

## Eğilme Kirişlerinde Sonradan Eklenen Donatı Filizi ile Güçlendirme Yönteminin DeneySEL Olarak Araştırılması

Bahar Seleh<sup>1\*</sup>, Oğuzhan Ataş<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

\*245446002@ogr.alanya.edu.tr

### Özet

Betonarme yapı elemanları taşıdıkları kesit tesirleri etkisinde enerji tüketirler. Tükettikleri enerjinin plastik deformasyonu sonucu olarak çatlak gelişimi meydana gelir. Oluşan çatlaklar yapı elemanlarının yük düzeyine göre kesit çekirdeğine kadar ilerlerler. Elastoplastik durumda olan elemanlar için bu çatlak gelişimi henüz tehlikeli boyuta gelmemiş, dolayısı ile hemen kullanım sınır durumundadır (IO). Hasar görmüş yapı elemanları hasarın boyutuna göre onarım ve güçlendirme yöntemleri ile eski performanslarına yakın seviyeye getirilebilirler. Bu çalışmada eğilme etkisine maruz bırakılmış 8 adet betonarme kiriş üzerinde çeşitli güçlendirme parametrelerinin incelemesi yapılmıştır. Kiriş numuneleri; 2 adet donatısız referans kiriş, 2 adet minimum donatı oranı ile oluşturulmuş kiriş, 2 adet minimum donatı ile hazırlanıp daha sonra güçlendirilmiş kiriş ve son olarak 2 adet güçlendirme donatısı önceden yerleştirilmiş olan kirişler hazırlanmıştır. Güçlendirme yapılan kirişlerde Yüzeye Yakın Montaj (NSM) tekniği kullanılmıştır. DeneySEL çalışmaların sonucunda numuneler kendi içerisinde karşılaştırmalı şekilde kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama parametreleri eğilme dayanımı, süneklik, elastik ve plastik enerji yutma kapasiteleri ve sehim değerlerini içermektedir. Tüm deney sonuçları incelendiğinde NSM tekniği ile geleneksel çelik donatı kullanılarak yapılan güçlendirme işlemi beklenildiği üzere yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Güçlendirme sebebiyle artan pürsantaj oranı numunenin rijitliğini artırarak deplasman yapabilmeye kabiliyetini ve sünekliğini düşürmüştür. Ancak elastik enerji tüketim kapasitesinde etkin kesit rijitliğinden kayıp olmadığı için artan pürsantaj miktarı elastik enerji tüketim kapasitesini artırmıştır. Yapı elemanları servis ömrünün çok büyük bir kısmında lineer statik yüklere maruz kaldığından yapılan çalışmada uygulanan NSM tekniği ile donatı ekiminin eğilme elemanı performansına olumlu katkılar sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışma, eğilme etkisindeki kirişlerin NSM tekniğiyle güçlendirilerek performansının artırılmasını amaçlamaktadır. Yöntemde, elemanın kabuk bölgesine açılan oluklara geleneksel çelik donatı yerleştirilerek güçlendirme sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Eğilme, Kiriş, Güçlendirme, NSM.

## Experimental Investigation of the Reinforcement Method with the Reinforcement Bar Added Later in Bending Beams

### Abstract

Reinforced concrete structural members dissipate energy under the influence of sectional forces they carry. The energy dissipation results in plastic deformation, leading to crack formation. These cracks propagate toward the core of the section depending on the load level of the structural members. For elements in an elastoplastic state, crack development has not yet reached a critical level, thus remaining within the immediate occupancy (IO) performance limit. Damaged structural members can be restored to near-original performance levels through repair and strengthening methods, depending on the extent of damage. In this study, the effects of various strengthening parameters were investigated on 8 reinforced concrete beams subjected to flexural loading. The beam specimens included: 2 unreinforced reference

beams, 2 beams with minimum reinforcement ratio, 2 beams initially prepared with minimum reinforcement and later strengthened, and finally 2 beams with pre-installed strengthening reinforcement. The Near-Surface Mounted (NSM) technique was employed for strengthening the beams. The experimental results were comparatively analyzed among the specimens. The comparison parameters included flexural strength, ductility, elastic and plastic energy dissipation capacities, and deflection values. The experimental findings demonstrated that the NSM technique, using conventional steel reinforcement, effectively increased the load-carrying capacity, as expected. However, the increased reinforcement ratio due to strengthening enhanced the specimen's stiffness, reducing its displacement capacity and ductility. Nevertheless, since the effective sectional stiffness was preserved in terms of elastic energy dissipation, the higher reinforcement ratio improved the elastic energy absorption capacity. Given that structural members spend most of their service life under linear static loads, the study concluded that the NSM reinforcement technique positively contributes to the performance of flexural members.

This study aims to enhance the performance of beams under flexural effects through NSM strengthening. In this method, strengthening was achieved by embedding conventional steel rebars into grooves cut into the shell region of the member.

**Keywords:** Bending, Beam, Strengthening, NSM.

## 1. GİRİŞ

Betonarme yapılar; tasarım, yapım ve hizmet ömrü boyunca maruz kalınan çeşitli etkiler nedeniyle hasar görebilir. Bu hasarlar, betonarme elemanlardaki tasarım ve/veya uygulama hatalarından kaynaklanabileceği gibi çevresel faktörler veya taşıma gücü kaybı gibi yapı performansını olumsuz etkileyen değişimler de olabilir. Bu durum, betonarme yapılar ve kirişler de dahil olmak üzere yapı elemanlarında güçlendirme ve onarım gerektiren yük değişimlerine yol açabilir [1]. Betonarme yapı ve elemanlar; görünüm, dayanıklılık, rijitlik ve süneklik gibi kullanım özellikleri açısından hasar öncesi durumuna getirilmek amacıyla onarılabilir. Yapı ve elemanların güçlendirilmesi ve/veya onarımı için farklı malzeme ve yöntemler geliştirilmiştir [2]. Güçlendirme yöntemleri arasında Fiber Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer, FRP), Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) ve klasik yöntem olan mantolama sayılabilir. FRP ile güçlendirmede başlıca iki teknik kullanılır: Dıştan Yapıştırma Takviyesi (External Bonded Reinforcement, EBR) tekniği ve Yüzeye Yakın Montaj Tekniği (Near Surface Mounted, NSM) [1]. NSM yöntemi, diğer güçlendirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında, elemanın enkesit boyutlarını değiştirmeden uygulanabilen bir tekniktir. Bu yöntem; üretim aşamasında çeşitli kesit tesirleri altında yetersiz donatılandırılmış veya enkesit boyutları kritik olan elemanların eğilme kapasitelerinin artırılması ve kullanılabilirlik sınır durumu için sehim değerlerinin azaltılması amacıyla, enkesit içerisine sonradan uygulanan bir güçlendirme tekniğidir.

Bu araştırmanın temel amacı, FRP ile güçlendirmenin bir tekniği olan NSM yöntemi kullanılarak, eğilme etkisine maruz kalmış kirişlerin sonradan güçlendirilmesi ve performans özelliklerinin iyileştirilmesidir. NSM tekniğinde, yapı elemanının kabuk bölgesine açılan oluklara eklenen güçlendirme malzemesi (geleneksel çelik donatı veya FRP çubuk) ile güçlendirme işlemi gerçekleştirilir. Araştırmada, güçlendirme malzemesi olarak geleneksel donatı çeliği kullanılmış ve donatı çeliği, dış etkilere karşı epoksi ile korunmuştur.

De Lorenzis ve arkadaşları, eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin NSM tekniği ile güçlendirilmesini deneysel bir çalışmada incelemiştir. Dört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Toplamda dört numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Araştırma için farklı boyutlarda cam ve karbon FRP çubuklar kullanılmıştır. Deney sonunda güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitelerinde artış olduğu görülmüştür [3]. Al-Mahmood ve arkadaşları, eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin NSM tekniğiyle CFRP çubuk kullanılarak güçlendirilmesini deneysel bir çalışmada incelemiştir. Deney sonucunda CFRP çubuk kullanılarak uygulanan NSM tekniğinin eğilme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir [4]. Soliman ve arkadaşları tarafından deneysel bir çalışmada eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin NSM tekniği ile FRP çubuk kullanarak güçlendirilmesi incelenmiştir. Ayrıca kirişlerin davranışlarının simülasyonu için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Deney sonucunda güçlendirilen kirişlerin daha iyi sonuçlar verdiği

gözlemlenmiştir [5]. Sharaky ve arkadaşları, NSM tekniği ile FRP çubuk kullanılarak kirişlerin güçlendirilmesini deneysel bir çalışmada incelemiştir. Deneyde kirişler yapıştırıcı özellikleri, çubuk türü ve boyutu, FRP özellikleri, oluk geometrisi gibi özellikler bakımından incelenmiştir. Çubuk aderans uzunluğunun artması, yapıştırıcı kalınlığının artması, çubuk çapının artması, oluk genişliğinin artması parametrelerinin kırılma yükünü artırdığı gözlemlenmiştir [6]. Barros ve arkadaşları tarafından deneysel bir çalışmada eğilmeye ve kesmeye çalışan kirişlerin güçlendirilmesi için NSM ve EBR tekniği araştırılmıştır. Deney düzeneği olarak, dört noktalı eğilme düzeneği kullanılmıştır. Toplamda dört numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Deney sonunda NSM tekniğinin EBR tekniğine göre çok daha başarılı olduğu görülmüştür [7]. Astorga ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışmada NSM tekniği ile CFRP kullanılarak güçlendirilen konsol köprü levhasının davranışı incelenmiştir. Deney sonucunda güçlendirilen numunelerin çatlama yükünün, akma yükünün ve servis yükünün arttığı deplasmanların ve sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir [8]. Sharaky ve arkadaşları deneysel bir çalışmada NSM tekniği ile FRP kullanarak kısmen ve tamamen yapıştırılarak yapılan güçlendirmenin betonarme kirişi üzerine etkilerini incelemiştir. Deney sonucunda tamamen yapıştırılan güçlendirme işleminin kısmen yapıştırılarak yapılan güçlendirme işlemine göre betonarme kirişe daha büyük bir mukavemet ve daha yüksek bir tokluk sağladığı gözlemlenmiştir [9]. Almassri bu çalışmada korozyona uğramış betonarme kirişler üzerinde NSM tekniği ile CFRP kullanılarak güçlendirme işleminin etkinliği araştırmıştır [10]. Bilotta ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışmada eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin NSM tekniği ile CFRP malzeme kullanılarak ankrajlı ve ankrajsız olarak güçlendirilmesinin kiriş davranışına etkileri incelenmiştir [11]. Rezazadeh ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada CFRP kullanılarak NSM tekniğine ek olarak EBR tekniği ile kiriş güçlendirme işleminin betonarme kiriş üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonucunda maksimum yük taşıma kapasitesinin ve rijitliğin arttığı gözlemlenmiştir [12]. Sharaky ve arkadaşları, NSM tekniği ile ankrajlı ve ankrajsız GFRP çubuklar ile güçlendirilmiş betonarme kirişin eğilme ve kesme altındaki davranışlarını deneysel bir çalışmada incelemiştir. Deneyde kirişlerin hem alt hem de yan yüzeyleri güçlendirilmiştir. Deney sonucunda alttan güçlendirilmiş kirişin yandan güçlendirilmiş kirişe oranla yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu ve ankrajlı numunenin ankrajsız numuneye oranla daha yüksek yük taşıma kapasitesinin olduğu gözlemlenmiştir [13]. Seo ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışmada NSM tekniği ile CFRP şerit kullanılarak kısmen ve tamamen yapıştırılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışları incelenmiştir [14]. Akter Hosen ve arkadaşları deneysel bir çalışmada NSM yöntemi ile farklı tip ve oranlarda çelik çubuk ve CFRP çubuk kullanılarak yapılan güçlendirme işleminin kirişler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney düzeneği olarak dört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Deney sonucunda çatlama yükünün ve nihai yükün arttığı gözlemlenmiştir [15]. Özbulut ve arkadaşı bu çalışmada NSM tekniği ile BFRP kullanılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Deney düzeneği olarak dört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Deney sonucunda kirişlerin sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir [16]. Seo ve arkadaşları bu çalışmada FRP plaka kullanılarak beton elemana EBR ve NSM tekniği ile güçlendirme işlemi uygulamıştır. Deney sonucunda NSM yöntemi ile güçlendirilen beton elemanın EBR yöntemi ile güçlendirilen beton elemana göre daha fazla mukavemet gösterdiği görülmüştür [17].

Demirci ve arkadaşları, korniyer ve/veya lamaların epoksi reçinesi ile kirişlerin alt ve yan yüzlerine yapıştırılması sonucu yapılmış olan güçlendirmenin eğilme davranışı üzerindeki etkisi deneysel bir çalışmada incelemiştir. Biri referans numunesi olmak üzere toplamda dört farklı numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Tüm kiriş numuneleri eğilme deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda profil boyutundaki artışın çatlak genişliği ve sayısıyla ters orantılı, buna karşın, kirişin yük taşıma kapasitesindeki artışla doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır [2].

Sayın ve arkadaşları tarafından deneysel bir çalışmada FRP'nin kiriş alt yüzeyine farklı kalınlıklarda yapıştırıcı ile uygulanması sonucu, betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri araştırılmıştır. Biri referans numunesi olmak üzere toplamda beş farklı numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Referans kirişe herhangi bir güçlendirme işlemi yapılmamıştır. Beş numune de aynı boyutlara, donatı oranına sahipken

referans kirişi hariç diğer kirişlerin güçlendirme malzemesi ve yapıştırıcı malzemesi de aynıdır. Fakat kiriş alt yüzeyine güçlendirme için uygulanan yapıştırıcı kalınlıkları farklıdır. Farklı yapıştırıcı kalınlıklarına sahip olan kirişlerin kiriş taşıma gücü ve eğilme rijitliği açısından kıyaslandıklarında önemli bir farklılık görülmemiş, benzer değerler elde edilmiştir. Fakat bu kirişler, referans kirişle kıyaslandığında taşıma güçlerinin yaklaşık 2,5 kat arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda bu kirişlerin referans kirişe göre daha az sünek olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla FRP takviyeli kirişlerin gevrek davranış göstererek ani göçmelere sebep olabileceği görülmüştür. Ayrıca FRP takviyeli kirişlerin eğilme rijitliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı kalınlıklarının ise ne eğilme rijitliğine ne de taşıma gücüne önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür [18]. Altun ve arkadaşları, betonarme kiriş elemanda çelik lif katkısının taşıma gücüne olan etkileri deneysel bir çalışmada incelemiştir. Dört noktalı eğilme cihazı deney düzeneği olarak kullanılmıştır. Biri referans numunesi olmak üzere toplamda iki farklı numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Kirişler aynı en kesit boyutlarına sahipken kirişlerden birisi katkılı diğeri ise katkısız olarak üretilmiştir. Katkısız betonarme kirişlerde deneysel ve teorik göçme yükleri arasındaki kapasite artışının çelik lif katkılı betonarme kirişlerin deneysel ve teorik göçme yükleri arasındaki kapasite artışından daha az olduğu gözlemlenmiştir. Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde katkısız betonarme kirişlerinin enerji yutma kapasitesinin katkılı betonarme kirişlerin enerji yutma kapasitesinden az olduğu görülmüştür. Dolayısıyla çelik lif katkısının uygulanan betonarme kiriş elemanlarda sünekliği artırdığı görülmüştür [19].

Alhamdan, deneysel bir çalışmada eğilmeye çalışan betonarme kiriş elemanlarında güçlendirme tekniğinin ve güçlendirme malzemesinin taşıma gücüne olan etkileri incelenmiştir. Deney düzeneği olarak dört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Biri referans numunesi olmak üzere toplam yedi adet numune çeşidi ile deney yapılmıştır. Kirişler aynı en kesit boyutlarına sahipken farklı güçlendirme tekniğine ve malzemesine sahiptirler. Referans numunesi güçlendirilmeye tabi tutulmamıştır. Diğer numuneler ise sırasıyla; NSM tekniği ile düz çelik çubuklar kullanılarak, NSM tekniği ile 90° gönyelenmiş çelik çubuklar kullanılarak, NSM tekniği ile düz CFRP çubuklar kullanılarak, EBR tekniği ve CFRP kumaş ile iki kat kumaşın u şeklinde sarılması şeklinde, FHB (Fischer Highbond System) tekniği ile CFRP kumaş mekanik bağlantılı şekilde ve son olarak NSM ve FHB tekniğinin birlikte kullanılmasıyla düz çelik çubuk ve iki katman CFRP kumaşın mekanik bağlantılı şekilde güçlendirilmiştir. NSM tekniği ile düz ve gönyeli olarak geleneksel donatı ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin benzer artışlar gösterdiği fakat geleneksel düz donatı ile güçlendirilen kirişlerin düktilitelerinin gönyeli geleneksel düz donatı ile güçlendirilen kirişten daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Yine aynı şekilde düz ve gönyeli olarak geleneksel donatı ile güçlendirilen kirişlerin elastik enerji tüketimlerinin benzer artışlar gösterdiği fakat geleneksel düz donatı ile güçlendirilen kirişlerin enerji tüketimlerinin gönyeli geleneksel düz donatı ile güçlendirilen kirişten daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. EBR tekniği ve CFRP kumaş ile u şeklinde güçlendirilen kirişin yük taşıma kapasitesinin artış gösterdiği fakat CFRP kumaşın yüzeyde sıyrıldığı görülmüştür. FHB tekniği ile CFRP kumaş kullanılarak güçlendirilen kirişin yük taşıma kapasitesinin arttığı fakat düktilitesinin azaldığı görülmüştür [1].

Zhou ve arkadaşları, eğilmeye çalışan betonarme kirişlerin FHB tekniği ile CFRP kullanılarak eğilmeye çalışan kirişlerin güçlendirilmesi incelenmiştir. Deney düzeneği olarak ört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Deneyde U sargı tekniği ile güçlendirme ve FHB tekniği ile güçlendirmenin sonuçları karşılaştırılmak üzere incelenmiştir. Deney sonucunda FRP koptuğunda eğilme kirişlerinin kırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca FHB tekniğiyle yapılan güçlendirmede ulaşılan nihai yükün U sargı tekniğiyle yapılan güçlendirmeye oranla daha yüksek olduğu görülmüştür [20].

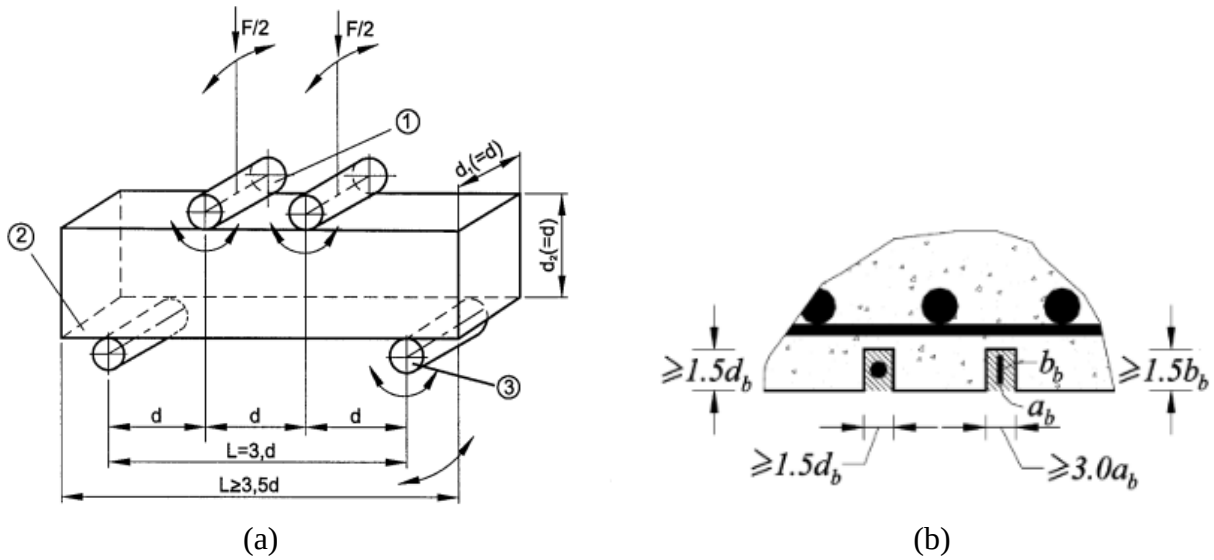
## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada 4 tip toplamda 8 adet ölçeklendirilmiş kiriş numuneleri bir ucu sabit bir ucu hareketli mesnet kullanılarak eğilme altında test edilmiştir. Kiriş numunelerinin ayrıntıları Bölüm 2.1’de verilmiştir. Deney numuneleri TS EN 12390-5:2019 “Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini” [21] belirtilen yükleme koşulları dikkate alınarak boyutlandırılmıştır. Boyutlandırma sırasında dikkate alınan yükleme

hızı ve eğilme dayanımı hesaplama formülleri sırasıyla Denklem (1), (2)'de verilmiştir. Güçlendirme kirişlerine; ACI 440.2R-08 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure” [22] belirtilen minimum oluk boyutları dikkate alınarak oluk boyutlandırılması yapılmış ve uygulanmıştır. Yükleme koşulları ve minimum oluk boyutları Şekil 1’de verilmiştir. TS EN 12390-5:2019 doğrultusunda  $d_2=150$  mm ve  $L=600$  mm olarak belirlenmiştir. Kesit boyutlarının minimum donatı oranına uygunluğu için Denklem (3) kullanılarak  $d_1=130$  mm olarak belirlenmiştir.

$$V = \frac{sd_1d_2^2}{L} \quad (1)$$

$$f_{cf} = \frac{FL}{d_1d_2^2} \quad (2)$$



Şekil 1. (a) Yükleme koşulları [21], (b) Minimum oluk boyutları [22]

## 2.1 Numune ve Üretim Parametreleri

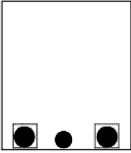
Deney numuneleri 130x150x600 mm boyutlarında, 3 farklı parametre için her bir sette 2 adet numune olacak şekilde üretilmiştir. Olası deneysel hatalara karşı tek üretilmeyen numunelerin içeriği; Referans numunelerinde (REF) donatı olmayıp diğer numunelerde parametre olarak eklenen farklı donatıların kenetlenme boyu sağlayacak şekilde her iki kenarından 130 mm gönye verilmiştir.  $\rho_{MİN}$  ve G numunelerinin çekme bölgesinde yalnızca minimum donatı oranı formülü Denklem (3), (4) ile hesaplanarak seçilen 1Φ8 donatıları vardır. G numuneleri halihazırda  $\rho_{MİN}$  numuneleri gibi yalnızca 1Φ8 donatı kullanılarak üretilmiş fakat güçlendirme işlemi için oluklar açılarak 2Φ12 donatı ile güçlendirme işlemi yapılmıştır. Her bir numunede 2Φ12 donatı ekilerek güçlendirme gerçekleştirilmiştir. N numunelerinde ise üretim aşamasında numunelerin çekme bölgesine yerleştirilen 1Φ8 ve 2Φ12 donatıları vardır. Numunede yalnızca boyuna donatı değişim parametresi incelenmek istendiğinden etriye kullanılmamıştır. Tablo 1’de numunelerin isimlendirmeleri ve numunelere ait numune adı, adeti, güçlendirme durumu ve kesit bilgisi verilmiştir.

$$\rho = 0,8f_{ctd}/f_{yd} \quad (3)$$

$$As = \rho d_1 d_2 \quad (4)$$



Tablo 1. Numune özellik ve isimler

| Senaryo No | Numune Adı | Adet | Açıklama                                                                              | Güçlendirme                                                 | Kesit                                                                                              |
|------------|------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | REF        | 2    | Referans Numune<br>(Donatı Yok)                                                       | -                                                           |                 |
| 2          | pMİN       | 2    | Minimum Donatı<br>Oranı ile<br>Donatılandırılmış<br>Numune (1Φ8)                      | -                                                           | <br>1Φ8         |
| 3          | G          | 2    | Minimum Donatı<br>Oranı ile<br>Donatılandırılmış<br>ve Güçlendirilmiş<br>Numune (1Φ8) | NSM Tekniği ile<br>Güçlendirme<br>İşlemi Yapılmış<br>(2Φ12) | <br>1Φ8         |
| 4          | N          | 2    | Normal Numune<br>(1Φ8 + 2Φ12)                                                         | -                                                           | <br>1Φ8 + 2Φ12 |

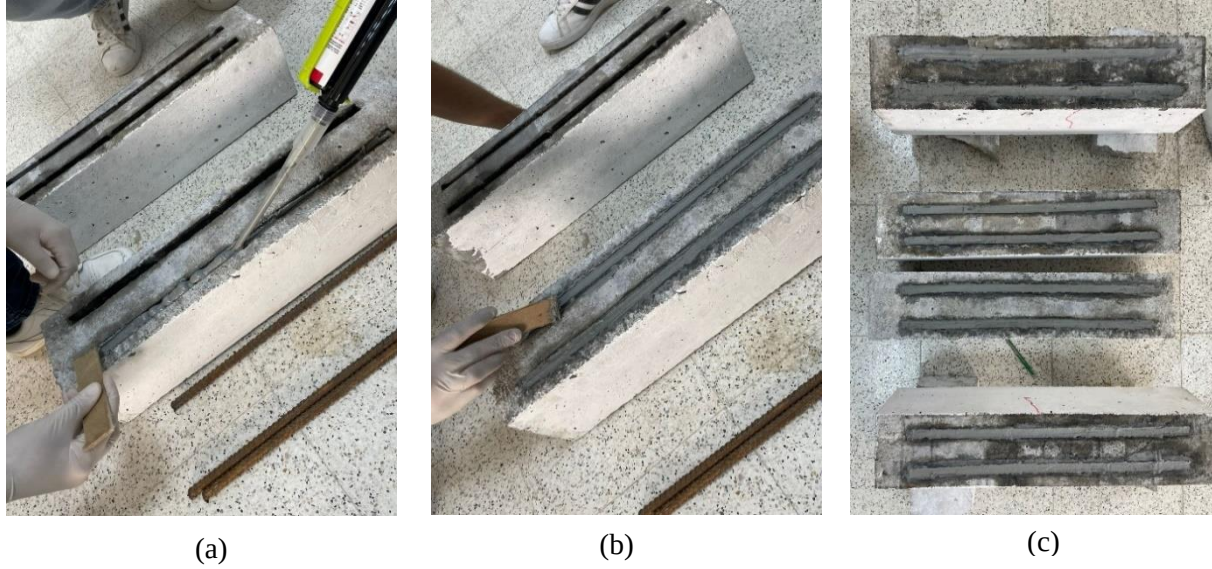
Deney kiriş numunelerinin imalatı dört aşamada gerçekleşmiştir. Ahşap kalıbın imalatı, çelik donatı imalatı, beton dökümü, betonun kuru şeklindedir. Ahşap kalıbın imalatı için 20 mm'lik kalıp malzemesi kullanılmıştır. Kirişlerin alt tarafındaki olukların dökümden sonra kolaylıkla işlenerek donatı ekiminin yapılabilmesi için ilgili standartta verilen ölçüde strafor köpük parçaları bağ teli ile zemine sabitlenmiştir. Donatı olarak B420C çelik kullanılmıştır. Gönyesi alınan donatıların altına pas payı yerleştirilmiştir. Hazırlanan donatılar ahşap kalıpta ilgili numune bölümüne yerleştirilmiştir. Beton dökümü yapılmadan önce üretilmiş olan ahşap kalıp yağlanarak döküme hazır hale getirilmiştir. Numune üretiminde C30/37 sınıfı beton kullanılmıştır. Altı numunenin hepsi aynı anda dış mekânda dökülmüştür. Dökülen beton uygun şekilde kalıba yerleştirilmiştir. Dökümü tamamlanan numuneler masterlanıp etiket yapıştırılarak prize bırakılmıştır. Numuneler yedi gün boyunca şantiye ortamını simüle edebilmek için dış ortamda kürlenmiş, üzeri nemli tutulmuştur. Yedi günün sonunda numuneler kalıptan çıkarılarak laboratuvara taşınmıştır. Laboratuvarda 28 gün boyunca kürlenmiştir.

Beton üretimi tamamlanan eğilme kirişleri içerisinde güçlendirme yöntemi uygulanacak olan G numuneleri önceden bırakılmış güçlendirme oluklarına NSM yöntemi ile donatı ekilmiştir. G numuneleri, 12 mm çapında 480 mm uzunluğunda iki adet nervürlü çelik çubuk ile senaryo 2 ve 3'te donatılar için kullanılan pas payıyla aynı ölçüde pas payı kullanılarak NSM yöntemi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işlemi belirtilen sıra ile yapılmıştır; beton dökümünde bırakılan olukların temizlenmesi, olukların yarısına kadar epoksi doldurulması, güçlendirme için kullanılan çelik donatı çubukların oluklar içine yerleştirilmesi ve aderansın sağlanması için yapıştırıcı malzeme olan epoksinin donatının tüm yüzeylerine uygulanması, olukların tamamının yapıştırıcı malzeme olan epoksi ile doldurulması ve yüzeyin düzleştirilmesi son olarak uygulamada kullanılan epoksi malzemesinin kürlenmesi için bekletilmiştir. Güçlendirme işlemi aşamaları Şekil 2'de verilmiştir. Kullanılan epoksinin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Epoksi reçine mekanik özellikleri

| Tanımlanan Özellik (22°C)         | Değer Aralığı               |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Karıştırma Oranı                  | A Bileşeni/B Bileşeni= 10:1 |
| Özgül Ağırlık                     | 1,60-1,68 g/cm <sup>3</sup> |
| Kürleşme Sonrası Servis Sıcaklığı | -40°C / +50°C               |
| Kürleşme Sonrası Basınç Dayımı    | 70 MPa                      |
| Elastisite Modülü                 | 3800-7000 MPa               |
| Çekme Dayanımı [23]               | 15 MPa                      |

## 2.2 Deney Düzeneği ve Yükleme Protokolü

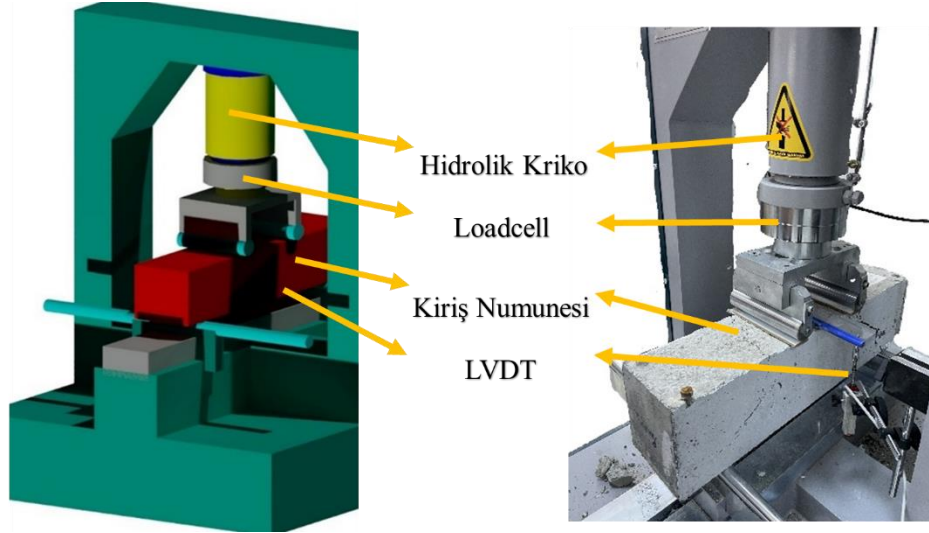


Şekil 2. (a) Numunelerin hazırlanması, (b) Epoksinin tesviyelenmesi, (c) Numunelerin prize bırakılması

Deneyisel çalışma sürecinde kullanılan kiriş numunelerinin her türlü kür işi tamamlandıktan sonra deneysel sürece geçilmiştir. Kiriş numuneleri eğilme yükü altında inceleneceğinden kullanılan yükleme düzeneği ölçü ve kapasiteleri önemlidir. Kullanılan eğilme test ekipmanı 300kN kapasiteli hidrolik krik ve yük ölçümü için de aynı kapasitede olan loadcell kullanılmıştır. TS EN 12390-5 :2019 standardındaki parametrelere uyularak mesnet aralıkları 450 mm'ye ve mesnet koşulları bir sabit ve bir hareketli olarak ayarlanmıştır. Numune üst başlığından etki edecek eğilme yükü için çift başlık tercih edilmiş ve aralık değeri 150 mm olarak ayarlanmıştır.

Yükleme yapılacak kirişlerin yük ölçümü düzenekte üst kısımda bulunan loadcell'den alındığından numune ağırlığı nihai yüke etki etmemektedir. Numune ağırlığı uygulanan eğilme yüküne göre çok daha düşük olduğundan bu etki ihmal edilmiştir. Aynı standart hükümleri gereğince denklem (1)'e göre hesaplanan yükleme hızı ile deneysel süreç yürütülmüştür. Yükleme protokolü belirlenen yükleme hızına bağlı kalınarak yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

Eğilme deneyinden elde edilen verilerden biri eğilme yükü diğeri ise sehim (deplasman) değeridir. Yükleme düzeneği veri toplayıcısında sehim değerini sayısallaştıran doğrusal deplasman ölçer cihaz ile deplasman verileri alınmıştır. Kullanılan lineer deplasman ölçer cihazın (LVDT) kapasitesi 50 mm'dir. Deplasman değerinin ölçümü maksimum sehimin oluşacağı kiriş orta noktasından yapılmıştır. Yükleme düzeneğine ait fotoğraf ve ölçüm için oluşturulmuş 3 boyutlu çizim Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Yükleme deney düzeneği

### 3. BULGULAR

Tüm numuneler için; kırılma fotoğrafları ve deney sonuçları yük-sehim ilişkisi, düktilite ve tüketilen enerji olarak bu bölümde verilmiştir. Numunelere ait kırılma fotoğrafları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Numunelere ait kırılma fotoğrafları

| Senaryo No/ Numune No | Numune 1 | Numune 2 |
|-----------------------|----------|----------|
| 1                     |          |          |
| 2                     |          |          |



3

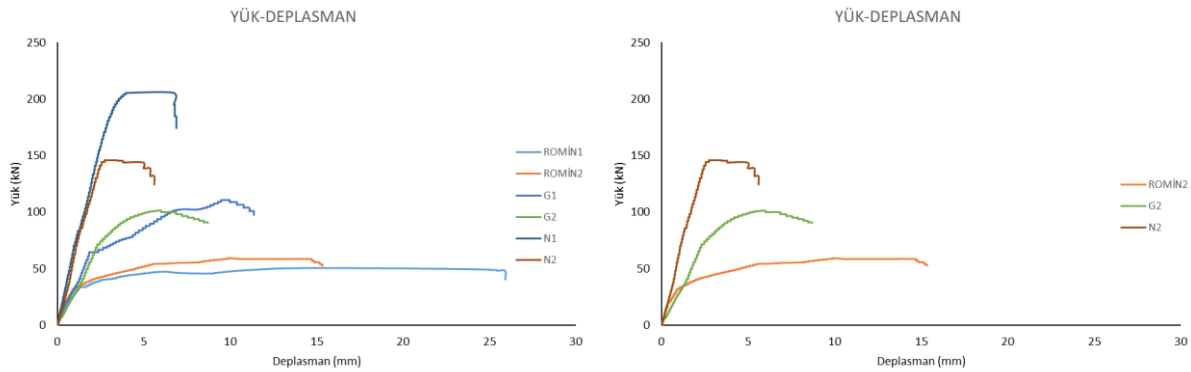


4



### 3.1 Yük-Sehim İlişkisi

Yük-Sehim ilişkisinin incelenmesi eğilme numunelerinin kapasitelerini belirlemede en önemli yöntemdir. Bu ilişkideki inceleme parametreleri; akma yükü, maksimum yük, kırılma yükü ve bu noktalardaki deplasman değerleridir. Numunelerin yük-sehim grafikleri incelenerek grafiğin başlangıç modülünün son bulunduğu noktadaki değer okunarak bu değer akma değeri olarak kaydedilmiştir. Referans numunelerinde donatı bulunmadığı için bu numunelere ait akma değeri ve akma değerine ait deplasman ölçülememiştir. Numunelerin yük-deplasman grafikleri Şekil 4'te verilmiştir. Her parametre için 2 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Grafik değerlerinden anlaşılacağı üzere eğri başlangıç eğimleri aynı olup deneysel bir hata yaşanmamıştır. Değerlendirme için mekanik özellikleri daha düşük olan aynı parametre içerisindeki numune incelemeye alınmıştır. Diğer numunelerin ilgili değerleri Tablo 4'te verilmiş olup numuneler maksimum deplasmanlarını yaptıklarında kırılmışlardır. Denklem (2) kullanılarak hesaplanan eğilme dayanımı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Düzenli ölçümlere en yakın olan 2. Numunelere ait grafikler verilmiştir.



Şekil 4. Yük-Sehim grafiği

Tablo 4. Yük-Deplasman davranışı

| Numune Adı | Akma Değeri (kN) | Akma Deplasmanı (mm) | Tepe Yüğü (kN) | Tepe Deplasmanı (mm) | Kırılma Değeri (kN) | Kırılma Deplasmanı (mm) | Akma Noktası Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------|------------------|----------------------|----------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------------------------|
| REF        | -                | -                    | 18.41          | 0.10                 | 14.79               | 0.10                    | -                                                 |
| ρMİN       | 28.39            | 0.84                 | 59.16          | 9.94                 | 52.55               | 15.34                   | 4.37                                              |
| G          | 65.58            | 2.21                 | 101.44         | 5.74                 | 90.64               | 8.69                    | 10.09                                             |
| N          | 141.17           | 2.55                 | 145.80         | 3.47                 | 124.29              | 5.60                    | 21.72                                             |

Yük-sehim incelemesinde referans numunesine göre ρMİN numunesinin kapasite artışı %221,35'tir. Benzer şekilde donatı pürsantajının %442,86 artırıldığı güçlendirilmiş G numunesine göre ρMİN numunesinin kapasitesi %71,4 artmıştır. N numunesine göre ρMİN numunesinin kapasitesi %146,45 artmıştır. N numunesine göre G numunesinin kapasitesi %43,73 artmıştır.

Aynı başlık altında numunelere ait sehim değerleri incelendiğinde referans numunesinin donatısız olması sebebiyle betonun çatlama dayanımı tükendiğinden dolayı herhangi bir sehim değeri oluşmamıştır. Minimum pürsantaj ile donatılmış numune ve güçlendirme numunesi akma noktasında kıyaslandığında G numunesi ρMİN numunesine göre %163,10 (1,37 mm) daha fazla sehim yapmıştır. Aynı pürsantaj ile donatılmış numunelerden N numunesi G numunesine göre %18,38 (0,34 mm) daha fazla sehim yapmıştır.

Numunelere ait akma noktasındaki eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Referans numunesine ait akma değeri olmadığı için hesaplanamamıştır. G numunesinin eğilme dayanımı ρMİN numunesinin %130,89 artmıştır. N numunesinin eğilme dayanımı G numunesinin %115,26 artmıştır.

### 3.2 Düktilite

Düktilite yapı elemanlarının taşıma gücünde önemli bir kayıp olmadan gerçekleştirebildikleri deformasyon yapabilme kabiliyeti olarak kısaca açıklanabilir. Çalışmada incelenen eğilme durumu için deformasyon kabiliyeti sehim yapabilme potansiyelidir. İncelenen numunelerin düktilite değerleri nihai sehiminin akma sehimine oranı olarak belirlenmiştir. Referans numunelerinde akma değeri ve akma değerine ait deplasman olmadığından bu numuneler için düktilite değeri belirlenememiştir. Diğer numunelerin ilgili değerler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Düktilite değerleri

| Numune Adı | ΔY Akma Deplasmanı (mm) | ΔU Kırılma Deplasmanı (mm) | μ Düktilite ΔY/ ΔU |
|------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|
| REF        | -                       | 0.1                        | -                  |
| ρMİN       | 0.84                    | 15.34                      | 18.26              |
| G          | 2.21                    | 8.69                       | 3.93               |
| N          | 2.55                    | 5.6                        | 2.20               |

### 3.3 Elastik, Plastik ve Toplam Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi eğilmeye çalışan yapı elemanlarında birim sehim miktarı için her deplasman kademesinde gerekli olan yük miktarı olarak özetlenebilir. Bu durumda enerji tüketimi yük deplasman eğrisi altında kalan alandır. Enerji tüketimi için, yük-sehim grafiğinde akma değerine kadar olan eğrinin altında kalan alan elastik enerji kapasitesini, grafikte akma değerinden sonraki kısmın altında kalan alan plastik enerji tüketme kapasitesini verirken elastik ve plastik enerji tüketme kapasitesinin toplamı, toplam enerji tüketme kapasitesini verir.

Tablo 6. Elastik, plastik ve toplam enerji tüketme kapasitesi

| Numune Adı | Elastik Enerji Tüketme Kapasitesi (Nm) | Plastik Enerji Tüketme Kapasitesi (Nm) | Toplam Enerji Tüketme Kapasitesi (Nm) |
|------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| pMİN       | 153.38                                 | 20642.56                               | 20795.94                              |
| G          | 1503.20                                | 28377.15                               | 29880.35                              |
| N          | 9504.83                                | 31147.96                               | 40652.79                              |

#### 4. SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada NSM yöntemi ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışları incelenmiştir. Numuneler yük-sehim, düktilite ve enerji kapasitesi bakımından incelenmişlerdir.

Referans kirişlerinde hiç donatı kullanılmamıştır dolayısıyla numuneler oldukça gevrek davranış göstermişlerdir. pMİN kirişlerinin; referans kirişe göre %221,35 oranında yük taşıma kapasitesi artmıştır. G numuneleri güçlendirilmeleri sebebiyle taşıdıkları maksimum yük değerinin referansa göre %451 pMİN'e göre %71,54 arttığı görülmüştür. Sonradan güçlendirilen kirişlerin (G) taşıdığı maksimum yük normal kirişlerin (N) taşıdığı maksimum yükün %30,43'üne ulaşabilmiştir. Bunun sebebi G numunesinin güçlendirme ile kazandığı donatı miktarının, N numunesi üretilirken halihazırda olması yani monolitik üretimin doğal bir sonucudur. Bu durumda performansın artırılmasına yönelik yapılan güçlendirme tekniklerinde kullanılan yardımcı elemanlardan tam performans beklemenin doğru bir yaklaşım olmadığı görülmüştür.

Güçlendirme işleminde fazladan donatı eklenmesi numunelerin rijitliğini artırarak maksimum deplasman yapabilme kabiliyetlerini pMİN kirişlerine göre %42,25 düşürmüştür. Aynı pursantaj oranına sahip numunelerden N'nin deplasman yapabilme kabiliyeti pMİN kirişlerine göre %65,09 daha azdır. Bu duruma güçlendirme işleminde kullanılan epoksinin numuneye maksimum yükten sonra kazandırdığı rijitliğin (sekant) sebep olduğu düşünülmüştür.

pMİN kirişlerine göre G kirişleri kıyaslandığında pursantaj oranı %451 artarken eğilme dayanımının %257,21 arttığı gözlemlenmiştir. Pursantaj oranları aynı olan numunelerden N'nin G'ye göre eğilme dayanımı %122,30 daha fazladır. Eğilme dayanımının artması numunenin yük taşıma kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir çünkü bütün numuneler aynı boyutta üretilmiştir dolayısıyla akma yükü fazla olan numunenin eğilme dayanımının yüksek olması doğal ve beklenen bir sonuçtur.

Betonarme elemanların performansının kıyasında düktilite önemli bir parametredir. Düktilite bir malzemenin, elemanın, çerçevenin, yapının yük taşıma kapasitesinde önemli bir azalma olmadan deplasman yapabilme kabiliyetidir. pMİN kirişlerine göre G kirişleri kıyaslandığında pursantaj oranı %451 artarken düktilite değeri %78,48 düşmüştür. Pursantaj oranları aynı olan numunelerden N'nin G'ye göre düktilite değeri %78,64 kadar azalmıştır. Güçlendirme yapılan G numunesinde eklenen güçlendirme donatısı için açılan oluklar, N numunelerinden farklı olarak süreksizlik yaratabilmesi sebebiyle süneklik değerinin azalması beklenen bir sonuçtur. N ve G numuneleri arasındaki donatılandırma farkı uygulama yöntemidir. Dolayısıyla sonradan ilave edilen güçlendirme donatısının N numunelerinden nispeten daha yüksek süneklik sonucunu vermesi G numunelerindeki NSM tekniğinin elemanlarda süneklik kaybı oluşturmadığı olumlu sonucuna ulaşmıştır.

Enerji tüketme kapasitesi maksimum eğilme yükü ve nihai sehim değeri ile ilişkilidir. Numuneler incelendiğinde elastik enerji tüketme kapasitesi G kirişlerinin pMİN kirişlerine göre 9,80 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Elastik enerji tüketiminde etkin kesit rijitliğinden kayıp olmadığı için elastik noktaya kadar tüketilen enerji üzerinde pursantaj miktarının etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca günümüzde kullanılan yapılar servis ömrü boyunca genellikle elastik bölgede olduğundan yapılan güçlendirme, elastik enerji tüketme kapasitesini artırarak güçlendirme işleminin etkili olduğunu göstermiştir. Plastik enerji tüketiminde çatlamış kesit özelliklerinden dolayı etkin kesit rijitliğinde kayıp vardır. Etkin kesit rijitliğindeki kayıp miktarı arttıkça numunelerin plastik enerji tüketim kapasitesi artmıştır. Plastik enerji

tüketim kapasitesi değeri elastik enerji tüketim kapasitesi değerinden oldukça büyük olduğu için toplam enerji tüketim kapasitesi plastik enerji tüketim kapasitesine sonuç olarak daha yakın olmuştur. Bunlara ek olarak numuneler başlangıç rijitliği bakımından incelendiğinde N numunesinin üretimi sırasında numunede herhangi bir boşluk açılmaması ve güçlendirme donatısının üretim sırasında halihazırda olması nedeniyle kesit içinde süreksizlik yoktur ve başlangıç rijitliği numuneler içindeki en yüksek değere sahiptir.  $\rho_{MİN}$  numunesi, minimum donatı oranına sahip olsa da N numunesi gibi üretimi sırasında herhangi bir boşluk açılmamasından, kesit içerisinde süreksizlik olmamasından dolayı başlangıç rijitliği değeri N numunesinden sonraki en yüksek değerdir. G numunesi, N numunesi ile aynı donatı oranına sahip olsa da bahsi geçen süreksizlik durumu G numunesinin başlangıç rijitliğini oldukça düşürmüştür. Başlangıç rijitliğini numunelerin süreksizliği ve donatı miktarları etkilemiştir. Fakat bu numunede sonradan güçlendirme durumunda performansın belirlenmesi gözetildiğinde başlangıç rijitliği kaybı toplam enerji tüketimiyle kıyaslandığında oldukça düşük bir kayıptır. Bu nedenle sonradan güçlendirme tekniği NSM ile oluşturulan giriş performansının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Çatlak karakterleri incelendiğinde donatı oranının artmasıyla birlikte nispeten eğik forma geçtiği gözlemlenmiştir. Bu durumda doğal olarak donatı oranının artması kesmeli eğilme durumuna geçiş gözlemlenmiştir.

Tüm deney sonuçları incelendiğinde NSM tekniği ile geleneksel çelik donatı kullanılarak yapılan güçlendirme işlemi beklenildiği üzere yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Güçlendirme sebebiyle artan pürsantaj oranı numunenin rijitliğini artırarak deplasman yapabilme kabiliyetini ve sünekliğini düşürmüştür. Ancak elastik enerji tüketim kapasitesinde etkin kesit rijitliğinden kayıp olmadığı için artan pürsantaj miktarı elastik enerji tüketim kapasitesini artırmıştır. Yapı elemanları servis ömrünün çok büyük bir kısmında lineer statik yüklere maruz kaldığından yapılan çalışmada uygulanan NSM tekniği ile donatı ekimi eğilme elemanı performansına olumlu katkılar sağladığı sonucuna varılmıştır.

## REFERANSLAR

- [1] Y. Alhamda, “Eğilme Etkisi Altındaki Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesine Yönelik Bazı Önerilerin Deneysel Araştırılması,” Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2019.
- [2] E. Ebru Demirci, A. P. Amil, and R. Şahin, “Çelik Korniyer ve Lamalar Yapıştırmak Suretiyle Betonarme Kirişlerin Eğilmeye Karşı Güçlendirilmesi,” pp. 103–112, 2011.
- [3] De Lorenzis, L., Nanni, A., & La Tegola, A. (2000, May). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. In International meeting on composite materials, PLAST (pp. 9-11).
- [4] F. Al-Mahmoud, A. Castel, R. François, and C. Tourneur, “Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods,” *Compos Struct*, vol. 91, no. 2, pp. 138–147, Nov. 2009, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2009.04.040.
- [5] S. M. Soliman, E. El-Salakawy, and B. Benmokrane, “Flexural behaviour of concrete beams strengthened with near surface mounted fibre reinforced polymer bars,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37, no. 10, pp. 1371–1382, 2010, doi: 10.1139/L10-077.
- [6] I. A. Sharaky, L. Torres, M. Baena, and C. Miàs, “An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete,” *Compos Struct*, vol. 99, pp. 350–365, May 2013, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.12.014.
- [7] J. A. O. Barros, S. J. E. Dias, and J. L. T. Lima, “Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams,” *Cem Concr Compos*, vol. 29, no. 3, pp. 203–217, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2006.09.001.
- [8] A. Astorga, H. Santa Maria, and M. Lopez, “Behavior of a concrete bridge cantilevered slab reinforced using NSM CFRP strips,” *Constr Build Mater*, vol. 40, pp. 461–472, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.09.095.



- [9] I. A. Sharaky, L. Torres, and H. E. M. Sallam, "Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips," *Compos Struct*, vol. 122, pp. 113–126, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.11.057.
- [10] B. Almassri, "Strengthening of corroded reinforced concrete (RC) beams with near surface mounted (NSM) technique using carbon fiber polymer (CFRP) rods: an experimental and finite element (FE) modelling study," Jun. 2015, Accessed: Nov. 25, 2024. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01195812>
- [11] A. Bilotta, F. Ceroni, E. Nigro, and M. Pecce, "Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence," *Compos Struct*, vol. 124, pp. 163–175, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.12.046.
- [12] M. Rezazadeh, S. Cholostiakow, R. Kotynia, and J. Barros, "Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research," *Compos Struct*, vol. 141, pp. 132–145, May 2016, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.01.033.
- [13] I. A. Sharaky, R. M. Reda, M. Ghanem, M. H. Seleem, and H. E. M. Sallam, "Experimental and numerical study of RC beams strengthened with bottom and side NSM GFRP bars having different end conditions," *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 882–903, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.192.
- [14] S. yeon Seo, K. bong Choi, Y. sun Kwon, and K. seok Lee, "Flexural Strength of RC Beam Strengthened by Partially De-bonded Near Surface-Mounted FRP Strip," *Int J Concr Struct Mater*, vol. 10, no. 2, pp. 149–161, Jun. 2016, doi: 10.1007/S40069-016-0133-Z/FIGURES/15.
- [15] M. A. Hosen<sup>1</sup>, M. Z. Jumaat, U. J. Alengaram, A. B. M. S. Islam, and H. bin Hashim, "Near Surface Mounted Composites for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams," *Polymers* 2016, Vol. 8, Page 67, vol. 8, no. 3, p. 67, Mar. 2016, doi: 10.3390/POLYM8030067.
- [16] S. M. Daghash and O. E. Ozbulut, "Flexural performance evaluation of NSM basalt FRP-strengthened concrete beams using digital image correlation system," *Compos Struct*, vol. 176, pp. 748–756, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.06.021.
- [17] S. Y. Seo, L. Feo, and D. Hui, "Bond strength of near surface-mounted FRP plate for retrofit of concrete structures," *Compos Struct*, vol. 95, pp. 719–727, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.08.038.
- [18] Y. Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt ; Sayın, B. Yıldızlar, and B. Özyazgan, "Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Uygulanan Betonarme Kirişlerde Moment-Eğrilik İlişkisi," *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol. 6, no. 2, pp. 42–56, Jun. 2016, Accessed: Apr. 23, 2024. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yted/issue/22211/238479>
- [19] F. Altun, D. M. Özcan, and M. Vekli, "Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücünün Deneysel İncelenmesi," *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, 2002.
- [20] Y. Zhou, M. Gou, F. Zhang, S. Zhang, and D. Wang, "Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation," *Mater Des*, vol. 50, pp. 130–139, 2013, doi: 10.1016/J.MATDES.2013.02.089.
- [21] TS EN 12390-5:2019 Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini.
- [22] "ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure'da," 2008, Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: [www.concrete.org/committees/errata.asp](http://www.concrete.org/committees/errata.asp)
- [23] "Sika AnchorFix®-2+" High Performance Anchoring Adhesive Epoxy Product data and user manual.