

# KARBODUR ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ NEGATİF MOMENT BÖLGESİNDEKİ KOMPOZİT KİRİŞLERİN YAPISAL DAVRANIŞI

A. Necati YELGIN \*

Ercan IŞIK \*

\* Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi , Sakarya - TÜRKİYE

## ÖZET

Kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki betonarme plak ve çelik profilin birlikte çalışması durumunda karbodur elemanlarla yapılan bindirme eklerinin boyut ve aralıklarının değişiminin taşıma kapasitesini ve kompozit kirişin taşıma davranışını nasıl etkilediği araştırılmakta ve kompozit kirişin negatif moment altında şekil değiştirmesi sonucu beton plağın çelik profilden ayrılıp kalkmasının önleyip önlemediği araştırılmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan kiriş, 3000.800.100 mm boyutlarındaki hazır bir betonarme plak ve çelik profilden (I 120) oluşmaktadır. Kompozit kiriş imal edilirken betonarme hazır plağın çelik profil ile bağlantısını sağlamak üzere epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Hazır betonarme plak içerisine çekme kuvvetlerini karşılamak üzere hesaplanmış çekme donatıları konulmaktadır. Ayrıca negatif moment bölgesinde kompozit kirişin taşıma kapasitesini arttıracak boyut ve aralıklarda karbodur elemanlar kullanılmaktadır.

Yapılan bu deneysel çalışmada, epoksi ile yapıştırılarak elde edilen kompozit kirişlerin negatif moment bölgesinde karbodur elemanlarla takviye edilmesi durumunda kompozit kirişin davranışı incelenmektedir. İnşaat sektöründe yeni birer güçlendirme malzemesi olan karbodur elemanlar ve epoksi reçineleri hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmakta ve karbodur elemanların aralık ve boyutlarının değişiminin kompozit kirişin negatif moment bölgesinde taşıma davranışını nasıl etkilediği araştırılmakta ve öneriler yapılmaktadır.

## ABSTRACT

In the state of reinforced concrete slab's and steel profiles working together in negative bending moment zone of composite beam. How the changing size and clearance of lapped joints which were made by Sika Carbodur Strips (Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips – CFRP), affects the bearing capacity and behaviour of composite

beam is being investigated and how it prevent or doesn't prevent the separation of concrete slabs from steel profile, as a result of deformation under negative bending in composite beam is being investigated.

In this experimental study, the beam consists of a ready – mixed reinforced concrete slab which has 3000.800.100 mm size and steel profile (I120 profile) on the reinforced concrete slab. When the composite beam is prepared an epoxy resin is used to supply the connection between ready – mixed reinforced slab and steel profile. Calculated steel bars put in to the ready – mixed reinforced concrete slab in order to prevent the tensile which cannot prevented by the concrete. Additionally, in negative bending moment zone, the CFRP strips (Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips) whose size and clearance differ and which increase the bearing capacity of composite beam, are used. Detailed information are given about charecteristic values of concrete, steel profile, epoxy resin and CFRP strips which is used when the composite beam is prepared.

As a result of this experimental study, theoretical and experimental results are being compared, in situations of the CFRP strips being used or not being used in negative bending moment zone of composite beams which were bonded with epoxy. The purposes of experimental research are first to be informed about CFRP strips and epoxy resin that each was a new strengthening material in building trade and secondly to be informed about behaviour of composite beams in negative bending moment zone according to changing size and clearance of CFRP strips and epoxy resins and suggestions are made.

## I. GİRİŞ

Betonarme döşeme plakları ile çelik profillerin ortak çalıştırılması ile ortaya çıkan karma kirişler (Kompozit kirişler), üzerine serbestçe oturan bir betonarme plağı yalnız başına taşımaya çalışan çelik kirişlere göre daha ekonomiktir. Çünkü kompozit kirişte eğilmeden ileri gelen kuvvet çiftinin çekme bileşeni çelik profil

tarafından, basınç bileşeni ise yalnızca betonarme plak veya betonarme plak - çelik profil tarafından ortak olarak taşınmaktadır. Dolayısıyla çelik profilin eğilmenin basınç bileşenini ya tümüyle, yada büyük ölçüde taşımaktan kurtarmaktadır. Betonarme plağın bir ölçüde taşımaktan çıkıp basınç bileşenini taşıyan yararlı bir elemana dönüşmesinin yanı sıra, böyle bir ortak çalışmada kuvvet çiftinin manivela kolunun da büyümesi iyi bir etken oluşturmaktadır. Ayrıca kompozit kirişler sırf çelikten üretilmiş taşıyıcı sistemlere göre daha az çelik tükettiklerinde dolayı önemli bir ekonomi de sağlamaktadırlar.

Çelik - Betonarme kompozit yapı elemanlarında doğrudan çelik kullanılmasına göre sağlanabilen en büyük ekonomi kirişlerde karşımıza çıkar. Bu ekonominin mertebesi pozitif moment ağırlıklı sistemlerde %50' ye yaklaşmaktadır. Kiriş boyunca negatif moment bölgelerinin de bulunması durumunda, bir başka deyişle sürekli kiriş durumunda kullanılmalarında genelde çelik profilin üstünde bulunan betonarme tablanın kompozit çalışmaya fazla bir katkı sağlamadığı açıktır. Kompozit kirişlerin negatif momentler bölgesindeki hesabı için iki görüş mevcuttur[1]:

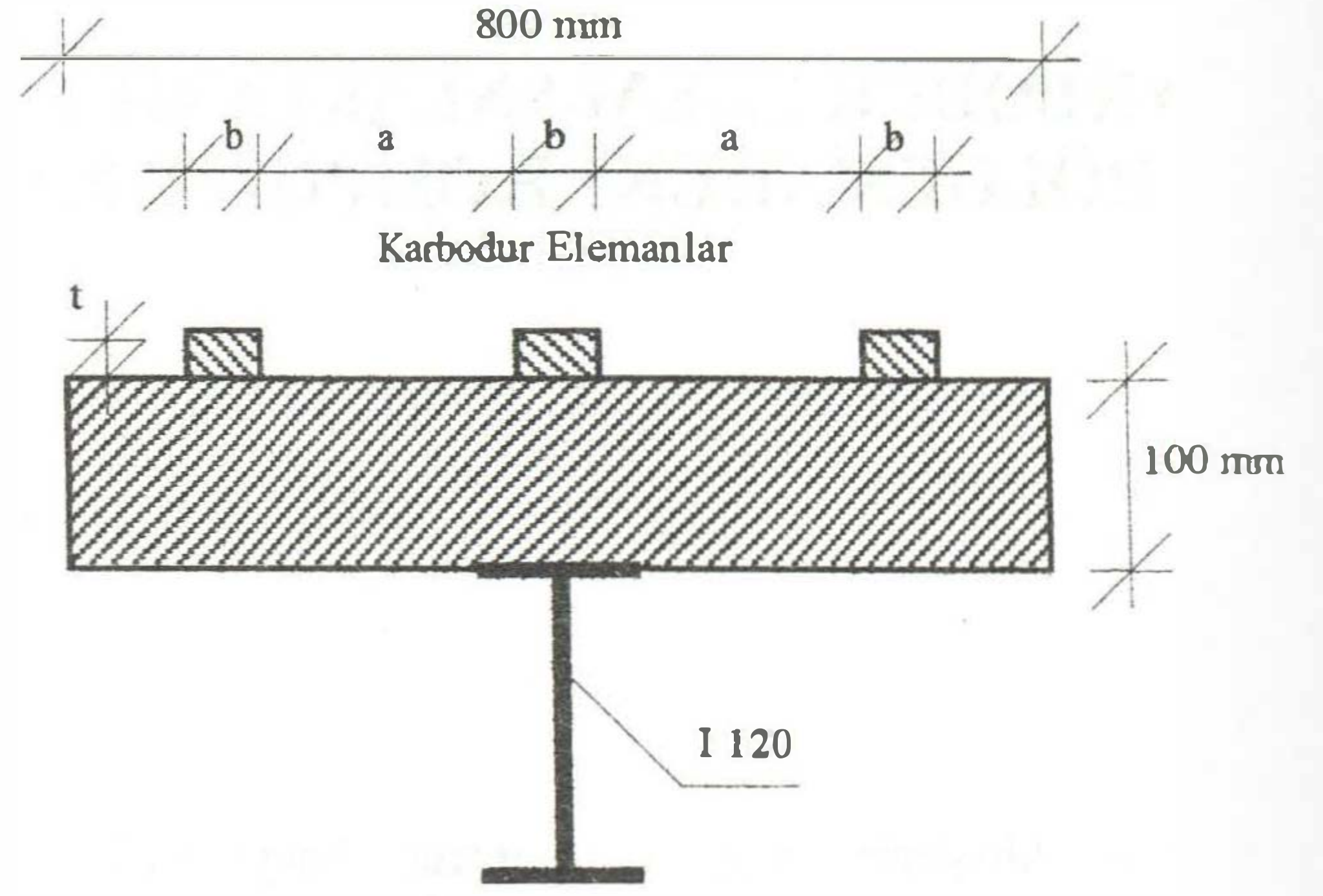
- Birinci görüşte negatif moment bölgesinde kompozit çalışmadan kaçınılır ve bu bölgedeki bütün moment gerekirse üst başlığı takviye edilen çelik enkesitlere taşınır. Bu ele alış negatif momentler bölgesinde karma çalışmayı reddeden ve yalnız çelik enkesiti göz önüne alan bir yaklaşımdır. Pratiğin teoriye uyabilmesi için, yani karma çalışmayı önleyebilmek için betonlama sırasında çelik enkesit başlığı hafifçe ziftlenebilir.
- İkinci görüşte karma enkesit hesabı negatif moment bölgesinde de sürdürülür. Bu bölgede üstteki betonarme plak içerisine kirişin boyuna doğrultusunda devam eden mesnet donatıları konur ve betonarme plağın yalnız bu donatılarla çalışmaya katıldığı kabul edilir. Bu şekildeki ele alışta karma çalışma etkisi yine önemli bir ekonomi sağlayabilmektedir. Ancak betonun basınç dayanımı kullanılmamaktadır.

Yukanda açıklanan iki görüşten karma çalışmayı negatif momentler bölgesinde de göz önüne alan ikinci görüş günümüzde köprüler dışında daha çok rağbet görmektedir.

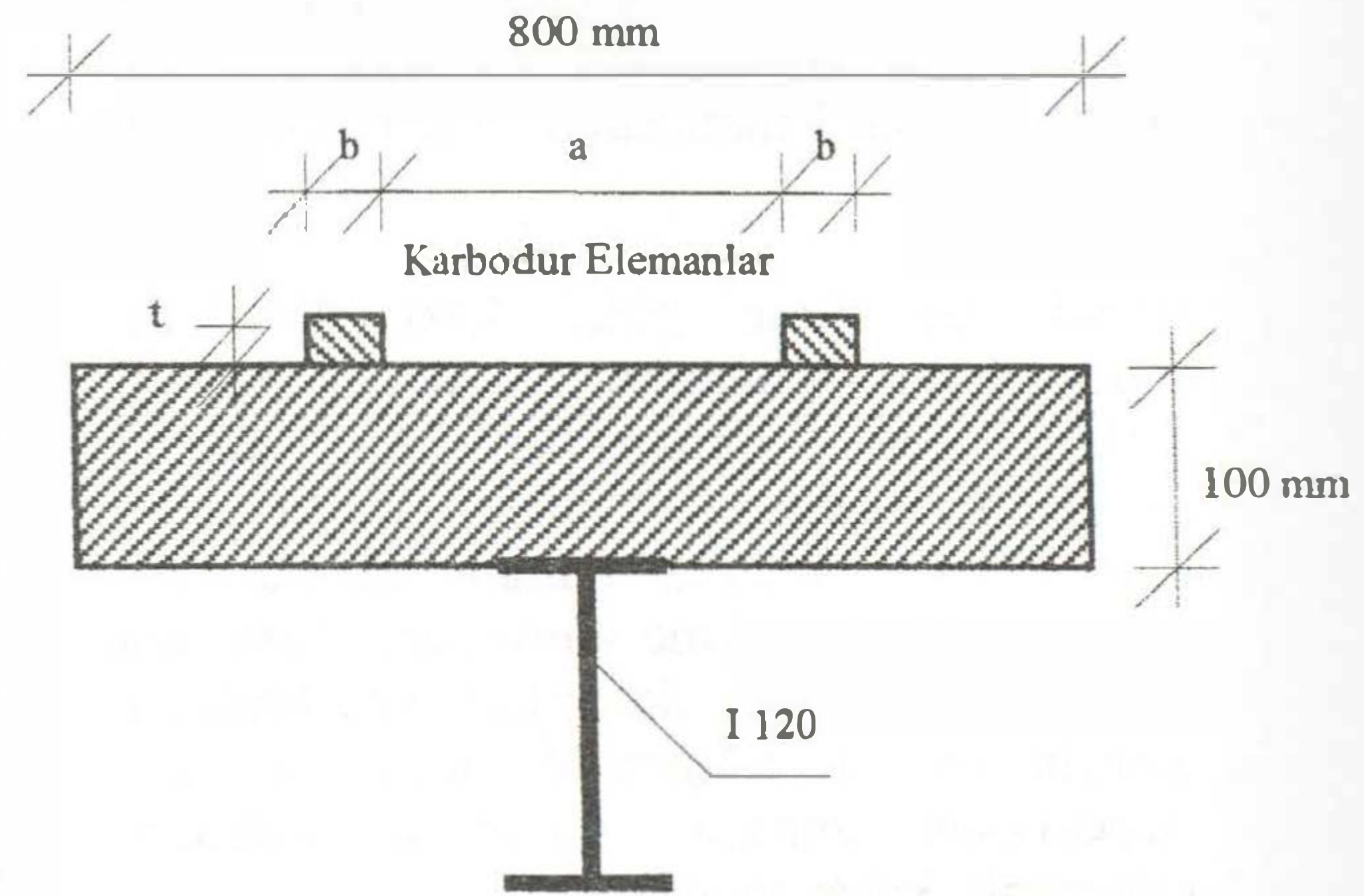
## II. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu deneysel çalışmanın amacı, negatif moment bölgesinde hazır betonarme plak ve çelik profilin birlikte çalışması, karbondur elemanlarla yapılan takviyenin boyut ve aralık değişiminin taşıma davranışını nasıl etkilediğinin araştırılmasıdır.

Bu amaçla, Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 ' deki hazır betonarme plak (3000.800.100 mm) ve I profilinden (I 120) oluşan karma kiriş (Kompozit kiriş) deneye tabi tutulmaktadır.



Şekil 2.1) Üç Karbondur Elemanlı Karma Kiriş Enkesiti



Şekil 2.2) İki Karbondur Elemanlı Karma Kiriş Enkesiti

Ayrıca bu deneysel çalışmanın diğer bir amacı ise ülkemizde yeni kullanılmaya başlanan kompozit kirişlerde negatif moment bölgesinde taşıma gücünü arttıran karbondur elemanlarının ve çelik profil ile betonarme plak arasında bağlantıyı sağlayan epoksi reçinelerinin karakteristik değerlerinin saptanması ve inşaat sektöründe yeni birer güçlendirme malzemesi olan karbondur elemanları ve epoksi reçineleri hakkında detaylı bilgilere sahip olabilmektir.

Karbondur elemanlarının ve epoksi reçinelerinin kompozit kirişin negatif moment bölgesindeki taşıma gücünü ve taşıma davranışını nasıl etkilediğinin araştırılmasıdır.

Konu ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Genelde yapılan çalışmalar bilgisayar destekli teorik çalışmalar olmaktadır. Özellikle deprem kuşağı üzerinde bulunan

ülkemizde bu konuda yapılan deneysel çalışmaların önemi bir kat daha artmaktadır. Özellikle depremde hasar görmüş veya taşıma kapasitesi yeterli gelmeyen kompozit kirişlerin takviye edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu alanda karbodur elemanlar ve epoksi reçineleri görevlerini tam anlamıyla yerine getirmektedir. Bu nedenle ülkemizde böyle bir çalışmanın yapılması (özellikle deneysel olarak) büyük önem arz etmektedir.

Epoksi reçinesi ve karbodur elemanlarının kullanılmalari durumunda kompozit kirişlerin negatif moment bölgesinde davranışlarını inceleyen teorik ve deneysel çalışmalar incelenirken; takviye edilmiş veya edilmemiş kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki taşıma davranışlarını inceleyen kaynaklar araştırılacaktır.

I. Gilbert ve M.A. Bradfort [2] tarafından yapılan çalışmada, servis yükleri altındaki sürekli kompozit kirişlerin davranışlarını inceleyen analitik bir model tanımlanmıştır. Her kiriş kompozit davranış gösteren I profili ve üzerinde betonarme plak bulunan kesitlerden oluşmaktadır. Bu yayında negatif moment bölgesindeki betonarme plakta meydana gelen çatlamlar analitik olarak tarif edilmiştir. Yük altında kompozit kirişin zamana bağlı davranışları incelenmiş ve yapılan bu deneylerde analitik ve deney sonuçlarının birbirine çok yakın çıktığı gösterilmiştir.

D.J. Oehlers ve G.S. Sved' in [3] çalışmasında, çelik ve betonarme kompozit kirişlerdeki kayma bağlantılarının duktilitesi ve karma kirişin eğilme davranışı incelenmektedir. Kayma bağlantı elemanlarının tasarlanması ve bu elemanlardaki maksimum ve minimum kuvvetlerin tespiti, limit durumdaki davranışını inceleyen bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemin her şekildeki kompozit kiriş kesitlerine, her açıklığa ve farklı yükleme durumlarına uygulanabilirliği ortaya konulmuştur.

T.S. Arda ve N Mengene [4] tarafından yapılan deneysel çalışmada, beş farklı beton, dört değişik mesnet donatısı, 3 m ve 5 m gibi birbirinden oldukça farklı iki tip açıklık, üç değişik boyutta çelik profilden oluşan kompozit kirişlerin taşıyabileceği maksimum yük kapasiteleri, yapısal deformasyonlar ve taşıma davranışları konusunda geniş deney sonuçları sunulmuştur.

A.N. Yelgin, H. Kasap ve Z. Özyurt [5] tarafından yapılan deneysel çalışmada, negatif moment bölgesinde hazır betonarme plaklı kompozit kirişlerin yapısal davranışları incelenmiş ve çıkan deney sonuçları ile teorik sonuçların uyum sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca hazır betonarme plak ve çelik profilin birlikte çalışması durumunda ara bağlantı elemanlarının aralık ve boyutlarındaki değişimin taşıma gücünü nasıl etkilediği araştırılmış ve öneriler yapılmıştır.

### III. KESME KUVVETİ - EĞİLME MOMENTİ ARASINDAKİ İLİŞKİ

Kompozit kirişlerde hesaplanacak T kesme kuvveti, emniyetli tarafta kalan bir yaklaşımla sadece çelik profil tarafından karşılanacağı kabul edilir. Çelik yapıların plastik analizi hesabında TS 456 1 standardına göre[6],

$$T_{pl} = 0,52 \cdot \sigma_F \cdot t \cdot h_g \quad (3.1)$$

bağıntısıyla kesitin plastik kesme taşıma yükü elde edilir. Kesite tesir eden ağırlıklı yüke göre hesaplanmış T kesme kuvveti her zaman,

$$T \leq 0,3 \cdot T_{pl} \quad (3.2)$$

olmak zorundadır. Bu durumda moment değerinde herhangi bir azaltmaya gidilmez, yani pozitif ve negatif moment taşıma kapasitelerinde bir indirme söz konusu olmamaktadır. Şayet,

$$T > 0,3 \cdot T_{pl} \quad (3.3)$$

olur ise profil gövde kalınlığı t yerine aşağıdaki bağıntı ile azaltılmış olarak hesaplanan t' gövde kalınlığı alınır.

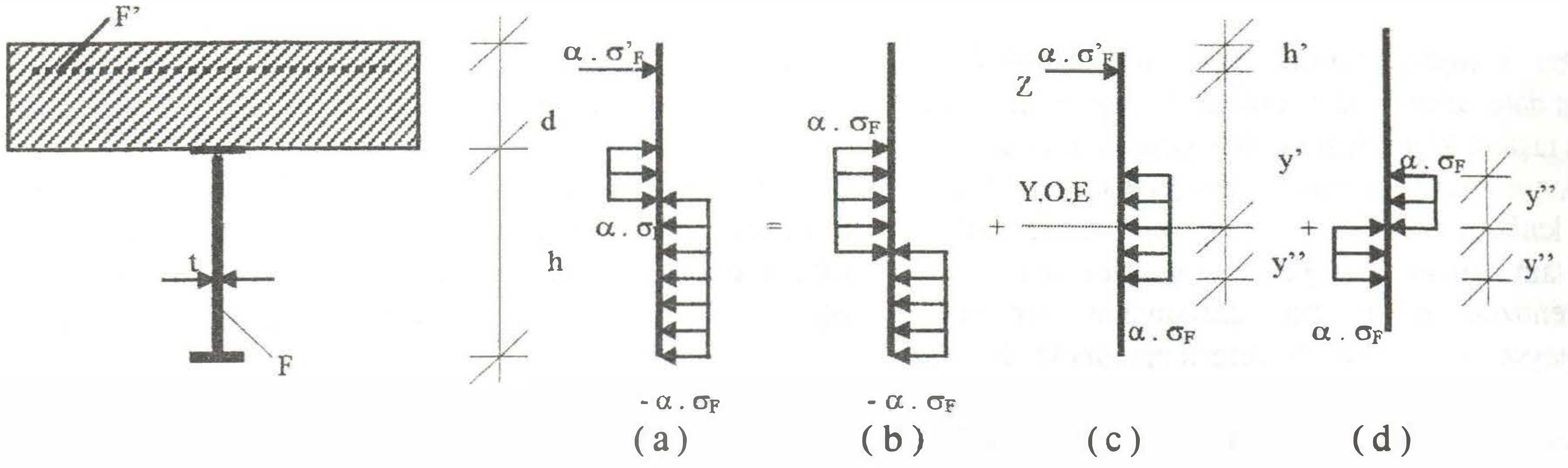
$$t' = t \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{T}{T_{pl}} \right)^2} \quad (3.4)$$

Söz konusu kesitin taşıyabileceği pozitif veya negatif plastik moment kapasiteleri bu azaltılmış profil gövde kalınlığı dikkate alınarak hesaplanır.

### IV. NEGATİF MOMENT BÖLGESİNDE KOMPOZİT KİRİŞ HESABI

Kompozit kirişlerin sürekli kiriş olarak kullanılmalari halinde, iç mesnetler bölgesinde negatif moment meydana gelir. Negatif moment etkimesi durumunda, kompozit kirişin kesitinin çekme bölgesinde kalan betonun çatlayacağı ve üzerindeki yükü karşılayamayacağı bellidir.

Bu sebeple, negatif moment bölgesinde kompozit kiriş (Şekil 4.1) çalışmasından imkanlar ölçüsünde kaçınılmalıdır. Şayet bu mümkün olmuyorsa, üst başlığı da çelik profillerle takviye edip bütün moment çelik profillere taşıtılmalıdır.



Şekil 4.1) Negatif Moment Bölgesinde Karma Kiriş Davranışı

Diğer bir çözüm ise, kompozit kiriş hesabı negatif momentler bölgesinde de devam ettirilir. Negatif moment bölgesinde betonarme kesitin boyuna doğrultusunda giden mesnet donatıları betonarme kesitin üst tarafına konularak, söz konusu bu momentin oluşturduğu çekme kuvvetinin donatılar tarafından karşılanması istenir. Böyle bir kompozit kiriş çalışmasında kaymayı ve kalkmayı önleyici bağlantı elemanlarının bu bölgede kullanılması gereklidir[1].

Negatif moment bölgesinde çalışan kompozit kirişin gerilme diyagramları Şekil 4.1' de görülmektedir. Bu diyagramlar dikkatlice incelenirse üç ayrı durumun bileşkesi olarak kabul edilebilir (a). (b) yalnız çelik enkesitin taşıyabileceği plastikleşme momenti  $M_{pl}$  belirlenir. Daha sonra mesnet donatılarının yüzey yarılmalı eksenin ortasında diyagram işaret değiştirmektedir. (c) mesnet donatısının yüzey yarılmalı eksene göre  $\Delta M_1$  momentine katkısı ve (d)  $\Delta M_2$  eksen farkı dengeleme momentidir.

Kesitin plastik mukavemet momenti,

$$W_{pl} = \int_{Alan} |y| dF = S_{xo} + S_{xu} \quad (4.1)$$

olur.

Kesitin plastik moment kapasitesi,

$$M_{pl} = \alpha \cdot \sigma_F \cdot W_{pl} \quad (4.2)$$

olarak hesaplanır. Burada,  $\alpha$  = Güvenlik derecesi[1] [İngiliz (CP117 ve CP 110), A.B.D. (AASHTO) ve Alman (DIN 1078 "Richtlinien für Stahlverbundträger") yönetmelikleri güvenlik derecesini 1, Avrupa Çelik Konvansiyonu "ECCS" güvenlik derecesini 0,87 ~ 1 arasında vermektedir] ve  $\sigma_F$  = Akma gerilmesidir.

Betonun çekme bölgesindeki donatı tarafından taşınacak kuvvet,

$$Z = \alpha \cdot \sigma'_F \cdot F' \quad (4.3)$$

bulunur. Burada,  $\sigma'_F$  = Yapı çeliğinin akma gerilmesi ve  $F'$  = Donatı kesit alanıdır.

Beton çekme bölgesindeki donatı tarafından alınacak moment,

$$\Delta M_D = Z \cdot y' \quad (4.4)$$

olarak hesaplanır.

$$y'' = \frac{Z}{2t \cdot \alpha \cdot \sigma_F} \quad (4.5)$$

Eksen farkı dengeleme momentini,

$$\Delta M_E = \alpha \cdot \sigma_F \cdot t \cdot y''^2 \quad (4.6)$$

olarak bulunur. Kompozit kirişin taşıyacağı toplam moment,

$$|-M| = M_{pl} + \Delta M_D - \Delta M_E \quad (4.7)$$

olarak hesaplanır. Mesnetlerdeki plastik şekil değiştirmelere aşırı derecede engel olarak plastik sistem hesabını geçersiz kılmamaları için  $F'$  donatısı fazla artırılmamalıdır.

## V. KARMA KİRİŞLERDE BİRLİKTE ÇALIŞMA YI SAĞLAYAN KAYMA VE AYRILMA BAĞLANTILARI

Kompozit kirişlerde kayma bağlantılarının amacı, hazır betonarme plak ile çelik profili birbirine bağlamak ve yekpare olarak söz konusu kirişin çalışmasını temin etmektir. Kompozit kirişlerde yük altında betonarme plak ile çelik profil arasında oluşan kaymaya mani olmak, böylelikle meydana gelen kayma kuvvetlerini emniyetle aktarmaktır. İkinci görevi ise, kompozit kirişin yük

altında yapacağı şekil değiştirmeler sonucu oluşabilecek beton plağın çelik profilden ayrılmasını yada kalkmasını önlemektir[1].

Bu amaçla kayma kuvvetinin aktarılmasını sağlayacak uygun kayma bağlantılarının ebatlarının ve sayılarının hesapla bulunması gerekmektedir. Kompozit kirişlerde kayma bağlantıları rijit ve eğilebilen olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Rijit türde, kayma bağlantıları kayma ve kalkmayı önleme gibi iki farklı elemana pay edilmektedir. Kayma kuvveti, dik doğrultudaki yüzeylerde oluşan beton basınç gerilmesi ve kaynaklardaki kesme zorlamalarıyla alınmaktadır. Eğilen kompozit kirişlerde de her iki görev gene aynı elemanlar tarafından karşılanmaktadır.

Bir kayma elemanının taşıma kapasitesi, deneysel olarak araştırılmalıdır. Bu amaçla itip - çıkarma deneyi çok sıklıkla kayma bağlantıları taşıma kapasiteleri tayininde kullanılan bir deney yöntemidir.

Moment maksimum noktası ile moment sıfır noktaları arası olarak sınırlandırılacak kayma bölgesine konulması gerekli kayma bağlantı sayısı (Plastik hesaplama yöntemi dikkate alındığında)

$$m = \frac{H}{\alpha_K \cdot H_{1u}} \quad (5.1)$$

olarak hesaplanır. Burada, H söz konusu kayma bölgesindeki kayma kuvveti,  $\alpha_K$  yaklaşık 0,85 civarında alınan kayma emniyet katsayısı,  $H_{1u}$  bir kayma elemanının aldığı kayma kuvvetidir. Negatif moment bölgesinde H kayma kuvveti, hazır betonarme plağın çekme donatısının taşıyabileceği Z çekme kuvveti,

$$Z = \alpha \cdot \sigma_F \cdot F' \quad (5.2)$$

olarak alınacaktır. EC4, kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki kayma elemanlarının, beton tablaya konulan boyuna mesnet donatısının çalışma uzunluğuna eşit bir bölgeye yerleştirilmesini ve kayma bağlantı aralıklarının elastik teoriye göre hesaplanmış kayma kuvvetinin fonksiyonu olarak seçilmesini tavsiye etmektedir[7].

## VI. KOMPOZİT KİRİŞDE BETONUN, ÇELİĞİN VE KARBODUR ELEMANLARIN YAPIŞMASINI SAĞLAYAN EPOKSİ REÇİNELERİ

Özellikle 20. yüzyılın sonlarında memleketimizde de araştırılmasına başlanılan epoksi reçineleri, günümüzde giderek kullanımı yaygınlaşan bir yapıştırma malzemesidir[8]. Epoksi reçinelerinin araştırılmasına, Amerika ve Avrupa ülkelerinde bu yüzyılın ilk yıllarında

başlanmış, kısa bir süre içerisinde de kaplama, tamir ve yapıştırma malzemesi olarak literatürde yerini almıştır.

Epoksi reçineleri, uygulamalarındaki kolaylık ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı çok kullanılan malzemelerdir. Epoksiler, göstermiş olduğu yüksek adezyon, sertleşirken az büzülmesi, geniş sıcaklık aralıklarında çabuk sertleşebilme ve uygulandıktan kısa bir süre sonra hizmet verebilme gibi avantajlara sahiptir. Malzemenin pahalı olmasında dolayı çok dikkatli olunmalı, teknik yönden yeterli ve tecrübeli kişilerce uygulanmalıdır.

Reçine türlerini dört ana grupta incelemek mümkündür. Epoksi reçinesi, poliüretanlar, poliesterler ve akriliklerdir. Epoksiler, reçine türleri içinde en çok tercih edilmektedir.

Kompozit kirişlerde yapıştırıcı olarak kullandığımız epoksi reçinelerinin yapılan deneyler sonucu elde edilen karakteristik özellikleri : basınç mukavemeti  $65 \text{ N/mm}^2$ , çekme mukavemeti  $20 \text{ N/mm}^2$ , betona yapışma mukavemeti  $3,5 \text{ N/mm}^2$  ve çeliğe yapışma mukavemeti  $20 \text{ N/mm}^2$  olarak elde edilmiştir.

## VII. GÜÇLENDİRME AMACIYLA KULLANILAN KARBODUR ELEMANLAR (SİKA CARBODUR)

Karbon lifleri ile güçlendirilmiş polimer ve epoksi reçinesi kombinasyonlu yapı onarım ve güçlendirme sistemleridir. Betonarme, karkas ve ahşap yapı elemanları için güçlendirme sistemlerinden biri olan karbodur elemanlar pultrasyon ile imal edilirler. Bu sürekli imalat işleminde düzinelerce karbon bant lifleri, epoksi reçinesi içine dırılmakta ve bir kalıp boyunca çekilerek şekillendirilmektedir. Elde edilen sonuç malzemenin önemli özellikleri bulunmaktadır. Tüy kadar hafif, süper güçlü, yorulmaya karşı mükemmel bir dayanımı ve aşınmama özellikleri vardır.

Karbodur elemanların bant doğrultusunda yaklaşık  $3000 \text{ N/mm}^2$  gibi yüksek bir çekme dayanımı bulunmaktadır. Pultrasyon, bantların 5000 metreye kadar sarılmasına izin verir.

Enine yüklerin etkimesi durumunda boyuna çatlama meydana gelebilir. Fakat bu çatlama güçlendirme elemanlarının boyuna çekme dayanımlarını etkilemez. Kesme dayanımı yükün nakledilmesi ile ilgili olarak önemli olabilmektedir. Çoğu durumlarda bu uygun değildir. Çünkü betonun dayanımı kritik etkidir.

Güçlendirme malzemesi olan karbodur elemanların yapıştırılması için Skadur30 epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Karbodur elemanların hafifliği ve epoksi yapıştırıcısının stabilitesi ile bantları herhangi bir kaldırma, destekleme ve bağlama aracı olmaksızın tesis edilebilmelerine imkan vermektedir. Deneylerde kullanılan karbodur elemanların kalınlıkları  $t = 1,2 \text{ mm}$  ve genişlikleri  $b = 50 \text{ mm}$  olarak seçilmiştir.

Karbodur elemanların temel özellikler şu şekilde belirtilebilir;

- İhmal edilebilir bir ağırlıkları vardır. Yapı elemanına ilave bir yük getirmezler.
- Uzun periyotlu korozyona direnç önemli bir faktördür. Sika karbodur plakaları yüksek kimyasal dayanıma sahiptir. Paslanmaya özellikleri vardır.
- Çok yüksek çekme dayanımları vardır. Bu çekme dayanımları bant doğrultusunda yaklaşık 2800 N/mm<sup>2</sup> gibi yüksek bir değer alabilmektedir. Kırılma anında bu çekme dayanımı ortalama 3050 N/mm<sup>2</sup> gibi bir değere ulaşabilmektedir. Elastisite modülü 165000 N/mm<sup>2</sup> dir.
- Ekonomiktirler. Her boyda kullanılabilirler. Sınırlandırılmış alan ve aralıklarda güçlendirme işlerinde kullanılabilirler. Yorulmaya karşı mükemmel bir dayanımları vardır. Süper güçlüdürler. Aşınmaya özellikleri mevcuttur. Herhangi bir kaldırma, kenetleme ve destekleme tertibatına gerek duymaksızın tesis edilebilirler.
- Estetik sebeplerde dolayı karbodur elemanlar ince bir harç, sıva veya ahşap tabaka ile kaplanabilirler.
- Sadece bant doğrultusunda yük taşıma özellikleri vardır. Düşük kesit kalınlığına sahiptirler. Değişik elastisite modüllerinde imal edilebilirler.

Karbodur elemanların kullanım alanları;

- Beton kalitesi arttırmak için kullanılırlar.
- Mevcut olan yapılarda değişik kullanım nedenleri için uygulanabilirler.
- Yapı elemanlarının planlanmasında ve inşası sırasında meydana gelen hataları düzeltmek için kullanılırlar.
- Yapının stabilitesini arttırmak ve yapı elemanlarında meydana gelebilecek çeşitli hasarları önlemek için uygulanabilirler.
- Mevcut olan yapı elemanının yük taşıma kapasitesini arttırmak ve yapı elemanının geometrisini düzeltmek için kullanılabilirler.
- Yorulmaya ve yapı elemanlarının yetersiz donatılmasından dolayı yapı elemanında artan deformasyonların yapı elemanının kullanımını etkilediği durumlarda yapı elemanını güçlendirmede uygulanabilirler.
- Karbodur sistemi betonarme ve ahşap yapıları aşağıdaki durumlarda güçlendirmek için kullanılırlar;
  - Yük artışı
  - Yapı elemanlarının zarar görmesi
  - Yapılması istenilen değişiklikler
  - Yapısal sistemdeki değişiklikler
  - Dizayn ve imalat hataları

## VIII. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Deneylede kullanılacak olan 4 adet kirişin açıklıklan 3 metredir. Karma kiriş oluşturulurken çelik (I 120) profili ile hazır betonarme plak arasındaki kompozit çalışmayı sağlamak üzere epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Epoksi reçinesi uygulaması yapılırken uygulama esaslarına özenle dikkat edilmektedir. Yapıştırma işleminden önce çelik (I 120) profili ve kayına bağlantı elemanları olan çelik levhaların epoksi ile yapıştırılacak yüzeyleri zımpara ile zımparalanmakta ve daha sonra zımpara tozları elektrik süpürgesi yardımıyla ortamdan uzaklaştırılmaktadır.

Epoksi reçinesi, hazırlama kurallarına uygun olarak A ve B komponentlerinden oluşan iki bileşen A / B = 1 / 3 oranı dikkate alınarak temiz bir kaba konup açık gri renk alıncaya kadar ve homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra spatula yardımı ile daha önce temizlenmiş olan yüzeylere sürülmektedir. Böylelikle elemanların birbirine iyice yapışması sağlanmaktadır.

Karbodur elemanlar yapıştırılmadan önce yapıştırılacak yüzeyler tozdan ve yağdan arındırılmaktadır. Hazır betonarme plak yüzeyi ise taş keski ve zımpara ile düzleştirilmektedir. Bu yüzeylerin üzerindeki tozlar elektrik süpürgesi yardımıyla temizlenmektedir. Bu işlemler yapıldıktan sonra epoksi reçinesi karışımı hazırlanarak hem karbodur elemanlara ve hem de hazır betonarme plak yüzeylerine sürülmektedir. Daha sonra hava boşluğu kalmayacak şekilde birbirine yapıştırılmaktadır. Tablo 9.1' de deney numunelerinin kesit özellikleri görülmektedir.

Tablo 9.1) Deney Numuneleri Kesit Özellikleri

Epr. No	Beton Boyutu (cm)	Çelik Profil Cinsi	Kay. Bağ. Sayısı	CFRP* Sayısı	CFRP* Aralığı a (cm)
EPR1	300.80.10	I 120	6	3	10
EPR2	300.80.10	I 120	6	3	15
EPR3	300.80.10	I 120	8	2	20
EPR4	300.80.10	I 120	8	2	25

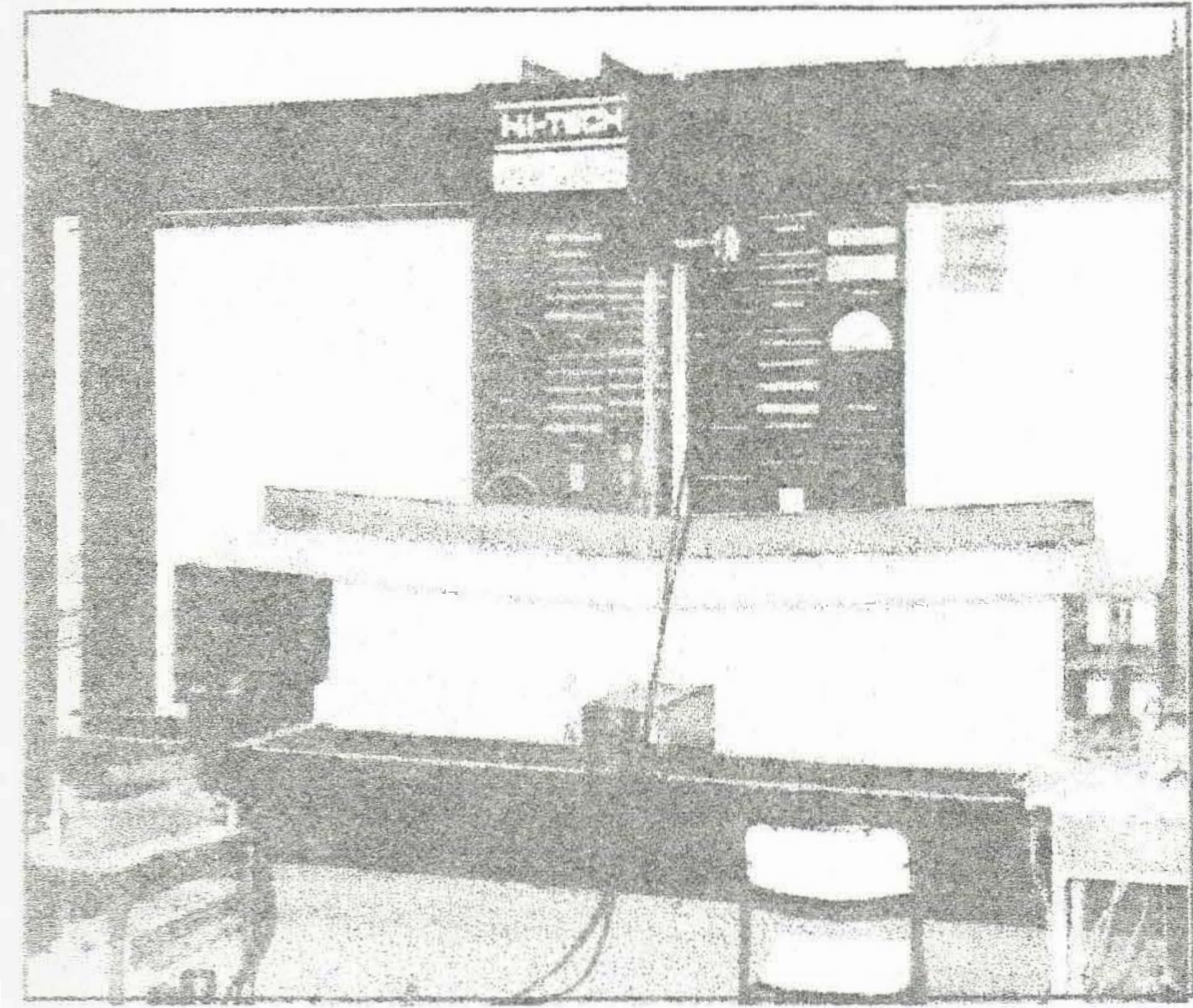
\* Karbodur

## IX. DENEY DÜZENİ VE DENEYLERİN YAPILIŞI

Deneyleler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylelerin gerçekleştirilmesi için HI-TECH MAGNUS marka deney makinesi ve deney çerçevesi kullanılmıştır. Bu cihaz hidrolik presle donatılmış ve 200 kN yük verebilme kapasitesine sahip bulunmaktadır(Şekil 9.1).

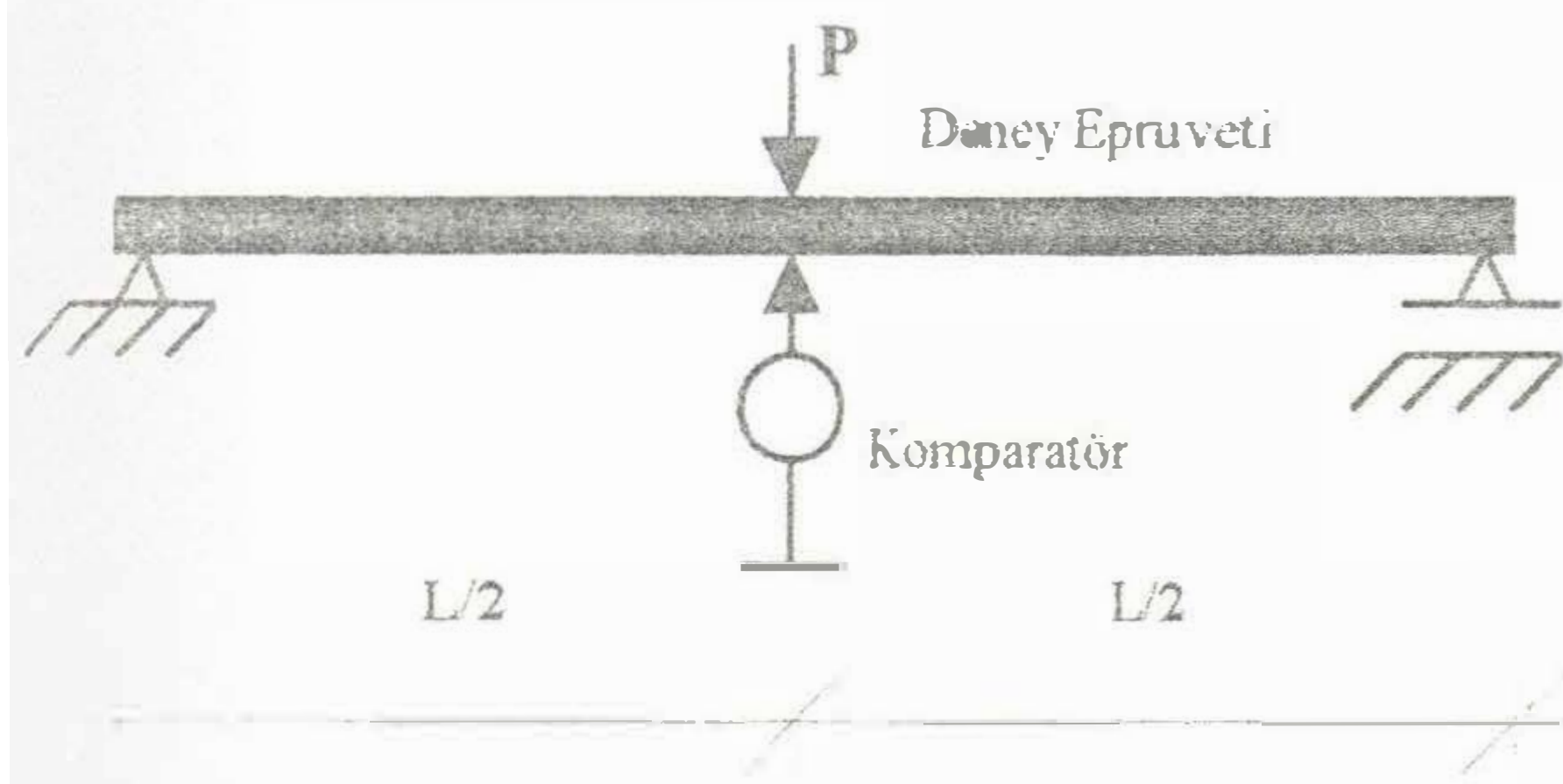
Kompozit kirişler bulunduğu yerden 3 ton kapasiteli forklift tarafından kaldırılarak deney çerçevesi üzerine yerleştirilmektedir. Deney çerçevesine yerleştirilen epruvetler 200 kN yük verebilme kapasitesine sahip makine ile yüklenmeye başlanılmıştır. Kirişlere yük

kırılma anına ve kırılmadan sonrasına kadar (Göçme durumu) verilmeye devam edilmektedir.



Şekil 9.1) Deney Esnasında Çekilmiş Fotoğraf

Karbodur elemanlarla güçlendirilmiş ve epoksi reçinesi ile yapıştırılmış kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki davranışlarını incelemek için söz konusu kompozit kirişlerde negatif moment oluşturmak üzere hazır betonarme plak altta ve çelik profil üstte kalacak şekilde ve mafsallı mesnetli olarak deney çerçevesine yerleştirilip ortadan P tekil yükü ile yüklenmektedir. Denevlerde epruvetlerin kırılma anında taşıyacakları yükler yanında, her yük kademesinde açıklık ortasındaki düşey deplasmanlar da ölçülmektedir. Kiriş ortasının yük altında yapmış olduğu çökme(sehim) miktarları 1 / 100 hassasiyetli komparatörler yardımıyla ölçülmektedir (Şekil 9.2).



Şekil 9.2) Kirişlerin Yüklenme, Mesnetlenme ve Ölçme Şekilleri

## X. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmada kullanılan hazır betonarme plaklı kompozit kirişlerin kesit değerleri ve deney sonuçları Tablo 10.1' toplu olarak görülmektedir.

Tablo 10.1) Kompozit Kiriş Kesit Değerleri ve Deney Sonuçları

Epr. No	Beton Kesiti (cm)	Çelik Profil Cinsi	Kay. Bağ. Sayısı	CFRP* Aralığı a (cm)	Taşıma Yükü (kN)
EPR1	300.80.10	I 120	6	10	74
EPR2	300.80.10	I 120	6	15	72
EPR3	300.80.10	I 120	8	20	70
EPR4	300.80.10	I 120	8	25	68

\*Karbodur

Yapılan deneysel çalışma sonucunda[9], deneye tabi tutulan kompozit kirişlerde kullanılan hazır betonarme plağın çatladığı gözlenmiştir. Beton çatladıktan sonra da kompozit kiriş yüklenmeye devam edilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın amaçlarında biri de yeni güçlendirme malzemesi olan karbodur elemanların taşıma kapasitene etkisinin araştırılması olmaktadır. Kompozit kiriş hazırlanırken, epoksi reçinesi ile hazır betonarme plak üzerine yapıştırılan karbodur elemanlarının aralık ve adet değişimi kompozit kirişin taşıma kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Karbodur elemanlarının aralıklarının değişimi, kompozit kirişin negatif moment bölgesindeki taşıma kapasitesini, her 5 cm aralık değişimi için 2 kN arttığı Tablo 10.1' de görülmektedir. Yani, 10 cm aralıklarla karbodur elemanlar yapıştırılan EPR1 kirişinin taşıma yükü 74 kN iken, 15 cm aralıkla yapıştırılan EPR2 kirişinin taşıma kapasitesi 72 kN olmaktadır. Aynı durum, 20 cm aralıklarla karbodur elemanlar yapıştırılan EPR3 kirişinin taşıma yükü 70 kN iken, 25 cm aralıkla yapıştırılan EPR4 kirişinin taşıma kapasitesi 68 kN olmaktadır.

Her iki tip kirişten de görüldüğü gibi, 5 cm' lik aralık değişimi için 2 kN' luk bir taşıma kapasitesi değişimi meydana gelmektedir.

Dolayısıyla, karbodur elemanlarının aralıklarının artması, taşıma kapasitesini azaltmakta ve aralıkların azalması da taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Kompozit kirişlerin negatif moment bölgesinde karbodur elemanları ile yapılacak olan güçlendirmelerde yapı elemanlarının taşıma kapasitesi ile karbodur elemanların aralıkları arasında ters bir orantının bulunduğu söylenebilir.

Deneysel çalışma sonunda, bütün denet numunelerinde kompozit kirişi teşkil eden hazır betonarme plakta yükün uygulandığı orta bölgelerde eğilme çatlaklarının oluştuğu, mesnet bölgelerine yakın yerlerde ise kesme çatlaklarının oluşmadığı gözlenmiştir.

Her kompozit kiriş için yapılan sehim ölçmeleri belirli bir değere kadar orantılı olarak gitmekte ve göçme durumu birden meydana gelmektedir.

Hazır betonarme plak ile karbodur elemanları arasında bağlayıcılık özelliği olan epoksi reçinesinin yapışma özelliğinin çok iyi olduğu, epoksi reçinesinin hazır betonarme plaktan ayrılırken beraberinde betonarme plağın içindeki donatının pas payındaki betonu sıyırdığı

gözlenmiştir. Bu da ayrılmanın epoksi reçinesinden değil, betonun çekme mukavemetinin sıfır olmasından dolayı betondan olduğu görülmektedir.

Ayrıca bu deneysel çalışma ile hazır betonarme plak ile çelik profil (I 120) arasında kullanılan epoksi reçinesi çeliği çeliğe yapıştırdığı için atımların olmadığı gözlenmekte, bu da bize epoksinin çeliği çeliğe yapıştırma özelliğinin çeliği betona veya karbodur elemanı betona yapıştıma özelliğinden daha iyi olduğunu göstermektedir. Yani epoksi reçinesi çeliği çeliğe daha iyi yapıştırmaktadır. Bu da deney epruvetleri imal edilirken betonu çeliğe değil, çeliği çeliğe yapıştırmamızın anlamlı olduğu sonucuna götürmektedir. Nitekim imalat bu şekilde yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmanın diğer önemli bir amacı da, inşaat sektöründe yeni birer malzeme olan epoksi reçineleri ve karbodur elemanları hakkında detaylı bilgiler verebilmek idi. Yapılan bu deneysel çalışma ile bu malzemelerin özellikleri, kullanım alanları ve taşıma kapasiteleri hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. Bu malzemelerin güçlendirme (takviye) ve onarım işlerinde çok rahat bir şekilde uygulanabilirliğini ortaya çıkarmaktadır. Kompozit kirişin şekil değiştirmesi esnasında betonarme plağın çelik profilden ayrılıp kalkmasını önemli oranda önlediği görülmüştür.

Kompozit kirişlerin negatif moment bölgesinde güçlendirme elemanları olarak kullanılan karbodur elemanlarında kopmaların meydana gelmediği, fakat uç bölgelerde karbodur elemanların betondan ayrıldığı görülmüştür. Karbodur elemanlar ayrılırken epoksi reçinesinden değil, betonarme plağın pas payı altındaki betonu yüzerek olduğu gözlenmiştir. Buradan şu öneri yapılabilir; Beton kalitesini arttırmakla karbodur elemanların betona daha iyi yapışması sağlanabilmekte, bu sayede kompozit kirişin taşıma kapasitesinde artışın daha fazla olacağı görülmektedir.

## XI. KAYNAKLAR

- [1] Arda, T.S., Yardımcı, N., Çelik Yapıda Karma Elemanların Plastik Hesabı, Kurtiş Matbaası, (1991).
- [2] Gilbert, I., Bradford, M.A., Time-Dependent Behaviour of Continuous Composite Beams at Service Loads, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, pp. 319-327, (1995).
- [3] Oehlers, J.D., Sved, G., Composite Beams with Limited-Slip-Capacity Shear Connectors, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, pp. 932-938, (1998).
- [4] Arda, T.S., Mengene, N., Strength of Composite Beams with Service Web Concrete Under

Negative Bending, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, pp. 1170-1174, (1995).

- [5] Yelgin, A.N., Kasap, H., Özyurt, M.Z., Negatif Moment Bölgesinde Hazır Betonarme Plaklı Kompozit Kirişlerin Yapısal Davranışı, 9. Prefabrikasyon Sempozyumu Bildiri Kitabı, s. 137-150, (1998).
- [6] TS 4561, Çelik Yapıların Plastik Teoriye Göre Hesap Kuralları, (1980).
- [7] EC4, Eurocode4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, General Rules for Building, (1992).
- [8] Yelgin, A.N., Yelgin, H., Eğilme çubuklarının Epoksi ile Yapıştırılmış Bindirme Levhali Eklerinin Yapısal Davranışı, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 2, Sayı 2, s. 171-180. (1998).
- [9] Işık, E., Epoksi ile Yapıştırılan ve Karbodur Elemanları ile Takviye Edilmiş Kompozit Kirişlerin Negatif Moment Bölgesindeki Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, (1999).