

# KARBON LİFLERİ İLE TAKVİYE EDİLMİŞ KOMPOZİT KİRİŞLERİN NEGATİF MOMENT BÖLGESİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Özgür ÇETİN , A.Necati YELGİN

**Özet-**Kompozit kirişlerin negatif moment bölgesinde karbodur elemanlarla takviye edilmesi durumunda kompozit kirişin davranışı incelenmekte ve deney sonuçlarıyla SAP2000 bilgisayar programı kullanarak yapılan çözüm karşılaştırılmaktadır. Karbodur elemanların boyut ve aralıklarının değişiminin kompozit kirişin negatif moment bölgesinde taşıma davranışını nasıl etkilediği araştırılmakta ve öneriler yapılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler -** Kompozit Kiriş , Karbon Lifleri

## I . GİRİŞ

Günümüzde çelik iskeletli yapılar daha çok karma olarak projelendirilmektedir. Bunun başlıca sebebi , çeliğin taşıyıcı sistem malzemesi olarak yalnız başına kullanılması durumunda , maliyetin çoğu zaman diğer malzemedan üretilmiş taşıyıcı sistemlere göre daha yüksek çıkmasıdır . Öte yandan çok katlı çelik iskeletli yapılarda döşeme plaklarının çoğu zaman betonarme olması ve sistemin yangın mukavemetinin artırılması için tüm çelik elemanların betonla örtülmeleri , çelik yapıda betonu da mevcut kılmaktadır. Sayılan nedenlerle çeliğin yanında zaten bulunan beton ya da betonarme elemanların basınç mukavemetinden yararlanma fikri karma sistemlere götürmektedir.

Betonarme döşeme plakları ile çelik kirişlerin ortak çalıştırılmasıyla ortaya çıkan ka ma kirişler , üzerine serbestçe oturan bir betonarme plağı yalnız başına taşımaya çalışan çelik kirişlere göre daha ekonomiktirler.

Çünkü karma bir kirişte eğilmeden ileri gelen kuvvet çiftinin çekme bileşeni çelik profil tarafından , basınç bileşeni ise yalnızca betonarme plak , ve çelik profilin bir bölümü tarafından ortak olarak taşınmaktadır . Dolayısıyla çelik profilin eğilmenin basınç bileşenini taşımaktan ya bütünüyle ya da büyük ölçüde kurtulmaktadır . Betonarme plağın bir ölü yük 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 . Yani betona me tablalı kirişlere benzetilmesi de mümkün olan KARMA kirişler aynı taşıma gücüne sahip çelik kirişlerle mukayese edilirse çelik kirişin aynı konstrüksüyon yüksekliği şartı altında çok ağır , bu şart yok ise çok yüksek çıkacağı açıktır . Karma sistemler , sırf çelikten üretilmiş taşıyıcı sistemlere göre çok daha az çelik tükettiklerinden önemli bir ekonomi sağlamaktadırlar.

Kompozit kirişlerin negatif momentler bölgesinde hesabı için iki görüş mevcuttur. Birinci yaklaşım bileşik harekete meydan vermez ve momentin tamamı çelik enkesite taşınır. Bileşik hareketten tamamen kaçınmak için , çelik profilin üst başlığı üst başlığının üzeri beton dökülürken bitüm ile kapatılır. Bileşik hareketin gözönünde tutulduğu ikinci yaklaşımda , betonarme plak içerisine kirişin boyuna doğrultusunda devam eden mesnet donatıları konur ve betonarme plağın yalnız bu donatılarla çalışmaya katıldığı kabul edilir. Bu şekildeki ele alışıta karma çalışma etkisi yine önemli bir ekonomi sağlayabilmektedir ancak betonun basınç dayanımı dikkate alınmamaktadır. Bu yaklaşım köprü yapısını hariç olmak üzere günümüzde daha fazla kabul gö mektedir.

Bu çalışmada ele alınan kirişler . 3000x800x100 mm boyutlarındaki hazır bir betonarme plak üzerinde çelik profilden ( I 120 profili ) oluşmaktadır( Şekil 1). Karma kiriş hazırlanırken betonarme hazır plağın çelik profil ile bağlantısını sağlamak üzere epoksi reçinesi kullanılmaktadır.Hazır betonarme plak içerisine betonun karşılayamadığı çekme kuvvetlerini karşılamak üzere hesaplanmış çekme donatıları konulmaktadır. Ayrıca negatif moment bölgesinde karma kirişin taşıma gücünü

arttıracak boyut ve aralıkları değişen karbodür elemanlar kullanılmaktadır. Karma kiriş hazırlanırken kullanılan beton , çelik profil , epoksi reçinesi ve karbodür elemanların karakteristik değerleri hakkında detaylı bilgiler verilmektedir .

Gilbert ve M.A.Bradfort [1] 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.

R.P. Johnson kompozit kirişler üzerinde yaptığı incelemede [2] , testlerde moment-eğrilik bağıntılarının negatif eğilmede , bazı sekonder göçme şekillerinin genelde oluştuğu büyük eğriliklere varıncaya kadar , hesaplanmış eğriliklere çok yakın olduğunu saptamıştır. Pekleşme dolayısıyla bazı kayma bağlantıları aşırı yüklenmişlerdir ve kaymalar önceki deneylerden daha fazla meydana gelmiştir. Bu durum sehimleri artırmış , fakat moment taşıma gücüne etkisi az olmuştur. Sonuç olarak testler , negatif moment bölgesinde ve sekonder göçmelerde , özellikle döşemelerin boyuna kayma göçmesi ve mesnete yakın çelik kirişin plastik burkulması konularında , daha fazla araştırmaya gerek olduğunu göstermiştir.

S.Hamada ve J.Longworth incelemelerinde [3] , kompozit bir kirişte , akma (göçme) şartlarının , pozitif moment altında çeliğin akması ve betonun çatlamasıyla , negatif moment altında ise burkulmayla oluştuğunu , Alberta üniversitesinde basit kirişlerde negatif moment bölgesinde yapılan deneylerde kirişlerin büyük bir çoğunluğunun yerel burkulma sonucu göçtüğünü , çelik enkesitin başlığı için genişliğin kalınlığa oranının ve döşeme boyuna donatı miktarının başlık yerel burkulmasını etkileyen önemli faktörlerden olduğunu belirtmektedir.

T. Seno Arda ve N. Mengene tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada [4] 3mt. ve 5mt. açıklıklı betonarme plaklı ve çelik profilden oluşan kompozit kirişlerin taşıyabileceği maksimum yük kapasiteleri , yapısal deformasyonlar ve taşıma davranışları konusunda geniş test verileri sunulmuştur. Ayrıca kullanılan betonun ve çelik profilin karakteristik değerleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

F.Leonhardt , W.Andrae , R.Saul ve W.Harre [5] , iki sürekli titreşim deneyi ve bir kayma deneyini negatif moment bölgesinde gerçekleştirmişler ve deneylerin , işletme yükleri için , verilen aşırı yük altında beton plak ve çelik kiriş arasında kaymanın çok küçük kalması

Konu ile ilgili olarak çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Genelde yapılan çalışmalar teorik ağırlıklı olmaktadır.

gerektiği sonucunu verdiğini makalelerinde belirtmişlerdir.

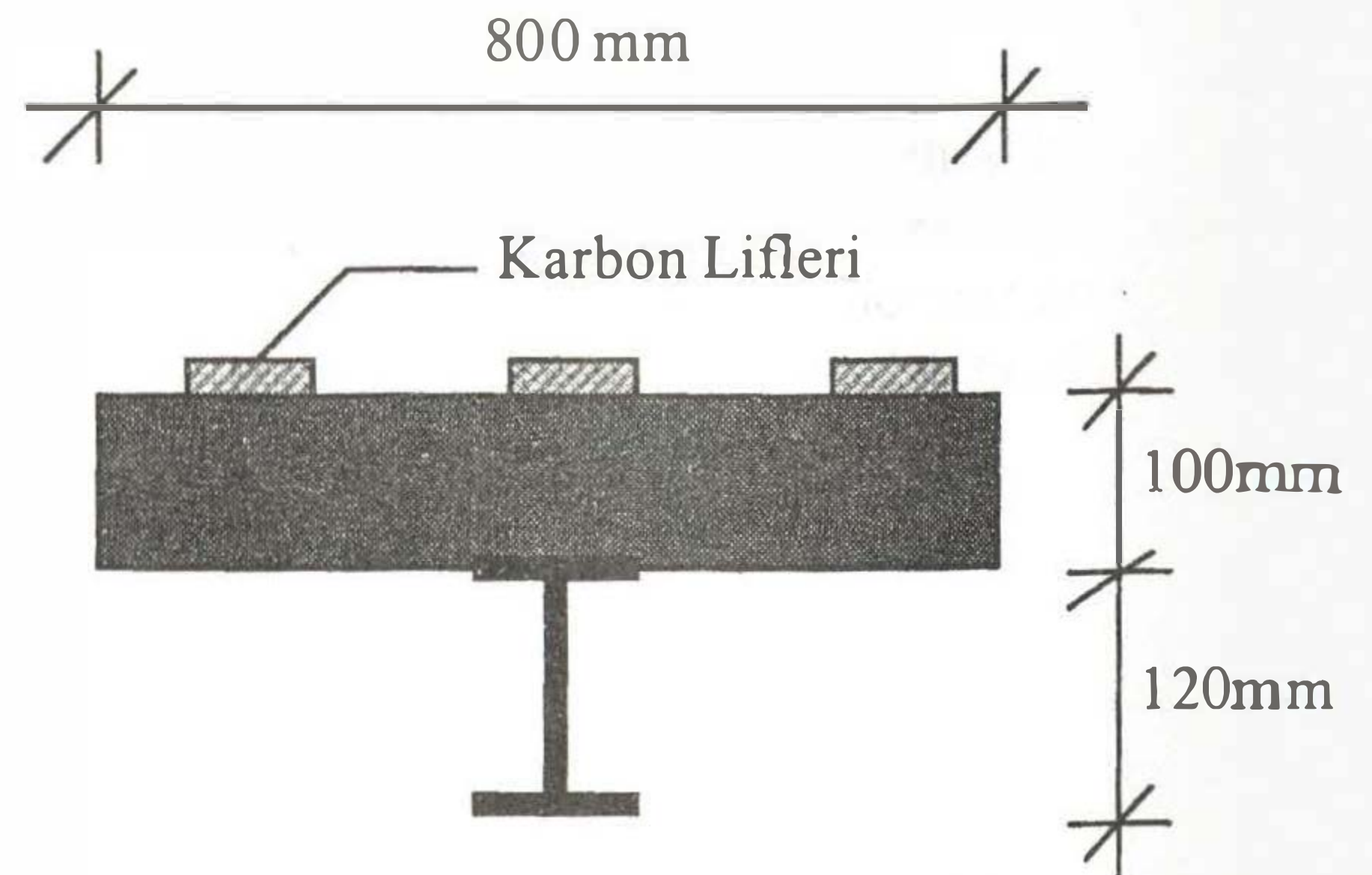
## II . AMAÇ

Bu çalışmada , Türkiye açısından önemi vurgulanan karma yapı elemanlarından , karma kirişin , negatif moment bölgesinde hazır betonarme plak ve çelik profilin birlikte çalışması konusunda ve karbodür elemanlar ile yapılan bindirme eklerinin boyut ve aralıklarının değişiminin taşıma davranışını nasıl etkilediği ve karma kirişin yük altında şekil değiştirme sonucu beton plağın çelik profilden ayrılıp kalkmasını önleme ölçüde önleyip önlemediğinin araştırılması yapılmıştır.

Bu amaçla Şekil 1 ' deki hazır betonarme plak ( 80 x 100 x 300 cm . ) ve I profilden ( I 120 ) oluşan karma kiriş deneye tabi tutulmaktadır . Deney sonucu elde edilen verilerle SAP2000 bilgisayar programında modellenerek yapılan teorik çözüm karşılaştırılıp uygunluğu incelenmiştir.

Ayrıca bu deneysel çalışmanın diğer bir amacı ise karma kirişin negatif moment bölgesindeki taşıma gücünü arttırıcı karbodür elemanları ve çelik profil ile betonarme plak arasında bağlantıyı sağlayacak olan epoksi reçinelerinin karakteristik değerlerinin saptanması ve inşaat sektöründe yeni birer güçlendirme malzemesi olarak karbodür elemanları ve epoksi reçineleri hakkında detaylı bilgilere sahip olabilmektir .

Karbodür elemanlar ve epoksi reçinelerinin karma kirişin negatif moment bölgesindeki taşıma gücünün ve taşıma davranışının nasıl etkilendiğinin araştırılmasıdır .



Şekil 1 . Karbon Lifleriyle Takviye Edilmiş Kompozit Kiriş Enkesiti

### III . KARMA KİRİŞİN NEGATİF MOMENTLER BÖLGESİNDE DAVRANIŞI

Karma kirişlerin sürekli kiriş düzeninde kullanılmaları durumunda, iç mesnetler yöresinde negatif moment bölgesiyle karşılaşılır. Bu durumda, kesitin çekme bölgesinde kalan betonun çatlayıp, kiriş boyuna doğrultusunda yük taşıyamayacağı açıktır. Karma kirişlerin negatif momentler bölgesinde hesabı için iki görüş mevcuttur.

Karma kirişlerde negatif moment bölgesinde esas olarak karma kesit dizaynına göre taşıma gücünün tamamının güçlendirme işlemi için yerleştirilen çelik plakalarla karşılanması temel alınmıştır. Genel olarak negatif moment bölgesinde eğilme momentleri açısından bu prensip esas alınmaktadır. Bu çalışmada çelik plakalar yerine karbon lifleri kullanılmıştır.

Bununla birlikte diğer bir bakış açısıyla, karma en kesit hesabı negatif momentler bölgesinde de sürdürülür. Negatif moment etkiyen kesitte yapılan hesaplamalarda beton plağının bu etkilere karşı dayanımı plak yüzeyine yerleştirilen karbon lifleriyle karşılanmaktadır.

Bu durumda düzenlenen negatif moment bölgesi gerilme diyagramlarında

I . Negatif moment taşıma gücü ,

II . Yalnız çelik en kesitin taşıyabileceği  $M_{pa}$  plastikleşme momentine ilişkin gerilmelerin yüzey ortalamasına işaret değiştirdikleri diyagram,

III. Mesnet donatısının yüzey ortalamasına göre  $AM_1$  katkısı,

IV . Eksen farkı  $\Delta M_2$  dengeleme momenti diyagramlarını ifade etmektedir.

Tasarlanan karma kiriş davranış sistemine bağlı olarak bu diyagramlardan faydalanarak taşıma kapasiteleri belirlenebilir.

$W_{pa}$  çelik profilin kendisini iki eş alanlı parçaya ayıran eksene göre belirlenmiş plastik mukavemet momenti olmak üzere :

$$W_{pa} = Sx_{üst} + Sx_{alt} \quad \text{Olarak hesaplanır .}$$

Yalnız çelik en kesitin taşıyabileceği  $M_{pa}$  plastikleşme momenti  $M_{pa} = \alpha_a \sigma_F W_{pa}$  formülü ile belirlenir.

Bu durumda beton plağa yapıştırılan çelik levhaların taşıyabileceği negatif bölge çekme kuvveti

$$Z' = \alpha_a \sigma_F' E_a' \quad \text{şeklinde bulunur.}$$

$y' = ht - (h_{au} + h')$  olmak üzere negatif moment bölgesi güçlendirme çelik plakalarının yüzey ortalamasına göre  $M_1$  katkısı  $M_1 = Z' y'$

şeklinde negatif moment bölgesindeki çekme kuvveti ve kuvvetin uygulama koluna bağlı olarak belirlenir.

Güçlendirilmiş karma kirişin negatif moment bölgesindeki  $AM_2$  dengeleme momenti diyagramında  $y''$  değeri,

$$y'' = Z' / (2t_g \alpha_a \sigma_F)$$

olduğuna göre eksen farkı  $M_2$  dengeleme momenti,

$$\Delta M_2 = \alpha_a \sigma_F t_g y'' I y'' I \quad \text{değerinin alır.}$$

Buna göre güçlendirilmiş karma kirişin  $-M_u$  negatif moment taşıma gücü değeri,

$$I - M_u I = M_{pa} + \Delta M_1 - \Delta M_2 \quad \text{olarak hesaplanır.}$$

#### IV. KAYMA BAĞLANTI ELEMANLARI

Bir karma kirişte, kayma bağlantılarının amacı, çelik en kesitle betonarme plağı birbirlerine, bir bütün olarak çalışabilecekleri şekilde bağlamaktır. Bu amaçla, yük altında, beton ve çelik bölümler arasında oluşmak isteyen kaymayı önlemek, dolayısıyla kayma kuvvetini aktarabilmek. Şekil değiştirmeler sonucu beton plağın çelik parçadan ayrılıp kalkmasını önlemek görevlerini yüklenirler. Kayma kuvvetinin aktarılmasını sağlayacak uygun kayma bağlantısının boyutlarını ve sayısını hesaplamak mümkündür. Buna karşın, plağın kalkmasıyla ilgili bir hesap şekli gelişmemiş olup önlemler deneyimlere dayanır.

Karma kirişlerde, günümüze değin birçok değişik kayma bağlantıları kullanılmıştır. İlk bağlantı türlerinden birisi sürekli helezondur. Genel olarak kayma bağlantılarını rijit ve eğilebilir şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Rijit türlerde kayma ve kalkmayı önleme iki ayrı elemana pay edilmiştir: Kayma kuvveti dik yüzeylerdeki beton basınç gerilmesi ve kaynaklardaki zorlamalar ile alınır, kalkma ise halka donatı ile önlenir. Eğilebilir türlerde her iki görev aynı elemana yerine getirilir.

Günümüzde en çok kullanılan kayma bağlantısı türü, otomatikleşmiş imalatı dolayısıyla, kaynaklanmış başlıklı saplamalardır.

Genelde bir kayma bağlantısının taşıma gücü, deneysel olarak istatistiksel yöntemle saptanır. Deney genellikle bir itip çıkarma testi bazen de bir kiriş deneyidir. Deneylerden çıkarılmış ampirik, ya da deneylerle sınanmış kuramsal bağıntıların kullanıldığı da olur. Bir kayma bağlantısının bireysel taşıma gücü beton basınç düzeyi şekline, elemanın makaslama ve eğilme dayanımına ve elemanı saran betonun makaslama dayanımına bağlıdır. Betonun  $f_c$  ile gösterilen makaslama çevre uzunluğu plak kalınlığının iki katı olan  $2d$  yi aşarsa makaslama çevresi olarak  $2d$  alınmalıdır

Kayma bağlantılarının bireysel taşıma güçlerini bağıntılar yardımıyla hesaplamaya örnek olarak, başlıklı saplama türü bağıntılar aşağıda belirtilmişlerdir.

Kayma bağlantı elemanı olarak başlıklı saplamalar kullanıldığında

$$h_s \geq 50 \text{ mm}$$
$$d_i \leq 23 \text{ mm ve } 12 t_a$$

$d_2 \geq 1.5 d_1$  büyüklükleri sağlanmalıdır.  
durumda başlıklı kamanın  $H_{lu}$  taşıma gücü

$$H_{lu} = 0.32 \alpha d_1^2 (\beta_{wn} E_b)^{1/2} \leq 0.55 d_1^2 \sigma_{FH}$$

bağıntısıyla verilir

Bu bağıntıda:

$\sigma_{br}$  : küp beton anma mukavemeti

$E_b$  : beton elastiklik modülü

$\sigma_{FH}$  : kayma bağlantısının alana sınırı

$$\max \sigma_{FH} = 3500 \text{ kg/cm}$$

$\alpha$  değeri için ;

$$h/d, = 3,0 \text{ için } 0,85$$

$$h/d, \geq 4,2 \text{ için } 1,00$$

değerinde alınan bir katsayıdır.

Dinamik yüklere maruz köprü ve benzeri yapılar için hesaplanan  $H_{lu}$  taşıma gücü, 2/3 oranında azaltılır. Saplamalar çevresinde spiral yay kullanılması durumunda  $H_{lu}$  %15 arttırılabilir.

Başlıklı saplamaların birbirlerinden uzaklıkları en az  $e \geq 4 d_i$  (istisnai :  $2,5 d_i$ ) boyuna doğrultuda ise  $e \geq 5 d_i$  (istisnai :  $2,5 d_i$ )

boyuna doğrultusunda ise

$$e \leq (3-4) d \leq 600 \text{ mm}$$

bağıntılarıyla sınırlandırılmıştır. Ayrıca  $t_b$  saplamaları kaynaklandığı profilin başlık kalınlığı olmak üzere  $e$  değerinin uyması gerekli sınırlar da vardır.

Eğik etriye türündeki kayma elemanları için de, her kol için

$$H_{lu} = \alpha_a \sigma_{FH} F_{IH}$$

bağıntısı verilebilir. Burada  $F_{IH}$  etriyenin bir kolunun  $e$  kesit alanını,  $\alpha_a$  ve  $F_H$  ise daha önce açıklanan büyüklükleri göstermektedir.

#### IV.1.Karma Kirişte Kayma Bağlantıları İçin Yapısal Hesaplamalar:

Bir moment ekstremimi noktası ile bir moment sıfır noktası arası olarak sınırlandırılacak bir kayma bölgesi konulması gerekli kayma bağlantı elemanının sayısı, plastisite hesapta

$$N_H = H / (\alpha_H H_{lu})$$

olarak bulunur. H söz konusu bölgede plakla çelik profil arasındaki kayma kuvveti,  $\alpha_H$  genellikle 0,85 değerinde alınan bir güvenlik katsayısıdır. Hesap taşıma gücü yöntemiyle yapıldığından kayma bağlantısı aralıkları eş tutulur.

Ele alınan kayma bölgesindeki H kayma kuvveti :

Pozitif momentler bölgesinde, çelik profilin taşıyabileceği Z çekme kuvveti ile beton tablanın taşıyabileceği B basınç kuvvetinden küçük olanına eşittir.

$$Z = \alpha_a \sigma_F Fa$$

$$D_b = \alpha_b \sigma_{br} b_{eff} d$$

değerlerinden küçüğü H değerini ifade eder.

Negatif momentler bölgesinde ise H plaktaki mesnet donatısının taşıyabileceği Z' çekme kuvvetine eşittir.

$$H = Z' = \alpha_a \sigma_F' Fa'$$

Formülü kullanılarak kayma kuvveti belirlenir.

## V. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Bu çalışmada ele alınan kirişler 800 x 3000 x 100 mm boyutlarındaki hazır betonarme plak I120 çelik profil ve karbon liflerinden oluşmaktadır. Karma kiriş oluşturulurken hazır betonarme plak ile çelik profil arasındaki kompozit çalışmayı sağlamak üzere epoksi reçinesi kullanılmaktadır.

Hazır betonarme plak negatif moment bölgesinde çekme elemanı olarak çalışacağından , tablo 5.1. de belirtilen aralıklarda karbon lifleri plaka epoksiyle yapıştırılmış ve plak içine minimum oranda çekme donatıları konulmuştur.

EPR NO	Beton Boyutu (cm)	Çelik Profil Cinsi	Kayma Bağ. Sayısı	CFRP Sayısı	CFRP Aralığı (cm)
1	300.80.10	I 120	6	3	10
2	300.80.10	I 120	6	3	15
3	300.80.10	I 120	8	2	20
4	300.80.10	I 120	8	2	25

Tablo 5.1.Deney Numuneleri Kesit Özellikleri

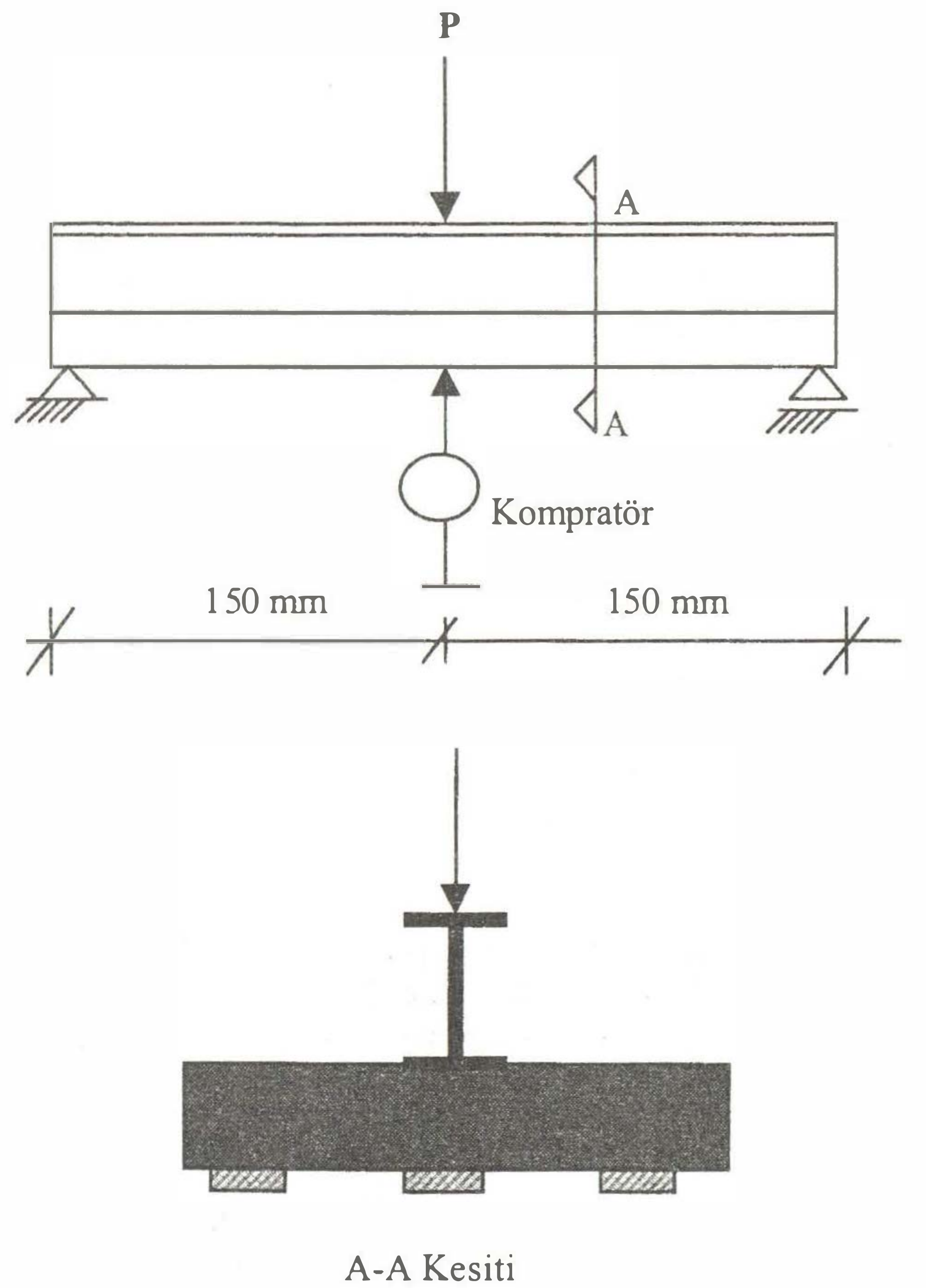
## VI.DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Deneyler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapımında hidrolik presle donatılmış , 200 kN basınç yükü verebilme kapasitesine sahip " HI-TECH MAGNUS" marka deney makinesi kullanılmıştır.

Kompozit kirişlerin negatif moment bölgesindeki davranışları inceleneceğinden betonarme plak alta çelik profil üste gelecek şekilde ve mafsallı mesnetli olarak deney çerçevesine oturtulup orta noktasından P tekil yükü ile yüklenmektedir (Şekil 6.1.)

Deney esnasında epruvetlerin taşıyacağı yükler yanında , deformasyonlarda ölçülmüştür. Deformasyonların ölçülmesinde Strain Gaugeler ve bu ölçme elemanının bağlı olduğu Data Logger cihazları kullanılmıştır.

Strain Gaugeler kompozit kirişin çelik üst başlığının tam ortasına , betonda ise beton kesitin yüksekliğinin tam ortasına tespit edilmiştir. Böylece hem çelikte hem de betonda basınç bölgesinde kısılma deformasyonları ölçülmüştür.



Şekil 6.1. Kirişlerin Yüklenme ve Mesnetlenmesi

#### KAYNAKLAR

- [1] 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).
- [2] Johnson R.P. , Research on Steel-Concrete Composite Beams , Journal of Structural Division , Proc. , March 1970 ,pp. 445-459.
- [3] Hamada S. , Longworth J. , Ultimate Strength of Continuous Composite Beams , Journal of Structural Division , July 1976 ,pp. 445-459.
- [4] Arda T.S. , Yardımcı N. , Çelik Yapıda Karma Elemanların Plastik Hesabı , Kurtiş Matbaası , İstanbul 1991.
- [5] Leonhadth F. , Andrea W. , Saul R. , Harre W. , Zur Bemessung Durchlaufender Verbundtraegger Bei Dynamischer Belastung , Bauingenieur 62 pp.311-324 , (1987) .
- [6] Arda T.S. , Mengene N. , Strength Of Composite Beams With Concrete Under Negative Bending , Journal of Structural Engineering , Vol 121 , pp. 1170-1174.
- [7] Oehlers J.Deric , Sved George , Composite Beams With Limited Slip Capacity Shear Connectors , journal of Structural Engineering , Vol 121 , pp.932-938 , ( 1995 ).
- [8] Gaetano M. , Giovanni F. , Edoardo C. , Modeling of Steel Concrete Composite Beams Under Negative Bending , Journal of Structural Engineering , vol 125 pp. 554-560 ,(1999).
- [9] Yelgin A.N. , Yelgin H. , Eğilme Çubuklarının Epoksi ile Yapıştırılmış Bindirme Levhalı Eklerinin Yapısal Davranışı , SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , Cilt 2 , Sayı 2 , s. 171 – 180 (1998).
- [10] Yelgin A.N. , Kasap H. , Özyurt M.Z. , Negatif Moment Bölgesinde Hazır Betonarme Plaklı kompozit Kirişlerin Yapısal Davranışı , 9.Prefabrikasyon Sempozyumu Bildir Kitabı , s.137-150 (1998)
- [11] Işık E. , Epoksi ile Yapıştırılan ve Karbodur Elemanlarıyla takviye Edilmiş Kompozit Kirişlerin Negatif Moment Bölgesindeki Davranışlarının İncelenmesi , Yüksek Lisans Tezi , (1999).