – Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m³/m)

C_{st} – Çeliğin özgül ısısı (J/kgK)

ρ_{st} – Çeliğin birim hacim kütlesi

$\dot{h}_{net}$ – Birim alana düşen net ısı akısının tasarım değeri (W/m²)

Δt – Zaman adımı (sn)

- Standart yangın (ISO 834) etkisi altında I – kesitlerde gölge etkisi için düzeltme faktörü; $k_{sh} = 0,9[A_m/V]_b/[A_m/V]$
- Diğer tüm durumlarda; $k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V]$
- $h_{net} = \varepsilon_f \varepsilon_m$ $\varepsilon_f = 1,0$ alınarak ε_m değeri EN 1991-1-2'den (CEN 2002) alınmalıdır.
- Δt değeri 5 saniyeden fazla alınmamalıdır.

Koruma Malzemesi ile Yalıtılmış Çelik Yapı

$$\Delta T_{st} = \frac{\lambda_p A_p/V (T_{fi} - T_{st})}{d_p \rho_{st} C_{st} (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta T_{fi} \quad (4.33)$$

$$\phi = \frac{C_p \rho_p}{C_{st} \rho_{st}} d_p A_p/V \quad (4.34)$$

A_p/V – Yangından koruma malzemesi ile korunmuş çelik yapı elemanlarının kesit faktörü

A_p – Birim uzunluktaki bir yapı elemanı için kullanılan yangından koruma malzemesinin alanı (m^2/m),

V – Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m^3/m)

C_p – Yangından koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı (J/kgK)

d_p – Yangından koruma malzemesinin kalınlığı (m)

T_{fi} – Yangın sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_s – Çelik sıcaklığı ($^{\circ}C$)

$\Delta T_{fi} - \Delta t$ süresince ortam yangın sıcaklığındaki artış (K)

λ_p – Yangından koruma sisteminin (malzemenin) ısı iletkenliği (W/mK)

ρ_p – Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi (kg/m^3)

4.5. Malzemelerin Isıl (Termal) Özellikleri

Isı transfer analizlerinin yapılabilmesi için kompozit döşemelerde kullanılan malzemelerin ısı (termal) özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunlar; ısı iletkenlik,

ışınım (radyasyon), özgül ısı ve yoğunluktur. Yoğunluk çelik sıcaklığından bağımsız olarak alınabilir ($\rho_{st} = 7850 \text{ kg/m}^3$) (CEN 2005a).

Çelik Özellikleri

- **Isıl iletkenlik** ($\lambda_{st} - W/mK$)

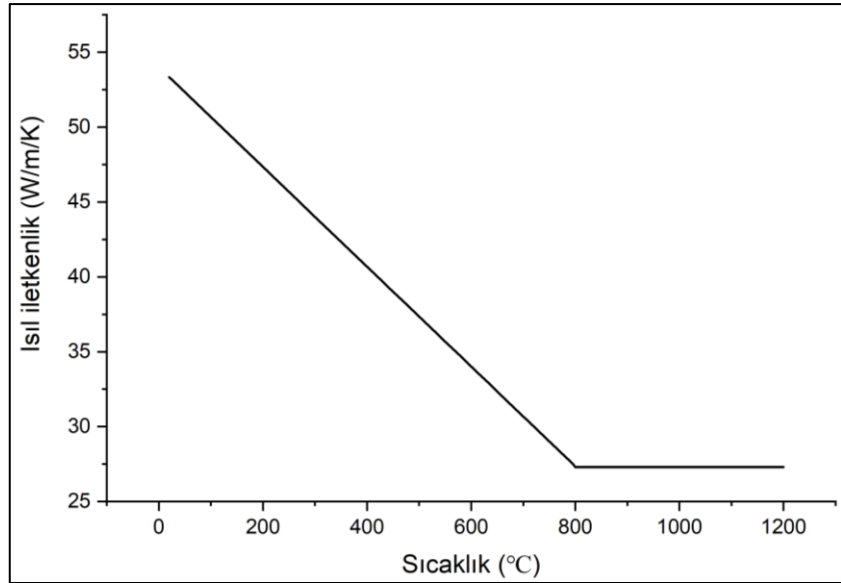
Çeliğin ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 4.11 bu değişimi göstermektedir.

$$20^\circ\text{C} \leq T_{st} < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{st} = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_{st} \quad (4.35)$$

$$T_{st} \geq 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{st} = 27,3 \quad (4.36)$$



Şekil 4.11. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi

- **Özgül Isı (C_{st} – J/kgK)**

Çeliğin özgül ısısı sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmektedir ve değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 600^{\circ}\text{C} \quad (4.37)$$

$$C_{st} = 425 + 7.73 \times 10^{-1}T_{st} - 1.69 \times 10^{-3}T_{st}^2 + 2.22 \times 10^{-6}T_{st}^3$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 735^{\circ}\text{C} \quad (4.38)$$

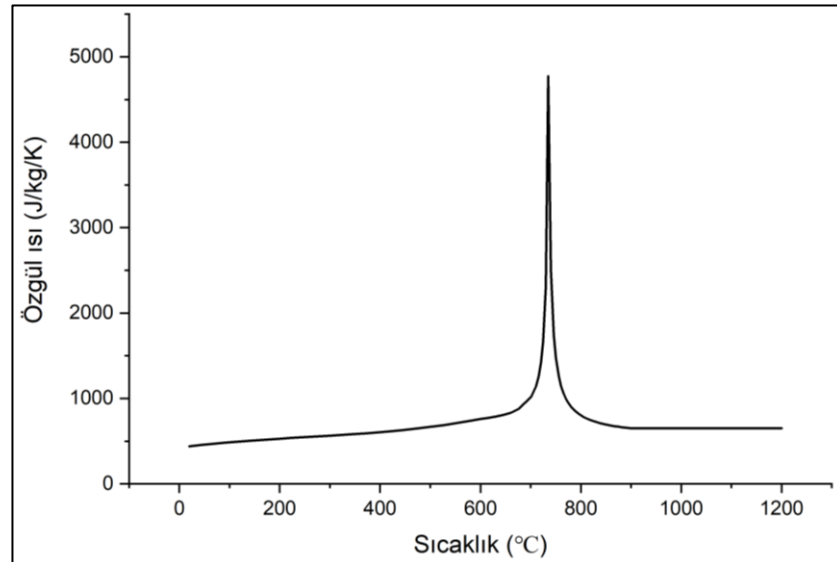
$$C_{st} = 666 + \frac{13002}{738 - T_{st}}$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 900^{\circ}\text{C} \quad (4.39)$$

$$C_{st} = 545 + \frac{17820}{T_{st} - 731}$$

$$900^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 1200^{\circ}\text{C} \quad (4.40)$$

$$C_{st} = 650$$

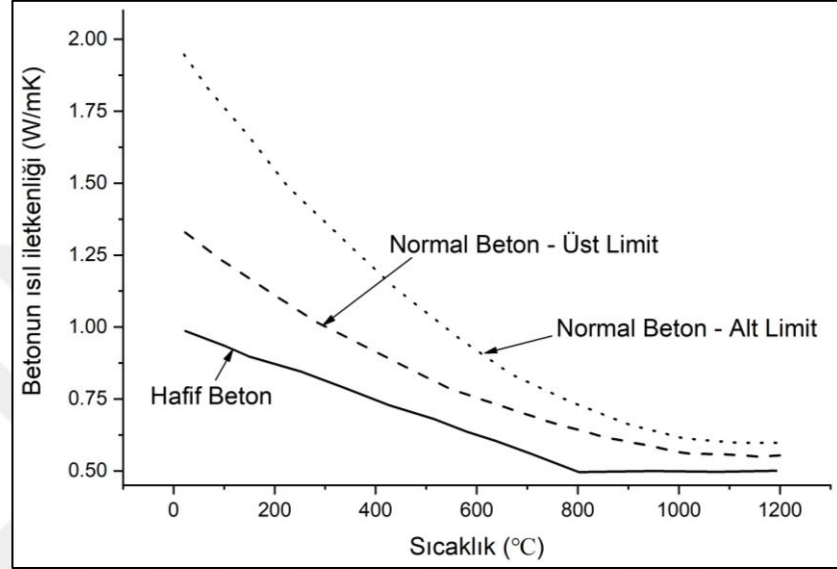


Şekil 4.12. Çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi

Beton Özellikleri

- **Isıl iletkenlik** ($\lambda_c - W/mK$)

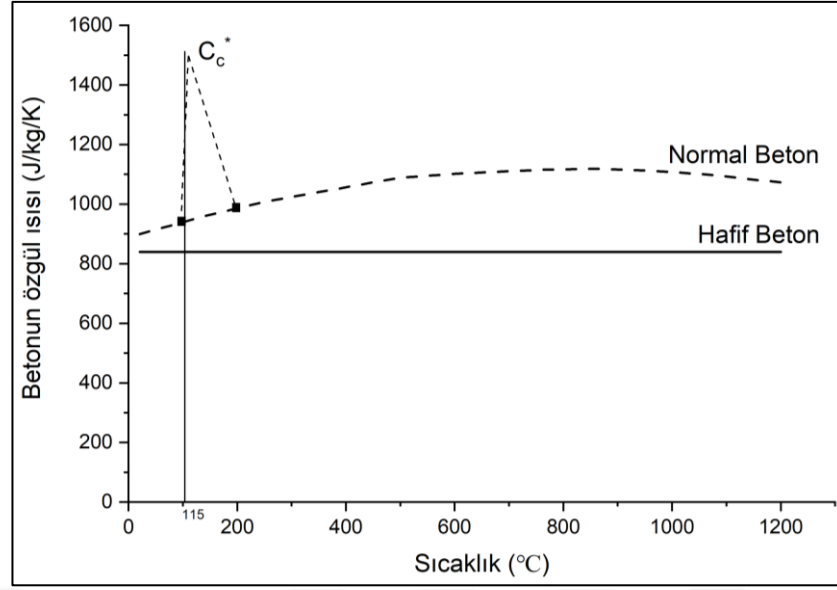
CEN 2005c’de belirtilen beton sınıfına göre (normal veya hafif beton) betonun ısı iletkenliği Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Betonun ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi

- **Özgül ısı** ($C_c - J/kgK$)

Şekil 4.14’de beton malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi gösterilmiştir (CEN 2005c).

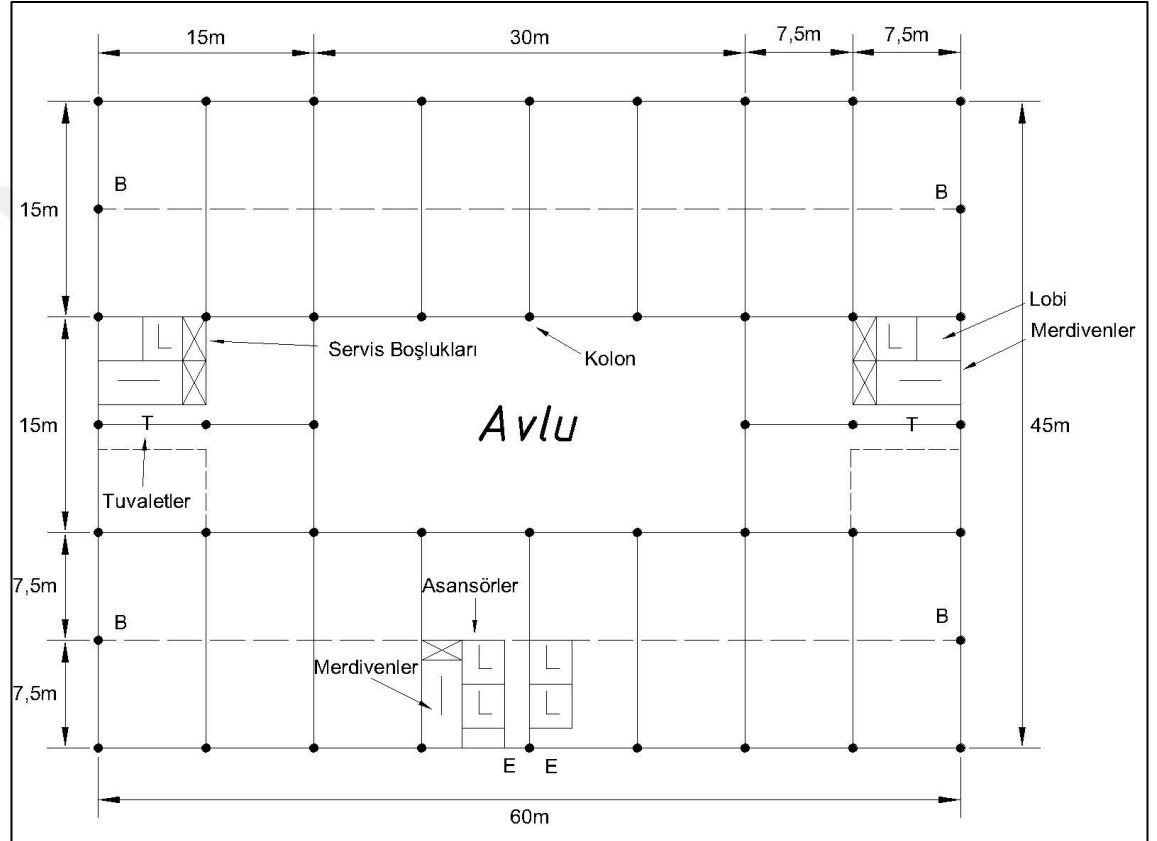


Şekil 4.14. Betonun sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1. Matematiksel Model Özellikleri

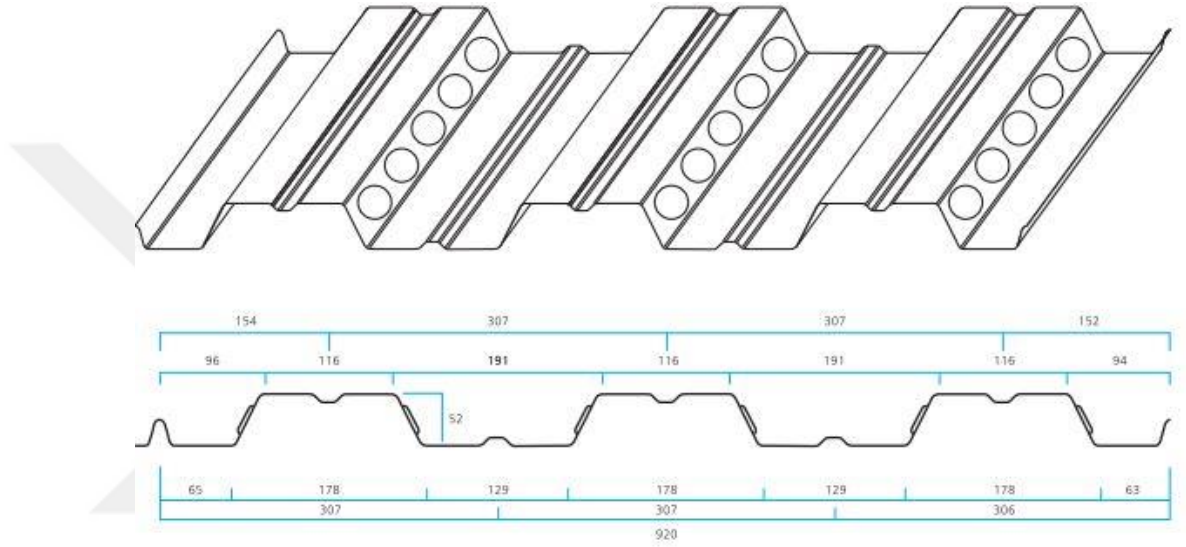
Şekil 5.1’de gösterilen yapının ayrıntılı planına göre yapısal yangın dizaynı yapılmış olup döşeme için kompozit döşeme seçilip yapısal parametrelerin döşemenin yangın performansını ne kadar etkilediği belirlenmiştir.



Şekil 5.1. Referans alınacak yapının (ofis binası) ayrıntılı planı

Planda gösterilen döşeme için uzun açıklık (long span) ve kısa açıklık (short span) olmak üzere her ikisi için de hesaplamalar yapılmıştır ve farkları ortaya konmuştur. Ayrıca kompozit döşemenin birer yapısal parçası olan ana ve tali kirişlerin yangın korumalı olup olmamasına göre genel kompozit döşemenin yangın performansı değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, donatı meşi için farklı meş yapılarının döşemenin yangın performansına nasıl etki ettiği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

- Tüm analizlerde, ölü yük olarak $5,2 \text{ kN/m}^2$ ($3,5 \text{ kN/m}^2 + 1 \text{ kN/m}^2$ bölmeler + $0,7 \text{ kN/m}^2$ tavan kaplaması, servis boşlukları ve döşeme malzemesi) ve hareketli yük olarak da 4 kN/m^2 baz alınmıştır ve yük kombinasyonu için Eurocode'a göre $1,35G_k + 1,5Q_k$ uygulanmıştır.
- Kompozit döşemede kullanılacak olan sac için ATAPANEL Kompozit Döşeme Panelinin özellikleri (Bknz. Şekil 5.2) modelde kullanılmıştır.



Şekil 5.2. ATAPANEL Kompozit Döşeme Sacının özellikleri

- Döşemede kullanılacak beton malzemesi hafif beton seçilmiştir ve basınç dayanımı $C30/37$ ($f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$)'dir.
- Yapısal analiz sonucu döşeme sisteminin altında kullanılan çelik kirişlerden ana kirişler IPE 360 ve tali kirişler HE 340 B'dir ve yukarıda bahsedilen değişken parametreler için sıcaklık hesaplamaları bu kirişler üzerinden yapılacaktır. Modelde kullanılan akma dayanımı hem kiriş profilleri hem de donatı için $f_y = 255 \text{ N/mm}^2$ 'dir.
- Tüm geliştirilen matematiksek modellerde uygulanan yangın Standard (ISO 834) yangın eğrisidir ve 90 dk. boyunca uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar (sıcaklık hesaplamalar vb.) bu süreye kadar olan sonuçlardır.

- Tüm geliştirilen modellerde uygulanan yangın yükü oranı %90 olarak alınmıştır (PD 6688-1-2:2007, Tablo A.2.) (CEN 2002).

Yapısal hesaplamaların yapılabilmesi ve geliştirilen matematiksel modelin uygulanabilir olması için Microsoft Excel – Makrolar kullanılmıştır.

5.2. Sonuçlar

Sıcaklık hesaplamaları tamamen Bölüm 4.4 ve 4.5’de belirtilen hususlara göre yapılmıştır. Yangına karşı koruyucu malzeme olarak pasif koruyucu sistemlerden birisi olan ve ısıyla karşılaştığında kendiliğinden kabaran (şişen) intümesan boya kullanılmıştır. Bu malzemenin tercih edilmesinin başlıca sebepleri; estetik, hızlı uygulanabilir ve en önemlisi kompleks yüzeylere (örneğin; kolon-kiriş birleşim bölgelerine veya kompozit döşeme sistemlerinde sac ile çelik kiriş arasındaki bölgeye) kolay bir şekilde uygulanabilir olmasıdır.

5.2.1. Uzun ve Kısa Açıklıklı Döşemeler

Matematiksel modelde baz alınan uzun açıklıklı döşemelerde ana kirişin boyu 7,5 m, tali kirişin boyu 7,5 m’dir. Kısa açıklıklı döşeme sistemlerinde de ana kirişin boyu 7,5 m, tali kirişin boyu 3,75 m’dir.

Donatı meşi her iki sistemde de sabit tutulmuştur ve BS 4483’e göre A252 meşi seçilmiştir (BSI 2005). Bu meşin teknik özellikleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. A252 meşinin özellikleri

	Meş boyutları nominal tel aralığı		Tel boyutları		Metre genişlik başına kesit alanı		Ağırlık (1/m ²)
	Ana (mm)	Çapraz (mm)	Ana (mm)	Çapraz (mm)	Ana (mm)	Çapraz (mm)	kg
A252	200	200	8	8	252	252	3,95

Uzun açıklık

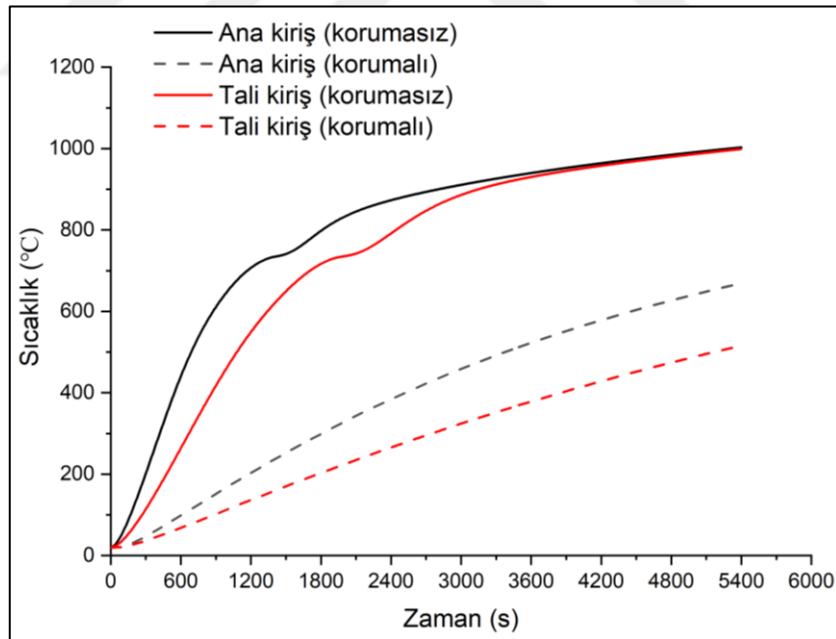
Bölüm 5.1’de belirtilen yüklere göre hesaplanan ve Bölüm 4.1.4 Eğilme dayanımı ve kontrolü bölümünde bahsedilen durumlara göre, ana kiriş için tarafsız eksen beton döşeme içinde yer alırken $x_c = 58,2 \text{ mm} > h_1 = 52 \text{ mm}$, tali kiriş için üst başlık bölümündedir $x_c = 141,3 \text{ mm} > h_1 = 52 \text{ mm}$ ve oda sıcaklığında hesaplanan eğilme kapasiteleri (rezistansları);

$$M_{pl,Rd} = 502,2 \text{ kNm} \text{ (Ana kiriş)}$$

$$M_{pl,Rd} = 800,6 \text{ kNm} \text{ (Tali kiriş)}$$

Hesaplanan müsaade edilebilir sehim miktarı, 160,9 mm’dir.

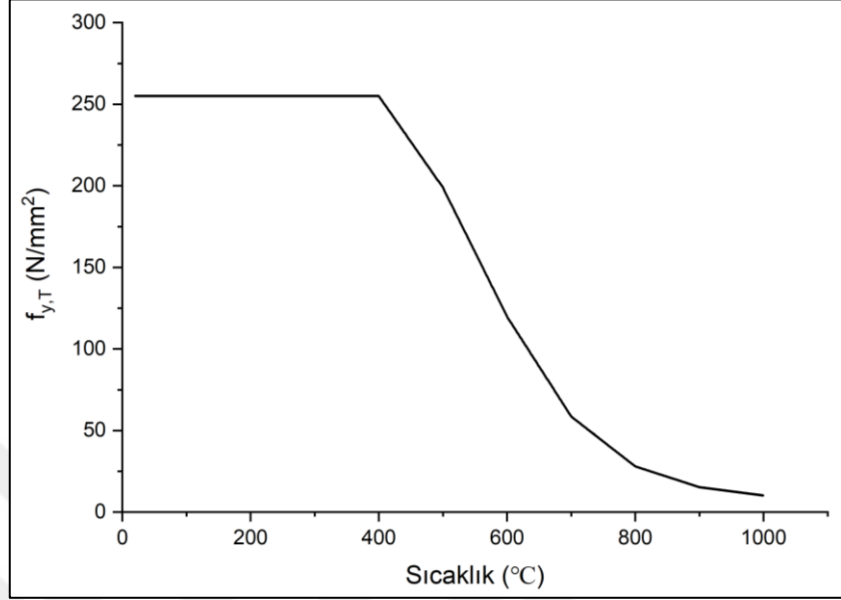
Uzun açıklıklı döşeme sisteminde ana kiriş ve tali kiriş için korumalı ve korumasız çelik sıcaklıkları Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Koruma sadece 1 adet tali kirişe uygulanmamıştır. Korumalı profiller için 2 mm boya kalınlığı uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.



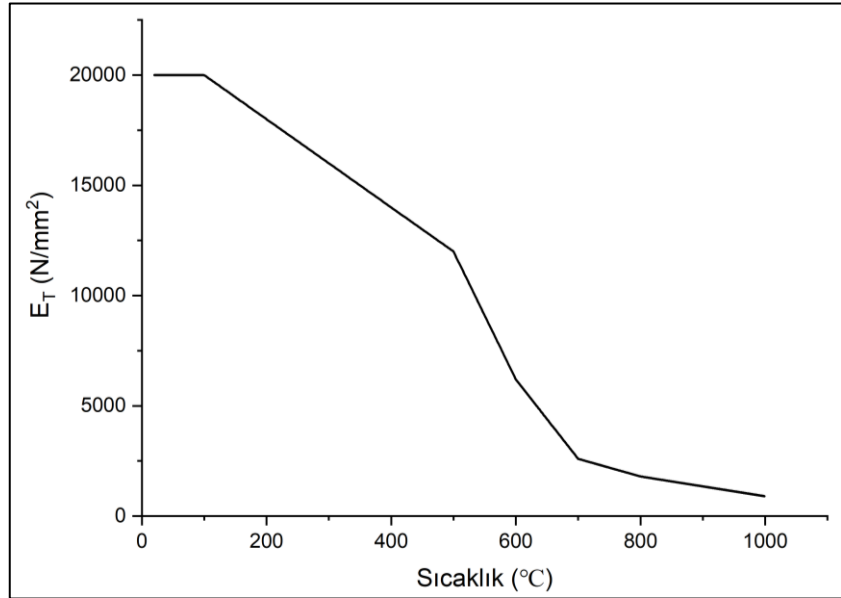
Şekil 5.3. Ana kiriş ve tali kirişin korumalı ve korumasız sıcaklıkları

Korumasız çelik sıcaklıkları 90 dakika sonunda 998,8 °C olmuştur ve yüksek sıcaklıklarda dayanım düşürme katsayısı Eurocode 4 Part 1.2 Tablo 3.2’ye göre $k_{y,\theta} =$

0,040 bulunur. Sıcaklıkla beraber azalmış çelik akma dayanımı ve eleastisite modülü durumu Şekil 5.4’de ve Şekil 5.5’de sunulmuştur.



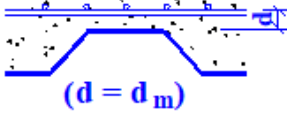
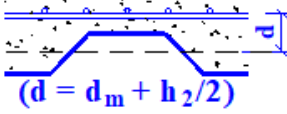
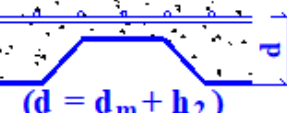
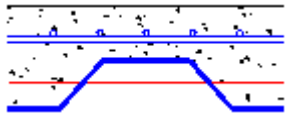
Şekil 5.4. Akma dayanımı-sıcaklık değişimi

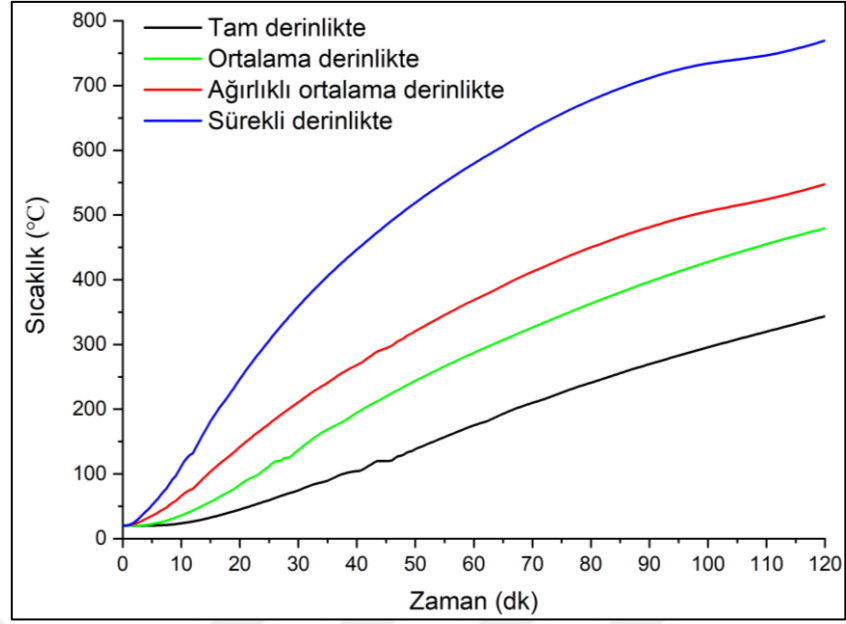


Şekil 5.5. Çeliğin Elastisite modülü-Sıcaklık değişimi

Donatı (meş) sıcaklıkları da bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Farklı derinliklerde başlıca; tam, ortalama, ağırlıklı ve sürekli derinliklerde hesaplanan sıcaklıklar Şekil 5.6’de gösterilmiştir. 90 dakika sonundaki ulaşılan sıcaklık değerleri de Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Ortalama derinlikteki sıcaklık genellikle baz alınır ve kısa açıklık çözümlemesi için sıcaklık değeri 397,1 °C’dir. Eurocode 4 Part 1.2 Tablo 3.4’e göre bu sıcaklıktaki dayanım düşme katsayısı 0,942’dir.

Çizelge 5.2. Döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları

Açıklık	Sıcaklık (°C)	Derinlik Yerleri
Sürekli derinlik	711,6	 ($d = d_m$)
Ortalama derinlik	397,1	 ($d = d_m + h_2/2$)
Tam derinlik	269,6	 ($d = d_m + h_2$)
Ağırlıklı ortalama derinlik	481,3	



Şekil 5.6. Beton içerisinde farklı derinliklerde donatı (meş) sıcaklıkları

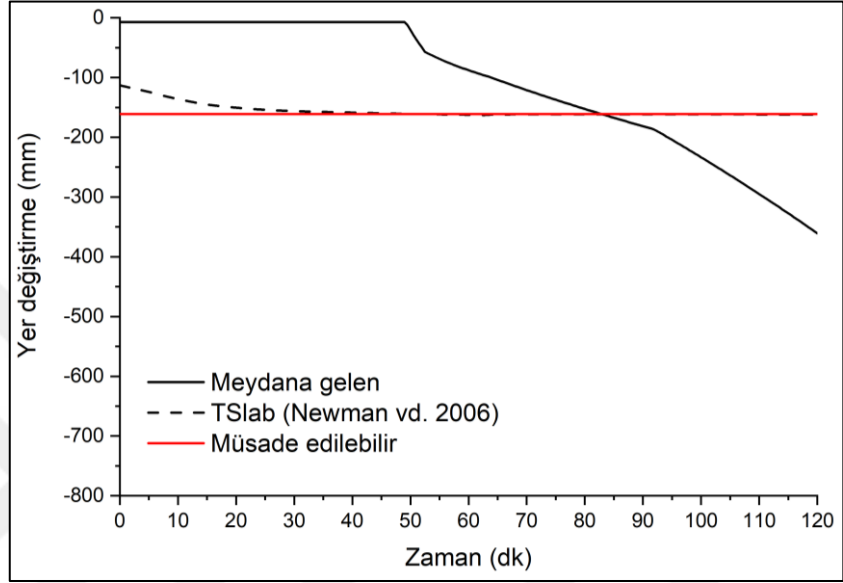
Yangın durumunda, kompozit döşeme sisteminin bir elemanı olan betonarme döşeme plakaları alt yüzeylerinden ısınır ve kalınlık yönü boyunca sıcaklık gradyanı ve yüksek sıcaklıktaki mukavemet azalması nedeniyle yön değiştirir. Döşeme levhasının sehimine bağlı olarak, membran gerilmesi gelişir ve yük taşıma kapasitesinin artmasına neden olur. Bu durum bu çalışmada gözlemlenmiştir.

Şekil 5.7’de modellenen kompozit döşemenin düşey yer değiştirmesi gösterilmiştir. 90 dakikalık dizayn sonucunda oluşan deplasman 181,4 mm’dir ve müsaade edilebilir deplasman miktarını (160,9 mm) aşmıştır. TSlab sehim hesaplaması da Newman vd. (2006) çalışmasına göre yapılmıştır. Bu hesaplamada döşemenin en alt yüzey sıcaklığı ve en üst yüzey sıcaklığı ve boyutsal özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır (Eşitlik (5.1)).

$$v = \frac{\alpha(T_2 - T_1)l^2}{19.2h} + \sqrt{\frac{0.5f_y}{E_{t=20^\circ\text{C}}}} \times \frac{3}{8}L^2 \quad (5.1)$$

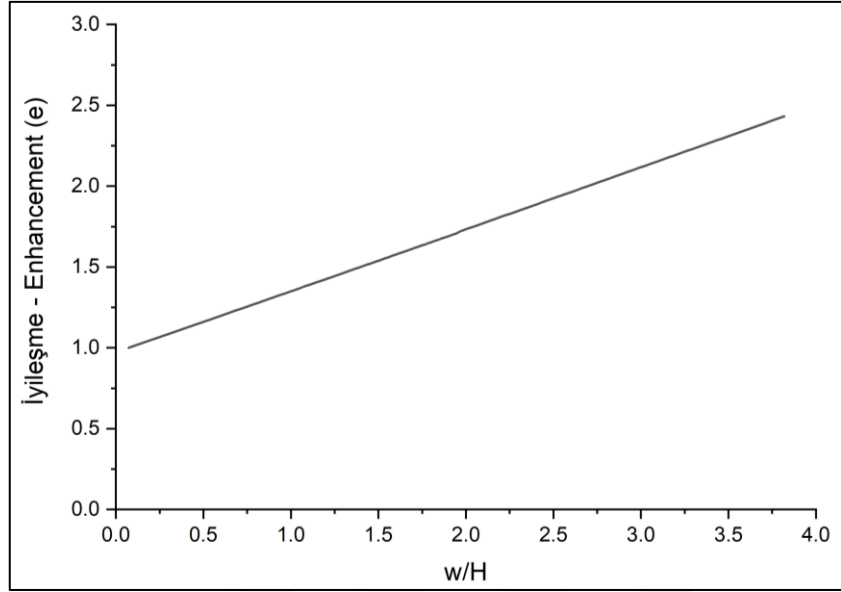
v – Müsaade edilebilir düşey yer değiştirme

- α – Betonun ısısal genleşme kat sayısı
 T_2 - Döşemenin en alt yüzey sıcaklığı
 T_1 - Döşemenin en üst yüzey sıcaklığı
 L – Döşemenin uzun kenarı (uzun span)
 l - Döşemenin kısa kenarı (kısa span)



Şekil 5.7. Uzun açıklıklı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmesi

Modellenen döşemenin membran aksiyonundan sonra göçme yükü $2,80 \text{ kN/m}^2$ bulunur ve yük taşıma kapasitesi ($W_{p,T}$) $4,8 \text{ kN/m}^2$ bulunur. Buna göre membran gerilmesi ortalama olarak 1,7 katsayılı bir yük taşıma kapasitesine katkı sağlamıştır. Şekil 5.8'de iyileşme-yer değiştirme/yükseklik eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Uzun açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu

Kısa açıklık

Uzun açıklıklı olan genel farklar bu bölümde verilmiştir. Sıcaklık hesaplamaları kesit boyutsal özellikleri değişmediği için aynı bulunmuştur. Fakat açıklık uzunlukları değiştiği için oluşacak olan eğilme momentleri ve kapasiteleri değişmiştir.

Bölüm 5.1’de belirtilen yüklere göre hesaplanan ve Bölüm 4.1.4 Eğilme dayanımı ve kontrolü bölümünde bahsedilen durumlara göre tarafsız eksen üst başlık bölümündedir $x_c = 128,7 \text{ mm} > h_1 = 52 \text{ mm}$ ve oda sıcaklığında hesaplanan eğilme kapasiteleri (rezistansları);

$$M_{pl,Rd} = 424,4 \text{ kNm (Ana giriş)}$$

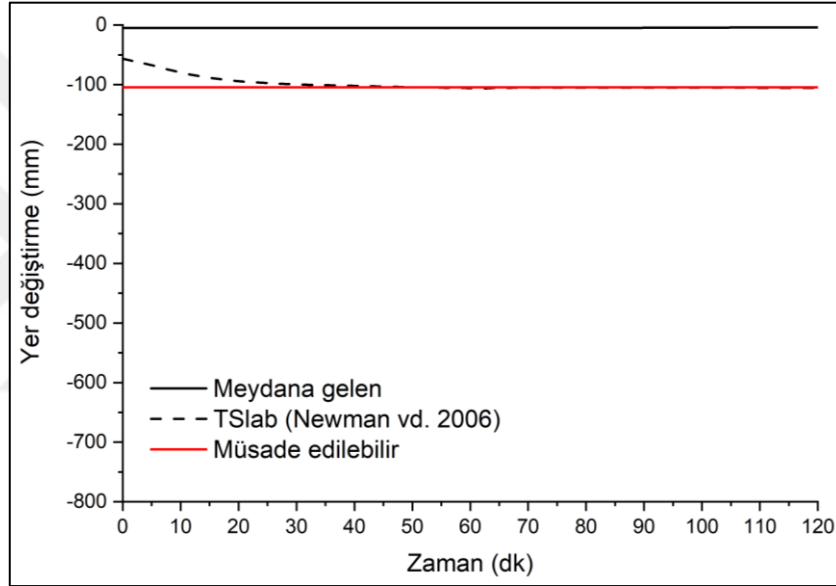
$$M_{pl,Rd} = 800,6 \text{ kNm (Tali giriş)}$$

Hesaplanan müsaade edilebilir sehim miktarı, 104,3 mm’dir.

Yangın durumunda, kompozit döşeme sisteminin bir elemanı olan betonarme döşeme plakaları alt yüzeylerinden ısınır ve kalınlık yönü boyunca sıcaklık gradyanı ve yüksek sıcaklıktaki mukavemet azalması nedeniyle yön değiştirir. Döşeme levhasının

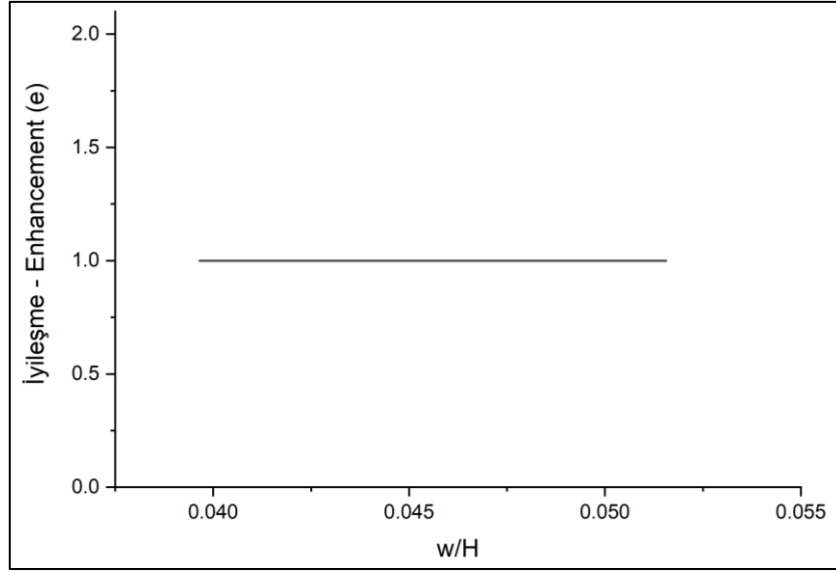
sehimine bağlı olarak, membran gerilmesi gelişir ve yük taşıma kapasitesinin artmasına neden olur. Bu durum bu çalışmada gözlemlenmiştir.

Şekil 5.9’da modellenen kompozit döşemenin düşey yer değiştirmesi gösterilmiştir. 90 dakikalık dizayn sonucunda oluşan deplasman 181,4 mm’dir ve müsaade edilebilir deplasman miktarını (160,9 mm) aşmıştır. TSlab sehim hesaplaması da Newman vd. (2006) çalışmasına göre yapılmıştır. Bu hesaplamada döşemenin en alt yüzey sıcaklığı ve en üst yüzey sıcaklığı ve boyutsal özellikleri dikkate alınarak yapılmaktadır (Eşitlik (5.1)).



Şekil 5.9. Kısa açıklıklı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmeleri

Modellenen kısa açıklıklı döşemenin membran aksiyonundan sonra göçme yükü 4,94 kN/m² bulunur ve yük taşıma kapasitesi ($W_{p,T}$) 2,3 kN/m² bulunur. Buna göre membran gerilmesi yük taşıma kapasitesine herhangi bir katkı sağlamamıştır. Yani kısa açıklıklı kirişte membran oluşumu gözlemlenmemiştir sonucuna varabiliriz. Şekil 5.10’da iyileşme-yer değiştirme/yükseklik eğrisi gösterilmiştir.

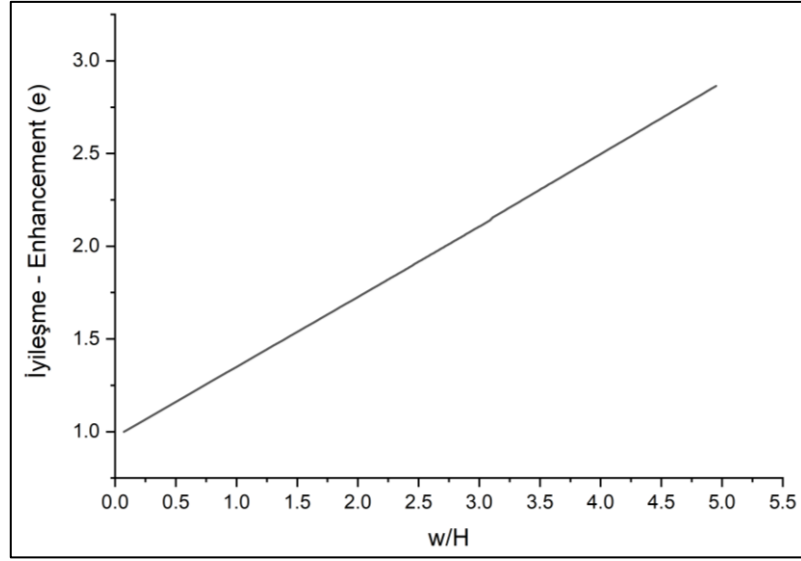


Şekil 5.10. Kısa açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu

5.2.2. Tüm Kesitlerin (Ana Kiriş ve Tali Kiriş) Tamamen Korunmalı Olması Durumu

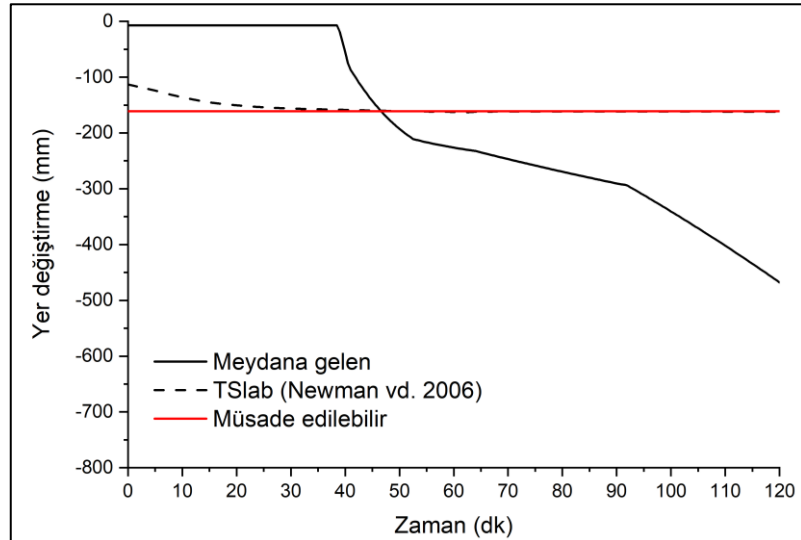
Bölüm 5.2.1 gösterilen farklı açıklıklı döşemelerden uzun açıklıklı döşeme seçilmiştir ve tüm kesitlere (ana kiriş ve tali kiriş) 2 mm kalınlığında yangın koruması (intumesan boya) uygulanmıştır. Ana farklar bu bölümde tartışılmıştır.

Ana kiriş (IPE 360) ve tali kiriş (HE 340 B) kesitleri aynı olduğu için korunmalı çelik sıcaklık hesaplamaları ve sıcaklığa bağlı düşmüş mekanik özellikleri Bölüm 5.2.1 Uzun açıklık bölümünde sunulan sonuçlarla aynıdır. Fakat, tüm kesitler yangına karşı korunmalı olduğu için kompozit döşemenin moment kapasitesi artmıştır. Bu bölümde modellenen döşemenin membran aksiyonundan sonra göçme yükü $2,80 \text{ kN/m}^2$ iken yük taşıma kapasitesi ($W_{p,T}$) $6,0 \text{ kN/m}^2$ bulunur. Bu durumda ortalama olarak 2,1 katsayılı bir yük taşıma kapasitesine katkı sağlamıştır. Şekil 5.8'de iyileşme-yer değiştirme/yükseklik eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.11. Uzun açıklıklı sistemde tüm kirişlerin korumalı olması durumunda İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu

Şekil 5.12’de matematik modeli geliştirilen uzun açıklıklı ve tam korumalı döşemenin düşey yer değiştirmesi gösterilmiştir. Müsaade edilebilir sehim miktarı 160,9 mm iken 90 dakikanın sonunda 290,4 mm’lik sehim yapmasına karşın yangın korumanın etkisinden dolayı herhangi bir göçme meydana gelmemiştir. Bu da uygulanan pasif korumanın (boya kaplamanın) kompozit döşemenin tüm yangın performansını çok iyi bir ölçüde artırdığını ortaya koymuştur.



Şekil 5.12. Uzun açıklıklı ve tüm kirişlerin tam korumalı döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmeleri

5.2.3. Farklı Donatı Meşi Kullanımı

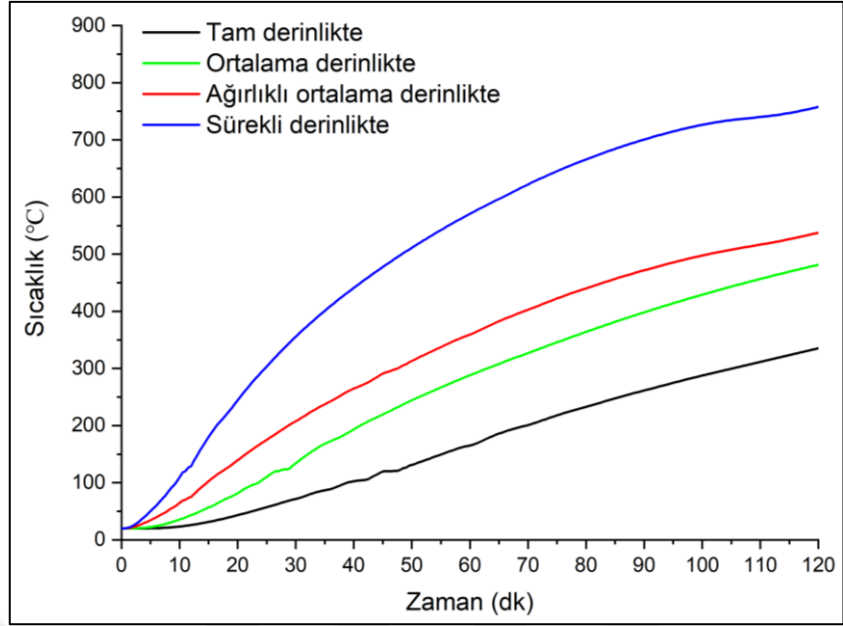
Bölüm 5.2.1’de kullanılan A252 (Ø 8) donatı meşi yerine A142 (Ø 6) ve A393 (Ø 10) meşi kullanılmıştır. Yine 1 tali kiriş yangın korumasız olup tüm ana kirişler yangın korumalıdır. Bu kullanılan donatıların özellikleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. İkisi arasındaki ana fark kullanılan donatı boyutlarıdır ve A142 için Ø6 ve A393 için Ø10 kullanılmasıdır.

Çizelge 5.3. A142 ve A393 meşlerinin özellikleri

	Meş boyutları nominal tel aralığı		Tel boyutları		Metre genişlik başına kesit alanı (m ²)		Ağırlık (1/m ²)
	Ana (mm)	Çapraz (mm)	Ana (mm)	Çapraz (mm)	Ana (mm)	Çapraz (mm)	kg
A142 (Ø6)	200	200	6	6	142	142	2,22
A393 (Ø10)	200	200	10	10	393	393	6,16

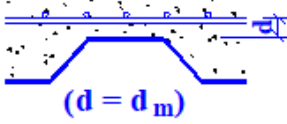
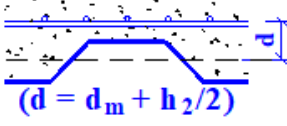
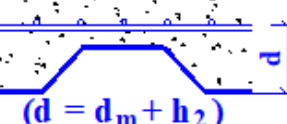
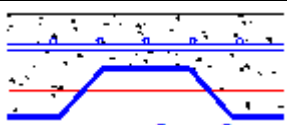
A142 (Ø6) donatı meşi

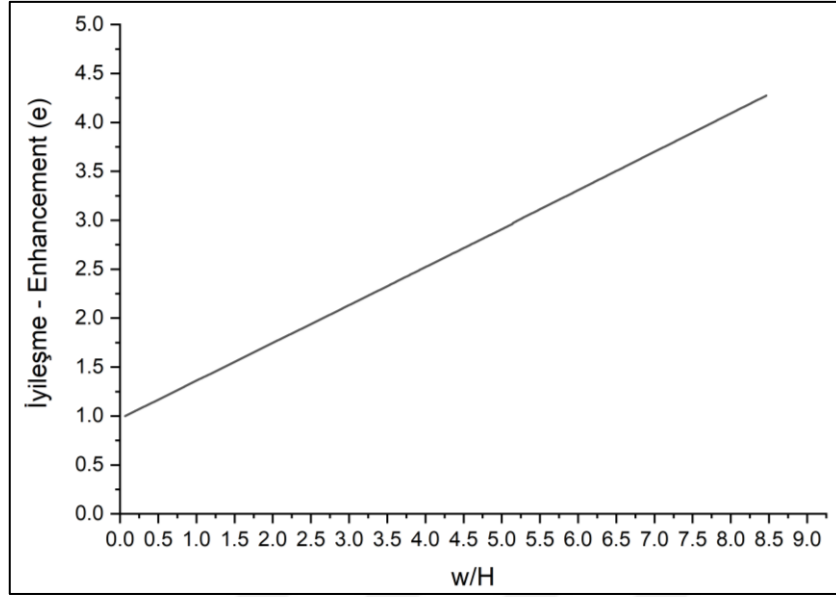
Bölüm 5.2.1 Uzun açıklık bölümünde bulunan farklı derinliklerdeki donatı sıcaklık sonuçlarla karşılaştırıldığında 90 dakika sonunda A142 donatı meşi kullanıldığında daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir (Şekil 5.13 ve Çizelge 5.4). Bu da donatı meşinin kompozit döşemenin yangın performansını bu durumda olumlu etkilediğini göstermektedir. Fakat diğer bir yandan göçme yükü 2,80 kN/m²’den (A252 meşinde) 1,61kN/m²’ye düşmüştür. Yük taşıma kapasitesi ($W_{p,T}$) 4,8 kN/m². Buna göre membran gerilmesi ortalama olarak yaklaşık 3,0 katlı bir yük taşıma kapasitesine katkı sağlamıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.13. Beton içerisinde farklı derinliklerde A142 donatının (meşinin) sıcaklıkları

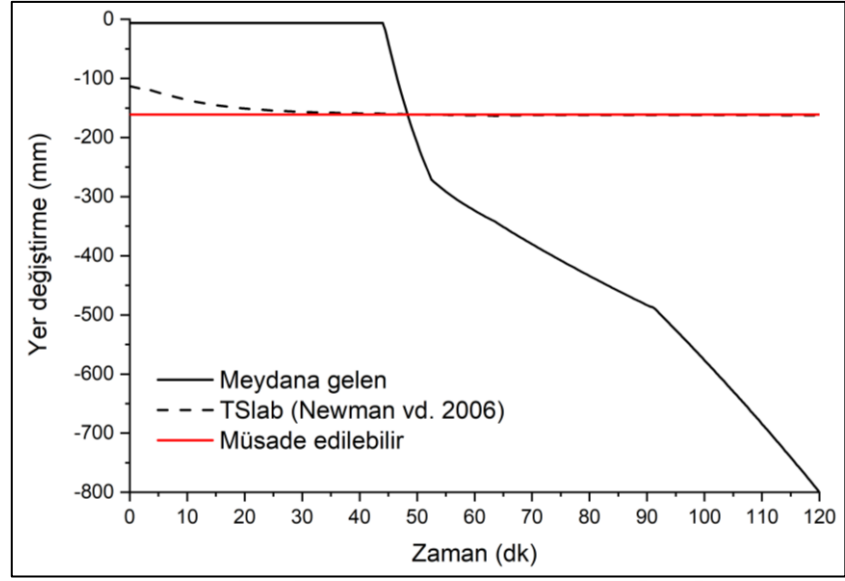
Çizelge 5.4. A142 (Ø6) donatılı kompozit döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları

Açıklık	Sıcaklık (°C)	Derinlik Yerleri
Sürekli derinlik	697,4	 ($d = d_m$)
Ortalama derinlik	396,1	 ($d = d_m + h_2/2$)
Tam derinlik	237,6	 ($d = d_m + h_2$)
Ağırlıklı ortalama derinlik	457,7	



Şekil 5.14. A142 (Ø6) donatı meşinin kullanıldığı uzun açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu

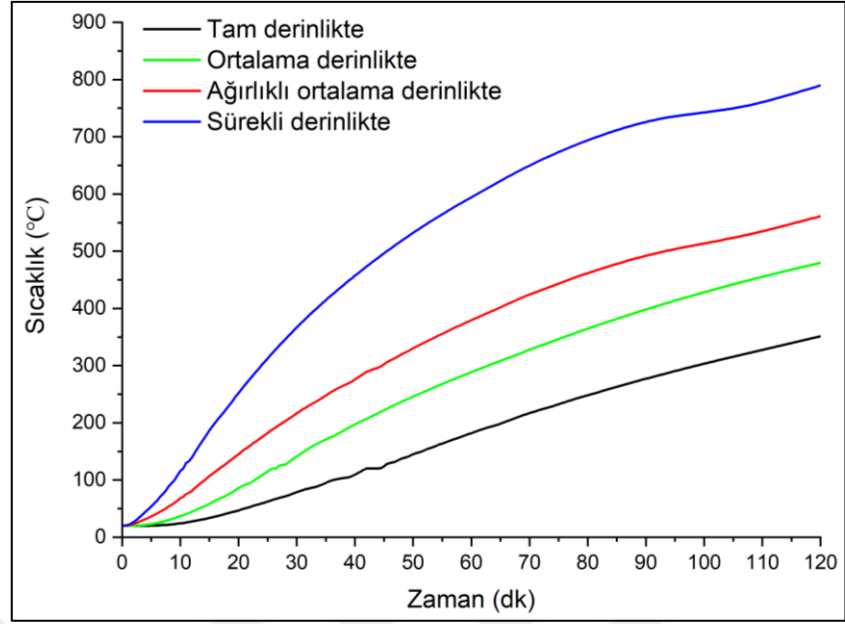
Şekil 5.15’de gösterilen düşey yer değiştirmeye göre küçük çapta donatı kullanımı (A142-Ø6) 90 dk sonunda yaklaşık 480 mm’lik bir deplasmanın oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu da tabi ki kompozit döşeme sistemi için istenmeyen bir durumdur. Ortalama 50 dakika gibi bir süre döşeme kendini uygulanan yangında koruyabilmiştir.



Şekil 5.15. A142 (Ø6) donatı meşli döşemenin zamana bağlı düşey yer değişimi

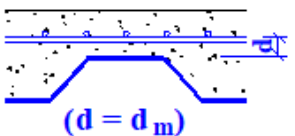
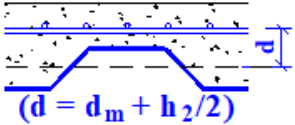
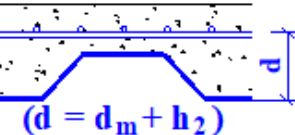
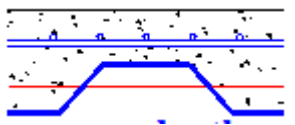
A393 (Ø10) donatı meşi

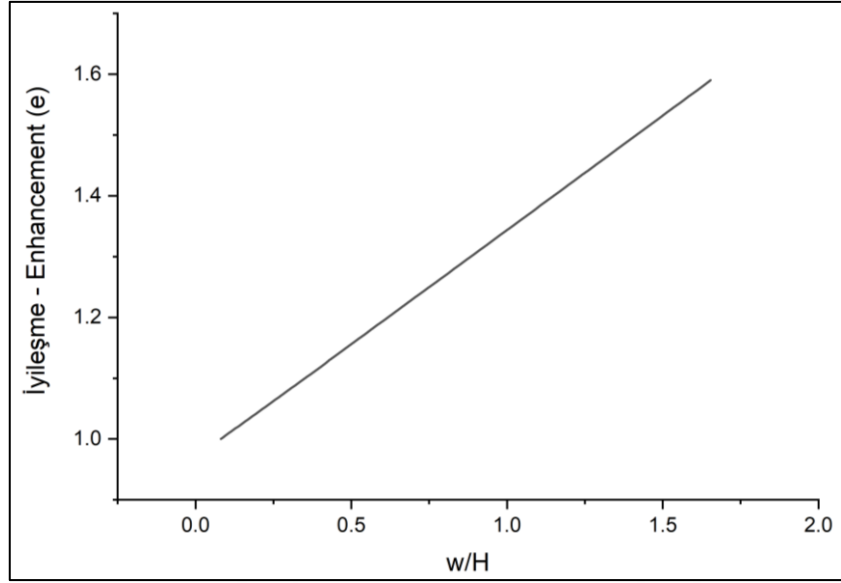
A393 donatı meşi kullanıldığında daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir (Şekil 5.13 ve Çizelge 5.4). Bu da donatı meşinin kompozit döşemenin yangın performansını bu durumda olumlu etkilediğini göstermektedir. Fakat diğer bir yandan göçme yükü $2,80 \text{ kN/m}^2$ 'den (A252 meşinde) $4,26 \text{ kN/m}^2$ 'ye yükselmiştir. Yük taşıma kapasitesi ($W_{p,T}$) $4,8 \text{ kN/m}^2$. Buna göre membran gerilmesi ortalama olarak yaklaşık 1,1 katsayılı bir yük taşıma kapasitesine katkı sağlamıştır (Şekil 5.17).



Şekil 5.16. Beton içerisinde farklı derinliklerde A393 donatının (meşinin) sıcaklıkları

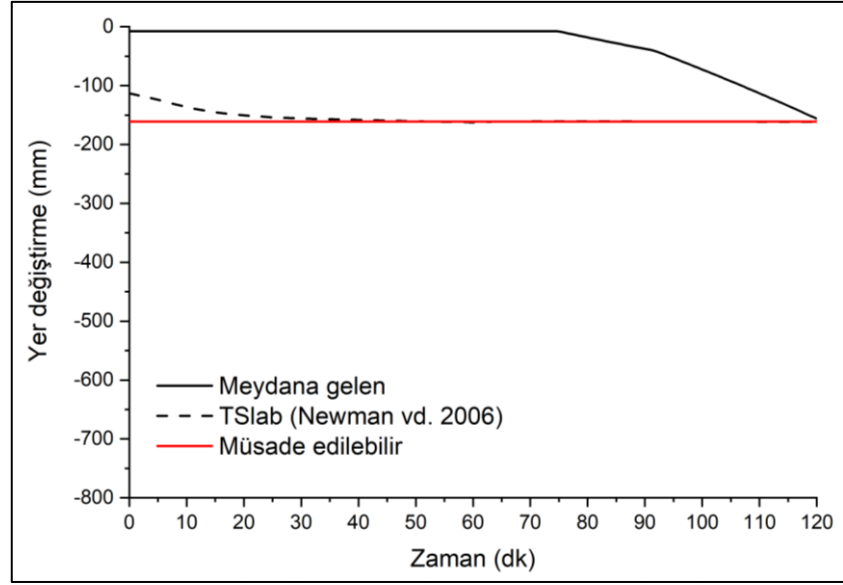
Çizelge 5.5. A393 (Ø10) donatılı kompozit döşeme içerisinde bulunan farklı yüksekliklerdeki 90 dakika sonundaki donatı (meş) sıcaklıkları

Açıklık	Sıcaklık (°C)	Derinlik Yerleri
Sürekli derinlik	725,9	 ($d = d_m$)
Ortalama derinlik	398,1	 ($d = d_m + h_2/2$)
Tam derinlik	277,0	 ($d = d_m + h_2$)
Ağırlıklı ortalama derinlik	492,0	



Şekil 5.17. A393 (Ø10) donatı meşinin kullanıldığı uzun açıklıklı sistemde İyileşme-Enhancement (e) – Yer değiştirme/Yükseklik (w/H) sonucu

Şekil 5.18’de gösterilen düşey yer değiştirmeye göre büyük çaplı donatı kullanımı (A393-Ø10) yaklaşık 70 dakika çok çok az bir sehim yaparak 90 dakika sonunda yaklaşık 37,5 mm’lik bir deplasmanın oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu da tabi ki kompozit döşeme sistemi için çok olumlu bir sonuç ve istenen bir durumdur. Uygulanan yangının süresi kadar yani 90 dakika döşeme kendini uygulanan yangında koruyabilmiştir ve hatta 120 dk. sonunda müsaade edilebilir sehim miktarına ulaşamamıştır. Yangın performansı olarak A393 donatı meşinin kullanımı ciddi anlamda kompozit döşemenin performansını artırmıştır.



Şekil 5.18. A393 (Ø10) donatı meşli döşemenin zamana bağlı düşey yer değiştirmesi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gerçek ölçülerde dizaynı ve analizleri yapılan kiriş boyutları belli olan bir kompozit döşeme üzerinde çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu geliştirilen matematiksel modellerde yangın eğrisi olarak literatürde kabul gören ve standartlarla belirlenen (Avrupa kodları) Standard yangın eğrisi (ISO 834) etki ettirilmiştir. Farklı parametrelerin genel anlamda döşemelerin yangın performansını nasıl etkiledikleri belirlenmiştir. Bu parametreler başlıca şöyledir;

- Döşemenin uzun veya kısa açıklıklı olması.
- Tüm çelik kesitlerin (profillerin) korumalı olması.
- Döşemeyi oluşturan beton blokta farklı donatı meşlerinin kullanılması.

Bu tez çalışması kapsamında varılan sonuçlar ana hatlarıyla şöyle sıralanabilir:

- Uzun açıklı döşemelerde deplasman (düşey yer değiştirme) miktarı kısa açıklıklı döşemelere göre çok daha fazla olacağından çekme membran (tensile membran action) meydana gelmiştir. Bu durum da yük taşıma kapasitesine ciddi oranda etki edip artırmaktadır. Kısa açıklıklı döşemelerde membran durumu oluşumu gözlemlenmemiştir.
- 2 mm yangına karşı koruyuculu boya kaplaması uygulanması çok ciddi oranda çelik kirişlerin (ana ve tali ve 1 adet tali kiriş korumasız olmak üzere) yangın performansına katkı sağlamıştır ve elde edilen sıcaklıklar korumasız çelik sıcaklıklarına göre 90 dakika dizayn süresi sonunda çok düşük elde edilmiştir.
- Korumasız çelik profil sıcaklıklarından düşmüş dayanım ve Elastisite modülü hesaplamaları yapılmıştır. İlk dayanımlarının (S255) ve Elastisite modüllerinin (200 GPA) yangın süresi sonunda %4 gibi bir dereceye düşmüşlerdir.
- Tüm kirişlere (ana ve tali) tam koruma uygulanması kompozit döşemenin yangın performansını 1 tali kirişin korumasız olması durumuna göre çok iyi bir ölçüde artırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu döşemelerde membran oluşumu karşılaştırması yapılan 1 tali kirişin korumasız olması durumuna göre artış göstermiştir. Bunun yanı sıra yük taşıma kapasitesi ciddi oranda artış göstermiştir.

- Kompozit döşeme sisteminin en üstündeki beton blok içerisinde farklı donatı meşleri ve boyutları (A142 ve A393) kullanılmıştır. Her ikisi karşılaştırıldığında A393 donatı meşi kullanımı döşemenin yük taşıma kapasitesine ciddi oranda katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, beton içerisinde farklı derinliklerde (tam derinlik, ortalama derinlik, ağırlıklı ortalama derinlik ve sürekli derinlik) daha büyük donatı çapı kullanıldığında daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. Bu da döşemenin yangın performansının iyi oranda artırdığını göstermektedir.
- A393 donatı meşi tercih edildiğine 70 dakika boyunca çok az bir sehim yapmıştır ve bu değer 90 dakika sonunda yaklaşık 37.5 mm'lik bir sehim yapmıştır. Matematiksel modelde dikkate alınan 90 dakikalık dizayn süresi boyunca döşeme kendini uygulanan yangında koruyabilmiştir. Bu da A393 donatı meşi kullanımının diğer meşlere göre ciddi anlamda kompozit döşemenin yangın performansını artırdığı kanaatine varılmıştır.

Bu tez çalışması sonucunda tez çalışması kapsamında incelenmeyen farklı yangın etkilerinin kompozit döşemelerin yangın performansını yukarıda bahsedilen kriterlerde nasıl etkileyeceğinin değerlendirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen matematiksel modellerin ve incelenen parametrelerin tam ölçekli deneysel numuneler oluşturarak incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alam, N., Nadjai, A., Ali, F. ve Nadjai, W. 2018. Structural response of unprotected and protected slim floors in fire. J. Constr. Steel Res., 142, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.12.009>.
- Bailey, C.G., Burgess, I.W. ve Plank, R.J. 1996. Analysis of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings. Fire Safety Journal 26:273–293.
- Bailey C.G. Moore B.D. 2000. The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire: Part 1: Theory. The Structural Engineer, 78(11), 19-27.
- Bingöl, A.F. 2008. Beton-donatı aderansına yüksek sıcaklıkların etkisi. Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Borhan, T. 2011. Thermal and structural behaviour of basalt fibre reinforced glass concrete (Doctoral dissertation, The University of Manchester (United Kingdom)).
- Both, I., Wald, F. ve Zaharia, R. 2016. Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. J. Appl. Eng. Sci., 14, 275-284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
- (BSI), B. S. I. (1990) British Standard BS 5950, Structural Use of Steelwork in Buildings, Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design. London.
- (BSI), B. S. I. (2005) British Standard BS 4483:2005, Steel fabric for the reinforcement of concrete - Specification. London.
- Castillo, E., Marty, A., Condoret, J. S. ve Combes, D. 1996. Enzymatic catalysis in nonconventional media using high polar molecules as substrates, In: Annals of the New York Academy of Science. Dordick, J. S. ve Russell, A.J. (eds), The NewYork Academy of Science, 206-211, New York.
- CEN. (2002) EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures. Part 1.2: General actions - Actions on structures exposed to fire. BSI: London.
- CEN (2005a). EN 1993-1-2: Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.2: General Rules - Structural fire design. BSI: London.
- CEN. (2005b) EN 1993-1-1: Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. BSI: London.
- CEN. (2005c) EN 1994-1-2:2005, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. BSI: London.

- Cirpici, B.K., Orhan, S.N. ve Kotan, T. 2019a. Numerical modelling of heat transfer through protected composite structural members. International Civil Engineering and Architecture Conference 2019 (ICEARC 2019), Trabzon-Turkey.
- Cirpici, B.K., Orhan, S.N. ve Kotan, T. 2019b. Numerical modelling of heat transfer through protected composite structural members. Challenge J. Struct. Mech., 5(3), 96-107. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2019.03.003>.
- Cirpici, B.K., Orhan, S.N. ve Kotan, T. 2019c. Thermal performance of protected composite slab-beam systems exposed to fire. Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Engineering Technologies, Bayburt-Turkey.
- Cirpici, B. K., Orhan, S. N. ve Kotan, T. 2020. Finite element study on composite slab-beam systems under various fire exposures. Steel and Composite Structures, Vol. 37(5).
- Cordeiro, L. C., ve Silva, V. P. 2016. Sobre o dimensionamento de laje mista de aço e concreto em situação de incêndio. Revista da Faculdade de Educação 5(1):12
- Jiang, J., Main, J.A., Weigand, J.M. ve Sadek, F.H. 2018. Thermal performance of composite slabs with profiled steel decking exposed to fire effects, Fire Saf. J., 95, 25-41. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.10.003>.
- Khorasani, N.E., Gernay, T. ve Fang, C. 2019. Parametric study for performance-based fire design of US prototype composite floor systems. J. Struct. Eng., 145(5), 04019030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002315)
- Lakshmikandhan, K.N., Sivakumar, P., Ravichandran, R. ve Jayachandran, S.A. 2013. Investigations on efficiently interfaced steel concrete composite deck slabs, J. Struct., 2013, 628759. 10.1155/2013/628759.
- Li, G.Q. ve Wang, W.Y. 2013. A simplified approach for fire-resistance design of steel-concrete composite beams. Steel Compos. Struct., 14(3), 295-312. <https://doi.org/10.12989/scs.2013.14.3.295>.
- Lim, L. Ve Wade, C. 2002. Experimental Fire Tests of Two-Way Concrete Slabs. In: Limited, B. (ed.) Fire Engineering Research Report 02/12. Porirua City, New Zealand: University of Canterbury.
- Mahachi, J. 1994. Response of composite bond-deck slabs to fatigue load, Proceedings of the 5th International Conference on Steel Structures, Jakarta, Indonesia.
- Mahachi, J. 1995. A comparison of two decking profiles subjected to fatigue load, Proceedings of the RILEM International Conference on Dynamic Behaviour of Concrete Structures, Bratislava, Slovakia, 210-211.
- Mahachi, J. ve Dundu, M. 2012. Prediction of the debonding/ slip load of composite deck slabs using fracture mechanics, J. South African Inst. Civil Eng., 54, 112-116.

- Newman G.M., Robinson J.T. ve Bailey C.G. 2006. Fire Safe Design: A New Approach to Multi-Storey Steel-Framed Buildings, 2nd edn. The Steel Construction Institute, Ascot, UK, SCI Publication P288.
- Nguyen, T.T., Tan, K.H. ve Burgess, I.W. 2015. Behaviour of composite slab-beam systems at elevated temperatures: Experimental and numerical investigation. Eng. Struct., 82, 199-213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.044>
- Nguyen, T.T. ve Tan, K.H. 2017. Behaviour of composite floors with different sizes of edge beams in fire. J. Constr. Steel Res., 129, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.10.018>.
- Pantousa, D. ve Mistakidis, E. 2017. Rotational capacity of pre-damaged I-section steel beams at elevated temperatures. Steel Compos. Struct., 23(1), 53-66. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.23.1.053>.
- Piloto, P.A.G., Balsa, C., Ribeiro, F. ve Rigobello, R. 2020a. Computational simulation of the thermal effects on composite slabs under fire conditions, Math. Comput. Sci., 10.1007/s11786-020-00466-0.
- Piloto, P.A.G., Balsa, C., Ribeiro, F.F. ve Rigobello, R. 2020b. Three-dimensional numerical analysis on the fire behaviour of composite slabs with steel deck, Lecture Notes in Civil Engineering.
- Piloto, P.A.G., Balsa, C., Santos, L.M.C. ve Kimura, É.F.A. 2020c. Effect of the load level on the resistance of composite slabs with steel decking under fire conditions, J. Fire Sci., 38(2), 212-231. 10.1177/0734904119892210.
- Selamet, S. ve Yolaçan, F. 2017. Çelik-Beton Kompozit Kat Döşemesi Yangın Dayanım Deneyi. Teknik Dergi. 10.18400/tekderg.307544.
- Tan, K.H. ve Nguyen, T.T. 2015. Experimental and numerical evaluation of composite floor systems under fire conditions. J. Constr. Steel Res., 105, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.002>.
- Üstündağ C., Çelik O.C., 2006. Çok Katlı Çelik Yapılarda Kullanılan Kompozit Döşeme Sistemleri. Yapı Dergisi, Mimarlık Kültür Sanat, 293:88-92.
- Vila Real, P.M. M. vr Franssen, J.M. 2000. Lateral torsional buckling of steel I-beams in case of fire—numerical modeling. Proceedings of the First International Workshop on Structures in Fire, Copenhagen, Denmark, pp. 71–93.
- Yılmaz, S. 2008. Kompozit Döşeme Elemanlarda Pozitif Moment Taşıma Kapasitesinin İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yorgun, C., Odabaşı, Y., “Kompozit Döşeme Plaklarının Uygulaması Üzerine Bir Araştırma”, Türkiye İnşaat Mühendisliği XII. Teknik Kongresi, Ankara, 25-27 Mayıs, 1993, sf.539-552

Yorgun, C. 2003. Kompozit Döşemeler (1. Baskı). İstanbul: Türk Yapısal Çelik Derneği Yayınları.

Yorgun, C. 2005. Çelik sac-beton kompozit döşeme sistemlerinin uygulamalarına yönelik değerlendirmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı 435

Zoltan V. and Szatmari I., “Composite slab design”, 2nd Int. Phd. Symposium in Civil Engineering, Budapest, 1-8, 1998

Wang, Y. C. (2002) Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety. London: Spon Press.

Wang, Y., Jiang, Y., Huang, Z., Li, L., Huang, Y., Zhang, Y., Zhang, G., Zhang, X. ve Duan, Y. 2021. Post-fire behaviour of continuous reinforced concrete slabs under different fire conditions. Eng. Struct., 226, 10.1016/j.engstruct.2020.111342.

