Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 24, Sayı 3, 2019 ARAŞTIRMA

DOI: 10.17482/uumfd.477912

YALIN VE LİFLİ POLİMER SARGILI BETONARME KİRİŞLERDE EĞİLME DAVRANIŞININ SONLU ELEMAN MODELLEMESİ

Hasan Orhun KÖKSAL [*]
Selen AKTAN [*]
Kanat Burak BOZDOĞAN [*]

Alınma: 02.11.2018; düzeltme: 18.02.2019; kabul: 23.10.2019

Öz: Betonarme yapı ve yapı elemanları, kullanım süreleri boyunca çevresel faktörler, uygun olmayan kullanım, deprem etkisi gibi çeşitli yük etkilerine maruz kalırlar. Düşük malzeme dayanımı ve kalitesi yapının taşıma gücünü azaltan en önemli faktördür ve diğer etkenlerle birlikte değerlendirildiğinde yapı ve yapı elemanlarında hasar oluşumunun en önemli nedenidir. Bu nedenle yapıların performansının hasar düzeylerine göre belirlenmesi ve uygulanacak onarım/güçlendirme yöntemine karar verilebilmesi için mevcut malzemelerin kalitesinin belirlenmesi ile birlikte bir ön tasarım çalışması yapılması gerekmektedir.
Çalışmanın en önemli adımlarından birisi, yapının tamamının ya da belirli bir bölümünün sayısal modelinin hazırlanması işlemidir. Hassas bir sayısal model oluşturmak için malzemelere ait bünyesel bağıntılar ile elemanların bireysel davranışının gerçekçi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada sonlu elemanlar modelinin deneysel sonuçlara olan uygunluğu araştırılmıştır. Bu amaçla yazarların daha önce deneysel çalışmalarını gerçekleştirdikleri yalın ve güçlendirilmiş betonarme kirişler ile literatürde betonarme kirişler için yapılan deneysel çalışmaların modellemesi sonlu elemanlar yöntemi ile yapılarak elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar, daha önce yığma duvarların sayısal modellenmesinde kullandıkları elasto-plastik hasar teorisi yaklaşımını betonarme kirişler için geliştirerek uyarlamışlardır. Çalışmada LUSAS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak iki adet yalın ve üç adet Lifli Polimer (LP) sargılı kirişlerin eğilme altındaki davranışları başarı ile modellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal modelleme, Sonlu elemanlar yöntemi, Betonarme kiriş, Kırılma kriterleri

Finite Element Modeling of Flexural Behavior of Unreinforced and Fiber Reinforced Polymer Strengthened Reinforced Concrete Beams

Abstract: Reinforced concrete structures and structural elements are subjected to various load effects during their lifetime, such as environmental factors, improper handling, earthquake effects. Low material strength and low quality are the most important factors that reduce the load carrying capacity and when evaluated together with other factors, it is the most important cause of damage to the structures and structural elements. Therefore, in order to determine the performance of the structures according to the damage levels and decide on the repair / strengthening method to be applied, a preliminary design study has to be done with determining the quality of the existing materials. One of the most important steps of this work is to prepare the numerical model of a complete structure or a specific part of the structure. In order to develop a precise numerical model, it is necessary to define the behavior of the elements with the constitutive relations of the materials realistically. In this study, the numerical models of the reinforced

[*] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Terzioğlu Kampüsü 17020 ÇANAKKALE

concrete beams which authors had already performed the experiments and reinforced concrete beams subjected to experimental loads in the literature are modelled and the results are presented. Researchers adopted the approach of elasto-plastic damage theory for reinforced concrete beams previously used in the numerical modeling of masonry walls. In this study, the flexural behavior of two unreinforced and three Fiber-reinforced polymer (FRP) strengthened beams with using LUSAS finite element software successfully modeled.

Keywords: Numerical modeling, Finite element method, Reinforced concrete beam, Yield criteria

1. GİRİŞ

Lifli polimer sargı yapı elamanların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden birisidir. Lifli polimer sargılı yapı elemanlarının deneysel ve sayısal olarak modellenmesine yönelik olarak literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Norris ve diğ. (1997) çalışmalarında, ince karbon lifli polimer (KLP) levhalarla güçlendirilmiş hasarlı veya düşük dayanımlı betonarme kirişlerin davranışlarını incelemişlerdir. Bunun için 19 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Eğilme dayanımı arttırılan deney elemanlarında göçme, KLP levhalarının yapışma yüzeylerinden sıyrılmasından sonra gelişen kesme çatlağı nedeni ile gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarına göre güçlendirme uygulamalarında en fazla katkı, KLP levhaların kesme çatlakları ile paralel uygulandığı uygulamalarda elde edilmiştir.

Khalifa ve Nanni (2000) 6 adet gerçek ölçekli betonarme T-kesitli kirişin kesme dayanımı arttırmak için KLP kullanmışlardır. Sonuç olarak farklı şekillerde uygulanan KLP, kirişlerin kesme dayanımını % 35 - % 145 aralığında değişen oranlarda arttırmıştır.

Godat ve diğ. (2010), LP ile güçlendirilen kirişlerde davranışa boyut etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, 3 ayrı seride farklı boyutlara sahip 7 betonarme kirişi incelenmiştir. Sonuç olarak KLP şeritlerin efektif eksenel birim şekil değiştirmesinin küçük numunelerde daha yüksek olduğu ifade edilmiştir.

Sayın ve Manisalı (2010) FRP takviyeli betonarme kirişlerde ara yüzey gerilme parametreleri üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada sayısal modelleme için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada ara yüzey gerilmelerinin değerlendirilmesinin, bu tür kirişlerdeki temel özellikleri anlamak ve uygun tasarım kuralları geliştirmek açısından önemli olduğu ifade edilmiştir.

Dong ve diğ. (2012), karbon veya cam lifli polimerlerle (CLP), düşey yönde ya da açılı olarak yerleştirilen levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, yorulma ve yorulma sonrası statik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada sonuç olarak kesme dayanımını ve rijitliği arttırmada, diyagonal CLP uygulamasının düşey yönde yapılan uygulamadan daha etkili olduğu gösterilmiştir.

Mitolidis ve diğ. (2012), eğilme veya kesmeye karşı, çelik takviye ve KLP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler üzerinde bir grup deney yapmışlardır. Çalışmada yıllanmış betonarme elemanları temsil etmek üzere düşük dayanımlı beton kullanılmıştır.

Parra ve diğ. (2012) KLP ile yapılan güçlendirmeleri, göçme şekillerine göre karşılaştırmışlardır. Çalışmada, liflerin yönünün mümkün olduğunca kesme çatlağına dik yönde olması gerektiği ifade edilmiştir.

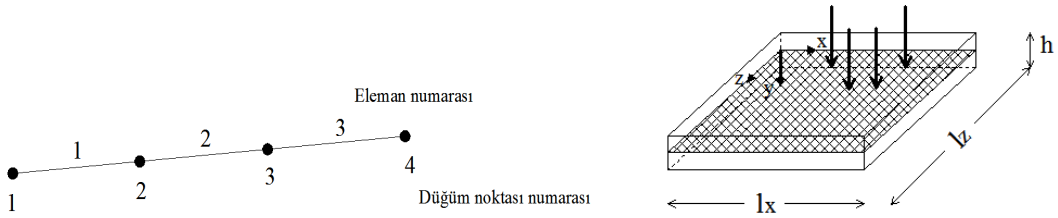
Bu çalışmada, öncelikle modellemelerde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi kısaca tanımlanmış, sürekli ortamın boyutuna ve parçanın geometrisine uygun olarak seçilen elemanlar tanıtılarak şekillerle gösterilmiştir. Gereç ve Yöntem kısmında sayısal modelleme teknikleri ile doğrusal ötesi davranış için kullanılan akma/kırılma kriterleri açıklanmıştır. Bulgular bölümünde gerçekleştirilen modelleme çalışmaları ve sonuçları yer almaktadır. Al-Amery ve Al-Mahaidi (2006) çalışmasına ait deneysel betonarme kiriş örneği, akma/kırılma kriterleri kısmında açıklanan Drucker-Prager (DP) kriteri ve elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılarak

ayrı ayrı modellenirken; daha önce ÇOMÜ BAP kapsamında deneysel çalışmaları gerçekleştirilen Köksal ve diğ. (2017) çalışmasına ait yalın ve üç farklı biçimde Lifli Polimer (LP) sargı ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin modelleme çalışması ise elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yalnızca alt yüzeyi LP sargılı 2 adet kiriş için betonarme hesap yapılarak bulunan yük değeri deneysel ve modelleme sonucu elde edilen yük değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM VE MODELLEME KABULLERİ

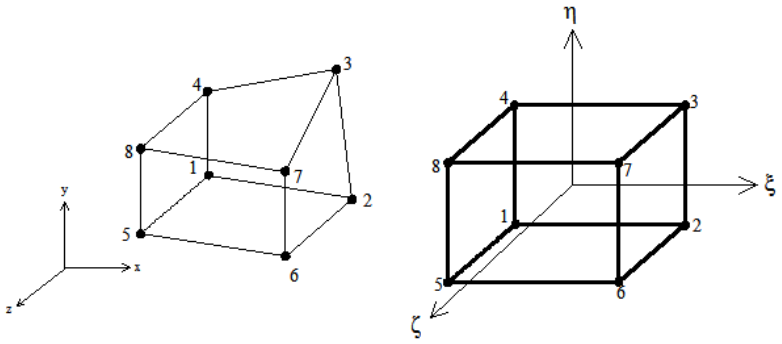
2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine belirli bir yaklaşıklıkta çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Yöntemde sürekli veya süreksiz bir ortam varsayımsal sınırlarla sonlu sayıda elemana bölünerek analiz yapılır. Sonlu elemanlar yönteminde çözümün ilk adımı, eleman tipinin seçilerek çözüm bölgesinin sonlu sayıda elemana ayrılmasıdır. Çözüm bölgesini oluşturan malzemelere, geometrik yapıya ve sınır şartlarına bağlı olarak en uygun sonlu eleman tipi ve boyutu seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etmeleri oranında elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır (Köksal, 1992). Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elemanlardan bir boyutlu elemanlar, tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılırlar (Şekil 1). Bu çalışmada çelik donatı ve etriyeler gibi çubuk elemanlar bir boyutlu elemanlarla (BRS2) modellenmiştir. İki boyutlu (yüzeysel) elemanlar, kalınlıkları diğer boyutları yanında ihmal edilen elemanlardır (Şekil 1). Bu elemanlar düzlem gerilme veya şekil değiştirme problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu çalışmada DP kriteri kullanılarak yapılan modellemede LP yüzeyler modellerken iki boyutlu eleman (QTS4) kullanılmıştır.



Şekil 1:
Analizde kullanılan bir ve iki boyutlu elemanlar

Çözüm bölgesinin sınırlarının eğri denklemleri ile tanımlanması durumunda, bu sınırlara uyum sağlayacak elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. İzoparametrik sonlu elemanlar, üzerindeki düğüm noktalarının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil fonksiyonu ile tanımlandığı elemanlardır (Chandrupatla ve Belegundu, 2002). Şekil 2'de görülen altı yüzeyli sekiz düğüm noktalı eleman (HX8M) bu çalışmada beton elemanlar için kullanılmıştır.



Şekil 2:
Analizde kullanılan izoparametrik elemanlar (Liu, 2003)

2.2. Sayısal Modelleme

Sayısal modelleme, malzeme ve kesit bilgilerinin tanımlanarak, taşıyıcı sistem elemanlarının matematiksel terimlere dönüştürülmesi işlemidir. Modelde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri belirlenirken, doğrusal elastik davranış gösteren homojen ve izotrop malzemelerde diferansiyel eleman olarak da bilinen, malzemenin çok küçük bir parçasının davranışına göre yapılan kabuller kullanılır. Gerçekte heterojen bir yapıda olan ve yön bağımlı davranış gösteren beton, yığma, harç ve diğer kompozit malzemeler genel olarak modelleme yaklaşımlarında homojen ve izotrop olarak kabul edilmektedirler. Malzemeler modellenirken, yapı malzemesinin gerilme-birim şekil değiştirme özellikleri göz önüne alınır. Anılan malzemeleri homojen ve izotrop olarak modellemek için, gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerinin malzeme bünyesindeki en büyük heterojenliği temsil eden kısmın birkaç katı kadar olan bir bölgede belirlenmesi gereklidir. Kusursuz bir sayısal model oluşturmak için malzeme davranışı ve elemanların bireysel davranışının çok iyi etüt edilmesi şarttır (Can ve Ünay, 2012). Sayısal model oluşturulurken malzemedeki plastik davranışı tanımlamak içi bu çalışmada akma/kırılma kriterlerinden Drucker-Prager kriteri ile izotropik hasar modeli kullanılmıştır.

2.3. Plastik Malzeme Modeli için Akma/Kırılma Kriterleri

Elasto-plastik davranış; malzemenin gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisinde başlangıç kısmı elastik, akma sınırından sonra ise plastik şekil değiştirmenin başladığı plastik davranış ile ifade edilir. Plastik şekil değiştirmenin başladığı gerilme değerlerini ifade eden ilişkiler akma kriteri olarak tanımlanır. Üç boyutlu gerilme uzayında akma bir yüzey şeklinde tanımlanır. Yükleme altında oluşan gerilme akma yüzeyinin içindeki bölgede ise malzeme elastik davranış gösterecek, gerilme akma yüzeyi üzerindeyse malzemede plastik şekil değiştirmeler görülmeye başlanacaktır (Ceylan, 2008). Malzemeler için üretilmiş olan kırılma kriterleri ile malzemede oluşacak gerilmeler sayısal analizlerde belirlenebilir. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde en önemli adımlarından biri betonda kalıcı şekil değişiminin başlangıcı olarak kullanılacak akma/kırılma kriterinin seçilmesidir (Citto, 2008).

2.3.1. Drucker-Prager Kriteri

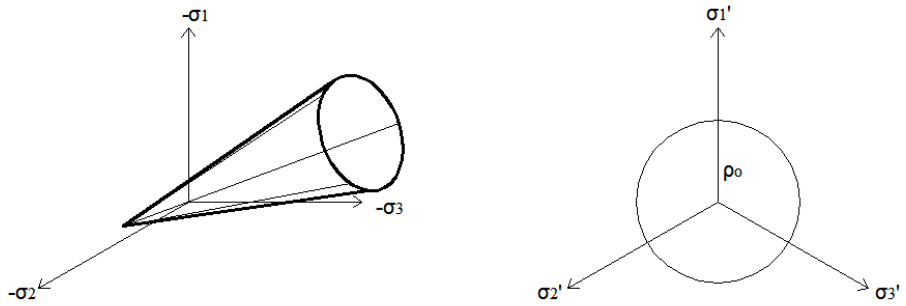
DP akma/kırılma kriteri, beton ve metal türü malzemeler için en yüksek dayanımda hem hidrostatik basınç, hem de deviatör gerilme etkilerini dikkate alarak davranışı başarılı bir şekilde ifade eden kriterdir (Şekil 3). Akma yüzeyi,

$$f\,(I_1,J_2) = \alpha.I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{1}$$

şeklinde ifade edilir (Chen ve Han, 1988). Burada, Burada I_1, gerilme tensörü σ_{ij}'nin birinci invaryantını, J_2 deviatorik gerilme tensörünü, α ve k malzeme sabitlerini göstermektedir. α'nın 0 olması durumunda kriter, akma/kırılma kriterlerinin en pratik matematiksel formu olan von-Mises kriteri ile aynı olacaktır. (1) denkleminin gösterdiği akma yüzeyi, asal gerilme uzayında bir dairesel koniyi ifade eder. Ayrıca α ve k malzeme sabitleri, Mohr-Coulomb kriterindeki içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) değerlerine bağlı olarak,

$$\alpha = \frac{2\sin\emptyset}{\sqrt{3}\,(3-sin\,\emptyset)} \qquad k = \frac{6c\cos\emptyset}{\sqrt{3}\,(3-sin\,\emptyset)} \tag{2}$$

şeklinde tanımlanabilir (Chen ve Han, 1988).



a. b.

Şekil 3:
Drucker-Prager kriteri: ***a.*** *Asal gerilme düzleminde akma yüzeyi,* ***b.*** *π düzlemi (Aktan, 2016)*

Doran ve diğ. (1998), beton prizma ve betonarme kirişler için yaptıkları çeşitli sonlu eleman uygulamalarının sonuçlarını ele alarak kohezyon değeri için bir denklem önermişlerdir. Kohezyon, betonun ayrışmaya karşı direnç kapasitesini belirleyen, doğrudan çekme dayanımına bağlı bir malzeme parametresidir. Betonun kohezyonu için önerilen denklem aşağıdaki gibidir:

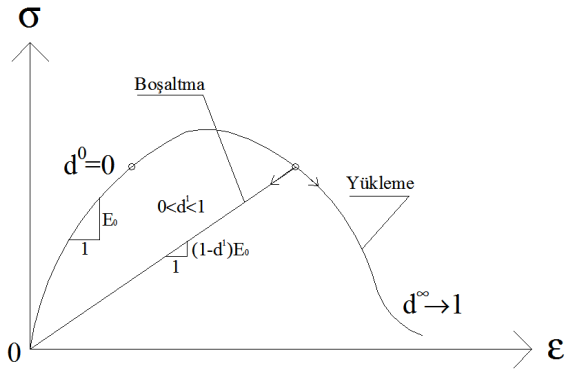
$$c = 0{,}231 \ln(E_o . d_{max}^2) - 0{,}60 \tag{3}$$

Burada, E_o betonun elastisite modülü, d_{max} ise beton karışımındaki en büyük agrega tane boyutudur. Betonun çekme mukavemeti, beton karışımının içyapısına bağlıdır ve genel olarak betonun basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Betonarme kirişlerde çelik donatılar, olası kesme çatlaklarına karşı aderans ve kohezyonu arttırmak için kullanılırlar. DP kriterinin diğer parametresi olan içsel sürtünme açısı ise 30°- 35° olarak kabul edilmiştir (Köksal ve Karakoç 1999, Lubliner ve diğ. 1989).

2.3.2. İzotropik Hasar Modeli

Bütün malzemelerde başlangıç halinde bulunan mikro boşluklar ve çatlaklar, beton, yığma, zemin gibi tanecikli malzemeler söz konusu olduğunda çok daha fazla önem kazanmaktadır. Temel yaklaşım ve varsayımları Kachanov tarafından (1958, 1986) tanımlanan hasar mekaniği yaklaşımı, malzeme bünyesinde bulunan mikro boşlukların ve kılcal çatlakların artan yükle büyümesi sonucunda başlangıçtaki eleman veya sistem rijitliğini bir hasar parametresi kullanarak azaltmak esasına dayanır. Artan yükle beraber gelişen hasarı bünyesel bağıntılara yansıtmak için izotropik hasar mekaniği yaklaşımında bir d parametresi kullanılır. Belirli bir hasar eşiğinin aşılması ile birlikte malzemenin içyapısındaki kusurlarının da bir yansıması olan başlangıç elastisite modülü değeri kademeli olarak azalır. Değeri 0 ila 1 arasında olan bir hasar değişkeni (d) ile bu kademeli azaltma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 4) (Oliver ve diğ. 1990, Köksal ve Karakoç, 1999). Burada, E elastisite modülü, ε ise birim şekil değiştirmedir.

$$\sigma = E\ (1 - d).\varepsilon \tag{4}$$



Şekil 4:
Hasar mekaniğinde eksenel gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı (Oliver ve diğ., 1990)

Hasar gelişimini belirleyen *d* ile tanımlanan hasar değişkeni sonlu elemanlarda oluşan birim şekil değiştirmeler ve beton için önerilen akma/kırılma zarfları kullanılarak belirlenir. Bu yapılırken betonda çatlak düzleminde birim alanda çatlak açılması için gerekli G_f "kırılma enerjisinin" kullanılması, beton gibi yarı gevrek malzemelerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde sonuçların seçilen boyuttan bağımsız olarak elde edilmesine imkan vermektedir. Yarı gevrek malzemelerde karakteristik uzunluk olarak tanımlanan l_{ch}, kullanılan malzemenin mukavemet özelliklerini tümüyle yansıtabilen, doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri için seçilebilecek minimum değeri gösteren bir tasarım büyüklüğüdür (Karakoç ve diğ. 2005). Daha küçük karakteristik uzunluk değerlerinin malzemeyi olduğundan daha zayıf hale getireceği göz önüne alınarak; beton için maksimum agrega boyutunun 3 ila 5 katı olacak şekilde karakteristik uzunluk değerleri kullanılarak kırılma enerjisi değerleri hesaplanabilir. Beton gibi çatlak önü bölgesinde yumuşama davranışı gösteren malzemelerde kırılmayı tanımlamak için Köksal ve Karakoç (1999), kırılma enerjisini Oliver ve diğ. (1990)'nin önerdiği izotropik hasar modelini geliştirerek Denklem 5'teki gibi ifade etmişlerdir:

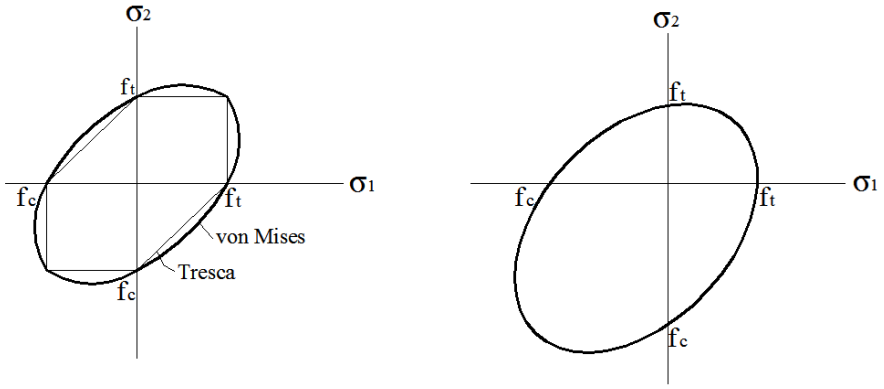
$$G_f = k.l_{ch}.\sigma_{max}^2 \,/\, E_0 \tag{5}$$

Literatürde, bu değer için 2,55 ve 4,71 arasında değerler de önerilmiştir (Irwin, 1958, Dugdale, 1960, Barenblatt, 1962, Hui ve diğ. 2003). Köksal ve Karakoç (1999) ile Aktan (2016) çalışmalarında *k* değeri 5,16 alınmıştır. Bu durumda G_f ifadesi Denklem 6'daki gibi ifade edilir:

$$G_f = 15{,}48.d_{max}.f_t^2 \,/\, E_0 \tag{6}$$

2.4. Elasto-plastik Hasar Yaklaşımı

Hasar modelleri, hasarın başlangıcını ve hasar sonrası davranışı tanımlayan parametreler içerir. LUSAS sonlu eleman yazılımında tanımlı olan Simo ve Oliver hasar modelleri ile yapılan analizler, elastik malzeme modelleri ile doğrusal olmayan modellerden von-Mises, Hill ve Hoffman modelleri ile birlikte uygulanabilmektedir. Hasar modellerinden Simo, hasarın çekme ve basınçta eşit olarak oluşmasına izin verirken; Oliver modelinde çekme ve basınç hasar dayanımlarındaki farklılık hesaba katılabilmektedir. Bu doğrultuda, modelleme çalışmalarında Oliver hasar modeli tercih edilmiş; plastik şekil değiştirme ise geliştirilmiş von-Mises plastisite modeliyle ifade edilmiştir. Geliştirilmiş von-Mises akma kriteri, kırılma yüzeyini belirlemek üzere çekme ve basınç gerilme değerlerini ayrı ayrı dikkate almaktadır ($f_c \neq f_t$). (Şekil 5).



a. b.

Şekil 5:
a. *von-Mises,* ***b.*** *geliştirilmiş von-Mises akma kriteri*

Oliver hasar modelinde çok eksenli basınç altındaki izotropik homojen bir malzemenin davranışı 3 adet parametre ile tanımlanır. Bunlardan "başlangıç hasar eşiği" τ^*; doğrusal olmayan davranışın başlangıcını gösterir. Elasto-plastik malzeme analizlerinde başlangıç akma gerilmesine benzer bir fonksiyon olarak göz önüne alınır. f_t, malzemede hasarın başladığı çekme dayanımını, E_o ise elastisite modülünü göstermek üzere Denklem 7'deki gibi tanımlanır:

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \tag{7}$$

İkinci parametre olan A malzeme parametresi, doğrusal olmayan analizde seçilen sonlu eleman ağ boyutunun sonuca etki etmemesi amacıyla seçilen eleman boyutları ve kırılma enerjisinin bir fonksiyonu olarak kullanılır. A için de daha önceki bir çalışmada (Köksal ve diğ. 2004) betonarme için kullanılan yaklaşık bağıntı bu çalışmadaki analizlerde de kullanılmıştır:

$$A = \frac{h}{310} \tag{8}$$

Buradaki h değeri 3 boyutlu modelde her üç doğrultudaki eleman boyutlarının göz önüne alındığı bir ifadedir:

$$h = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \tag{9}$$

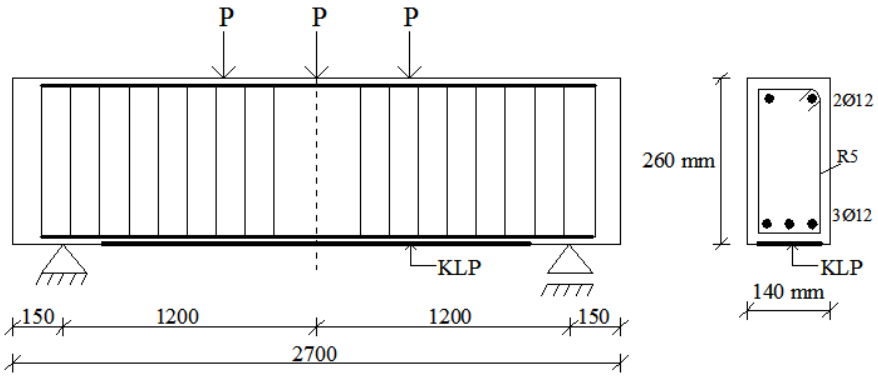
Hasar modeli için tanımlanan son malzeme parametresi hasar oranı η; malzemenin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki oranı ifade eder:

$$\eta = \frac{f_c}{f_t} \tag{10}$$

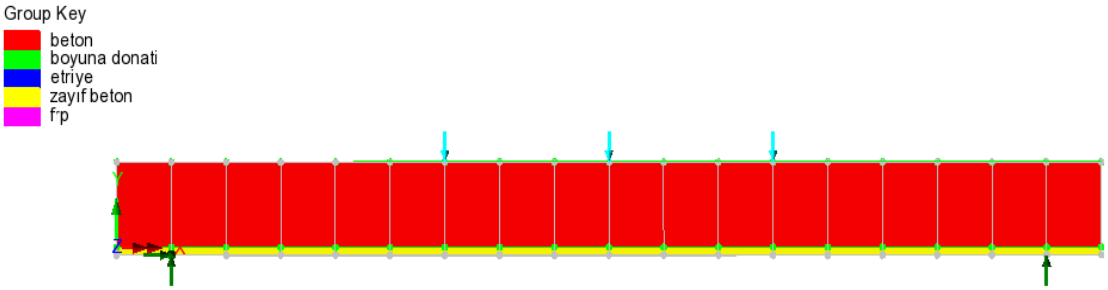
Bu çalışmada, betonarme kirişler modellenirken kirişin eğilme donatısının altında kalan kısmı zayıf beton olarak modellenmiştir. Bu bölge, yükleme sonucu ilk olarak hasar görecek ve kırılacak bölge olacaktır. Bu bölgedeki malzemenin donatılı betonarme malzemeye göre son derece zayıf davranacağı açıktır. Bu davranışı modele yansıtabilmek için bu bölgeyi farklı bir malzeme olarak tanımlamak anlamlı olacaktır.

3. MODELLEME

Bu bölümde yalın ve LP sargılı betonarme kirişler ile ilgili modelleme çalışmaları verilmiştir. LP sargılı betonarme kirişlerin modellemesi çalışması ilk olarak Al-Amery ve Al-Mahaidi, (2006) deneysel çalışması için yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada yazarlar 1 tanesi kontrol amaçlı güçlendirilmemiş, diğerleri farklı şekillerde karbon lifli polimer (KLP) levha ve sargıları kullanarak güçlendirilmiş 6 adet betonarme kirişi test etmişlerdir. Şekil 6'da geometrisi ve donatı düzeni verilen kirişlerin boyutları 140x260x2700 mm'dir. Modelleme çalışması yapılan RR3 kirişinde, 3 kat KLP levhası kiriş mesnetlerinden 100 mm uzaklıktan başlayarak orta kısma 2000 mm uzunluğunda uygulanmıştır. RR3 kirişinin 3 boyutlu sonlu eleman modeli ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

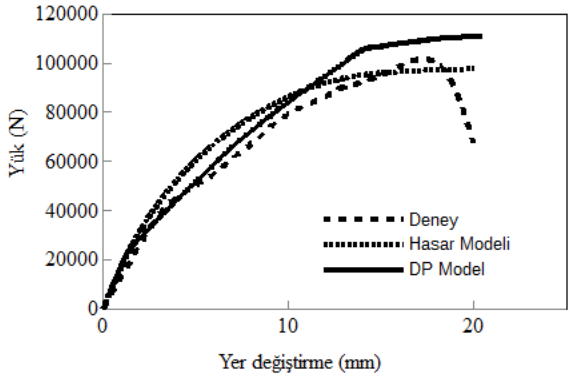


Şekil 6:
RR3 kiriş geometrisi ve donatı düzeni (Al-Amery and Al-Mahaidi, 2006)

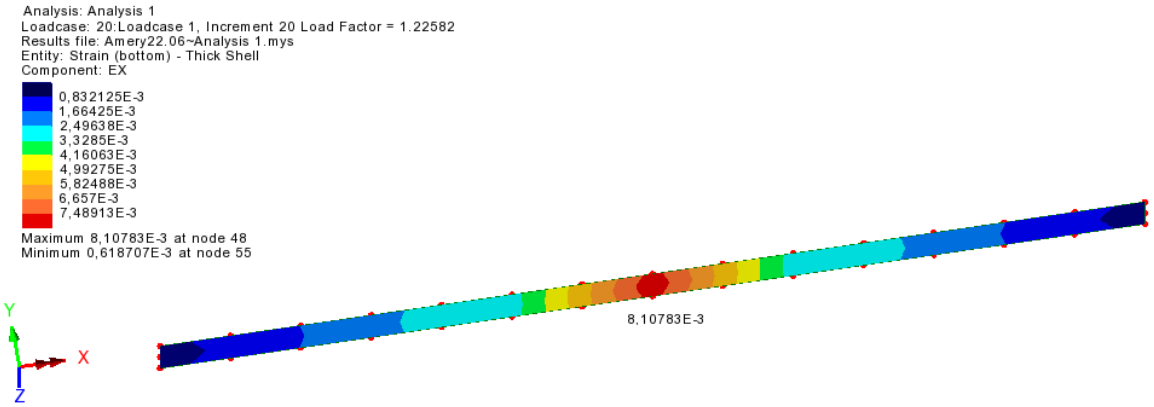


Şekil 7:
RR3 kirişine ait oluşturulan sonlu eleman modeli

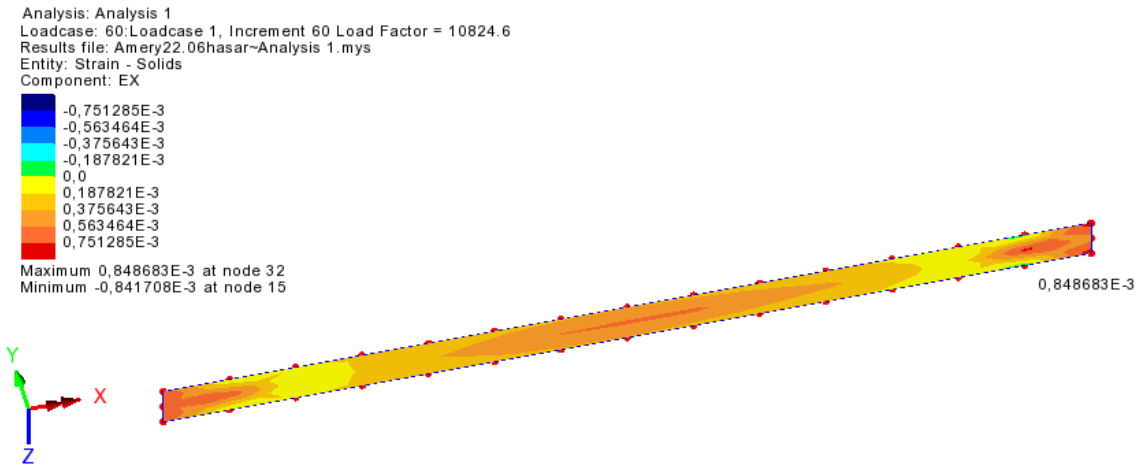
Al-Amery ve Al-Mahaidi, (2006) çalışmasına ait RR3 kirişinde hem DP akma kriteri, hem de elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılarak modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Her iki analiz sonrası deneysel ve modelleme çalışmasına ait yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 8'de, DP kriteri ile çözüm sonrası deney kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı ise Şekil 9'da verilmiştir. Hasar modeli ile çözüm sonrası deney kirişine ait LP'nin modelleme sonucu şekil değiştirme dağılımı Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 8:
RR3 kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi



Şekil 9:
RR3 deney kirişine ait LP'nin DP kriteri ile analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı

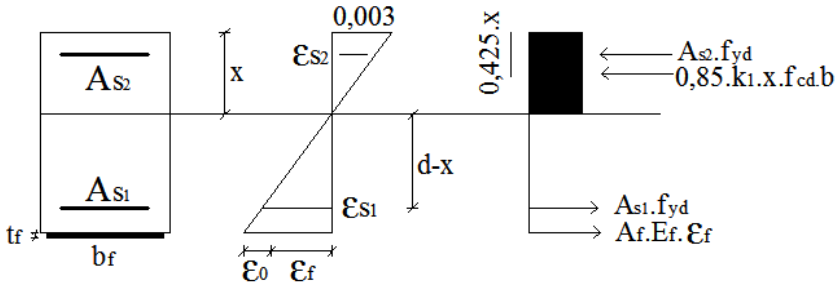


Şekil 10:
RR3 deney kirişine ait LP'nin hasar modeli ile analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı

Analiz sonuçları incelendiğinde, yalnızca LP bölgesinin şekil değiştirme değerlerinin görülebildiği Şekil 9 ve 10'da, analizlerin sonlandırıldığı 0,008 şekil değiştirme değerlerinin farklı bölgelerde oluştuğu görülmüştür. DP kriteri ile analiz sonucu maksimum şekil değiştirme kirişin orta bölgesinde oluşurken, hasar yöntemi ile modelleme sonucu maksimum şekil

değiştirme hem orta hem de mesnet bölgesine yakın bölgede meydana gelmiştir. Bu durum, Şekil 8'deki yük-yer değiştirme ilişkisi incelendiğinde de görülebilmektedir. Elasto-plastik hasar yaklaşımı modelinde deneysel gözlemlerle uyumlu bir biçimde yüklerin mesnetlere doğru aktarıldığı ve bunun sonucu olarak yük-sehim ilişkisinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu görülmektedir.

RR3 kirişine ait betonarme kesit hesabı yapılmış ve moment taşıma gücü ile taşıma yükü hesaplanmıştır (Şekil 11).

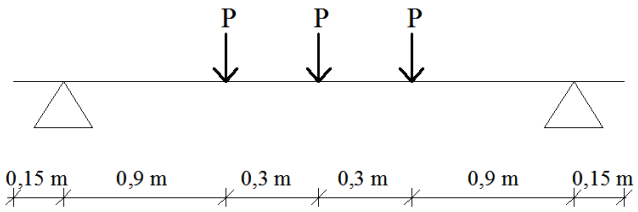


Şekil 11:
LP ile güçlendirilmiş kirişte iç kuvvet denge durumu

$$M_r = A_{s_1}.f_{yd}.(d - 0{,}425.x) + A_{s_2}.E_s.\varepsilon_{s_2}(0{,}425.x - d_2) + A_{LP}.E_{LP}.\varepsilon_{LP}.(h - 0{,}425.x) \quad (11)$$

$$F_{s_2} + F_c = F_s + F_{LP} \quad (12)$$

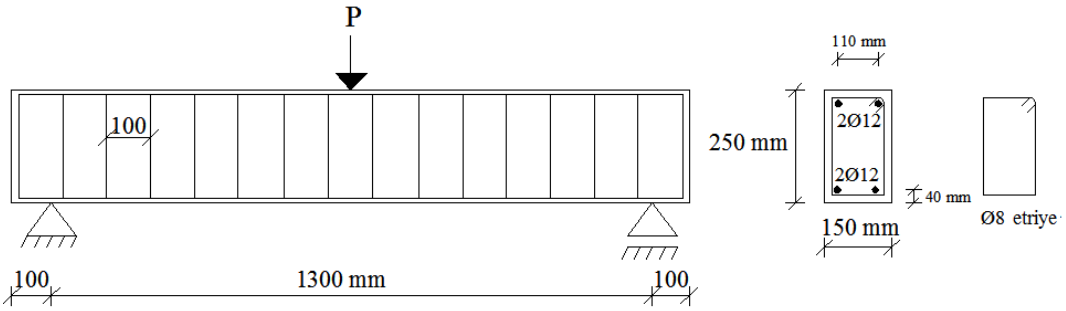
Deformasyonların uygunluğu şartları kullanılarak çözüldüğünde M=53,1 kNm elde edilmektedir. Şekil 12'deki gibi sistemin denge durumundan yük değeri 101,1 kN olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmada ise bu değer 100,3 kN'dur. Drucker-Prager kırılma kriteri ile yapılan modellemede elde edilen yük değeri 111,5 kN, elasto-plastik hasar yaklaşımı modeli ile analiz sonucu elde edilen yük ise 97,7 kN'dur.



Şekil 12:
Moment taşıma gücünden yük tayini

Betonarme kiriş modelleme çalışması için son olarak Köksal ve diğ. (2017) çalışmasına ait yalın ve üç farklı biçimde LP sargı ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki yük-sehim ilişkileri, veri toplama cihazları tarafından yük hücresi ve deplasman sensörlerinden (LVDT) elde edilen veriler yardımıyla belirlenmiş ve yapısal performans açısından incelenmiştir. Yalın ve güçlendirilmiş kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı şeması Şekil 13'te, güçlendirme sonrası betonarme kirişlerin görünüşleri Şekil 14'te, deney sonucu elde edilen yük-sehim ilişkileri ise

Şekil 15'te verilmiştir. KN güçlendirilmemiş kontrol numunesini, SN ise güçlendirilmiş yani sargılı numuneyi ifade etmektedir. SN1 kirişinde yalnızca kirişin alt kısmında LP uygulaması yer almaktadır. SN2 kirişinde alt yüzey ile birlikte yan yüzeylerin de güçlendirildiği U sargı söz konusudur. Güçlendirilmeyen kısımlar, kirişin döşeme ile birleştiği ve döşeme içinde kalan yüksekliğini ifade etmektedir. SN3 kirişi ise, FBA-2014-185 no.lu proje kapsamında etkili bir güçlendirme yöntemi olarak önerilen, kirişin pas payı ile birlikte çekme donatısını da içine alacak şekilde 50 mm'lik bir kısmın LP ile sarılması sonucu oluşmuştur. Böylece yalnızca alt yüzeyin sarıldığı güçlendirme yöntemine göre, LP'nin yan yüzeylere doğru biraz daha devam ettirilerek uygulanan yöntemle neredeyse U sargılı yönteme göre aynı değerler elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu ise bu yöntemin gerçekten etkili bir güçlendirme yöntemi olduğunu, bu numunede SN2 yani U sargılı kirişe göre taşıma gücü ve sehim bakımından çok yakın değerler elde edilmesi amaçlanmıştır. Yalnızca alt yüzeyin güçlendirildiği SN1 numunesinde 101 kN taşıma gücü ölçülürken, SN2 numunesinde bu değer 123,1 kN, SN3 numunesinde ise 118,2 kN olarak ölçülmüştür. Böylece çok az bir malzeme ilavesiyle gerçekleştirilen güçlendirme yönteminde, yalın kirişe oranla %154, yalnızca alt yüzeyin güçlendirildiği yönteme göre ise %17'lik bir taşıma gücü artışı gözlenmiştir. SN2 ve SN3 numuneleri arasındaki sehim değeri farkı ise yalnızca 1 mm'dir.



Şekil 13:
Deney kirişlerinin geometrik özellikleri ve donatı şeması (Köksal ve diğ., 2017)

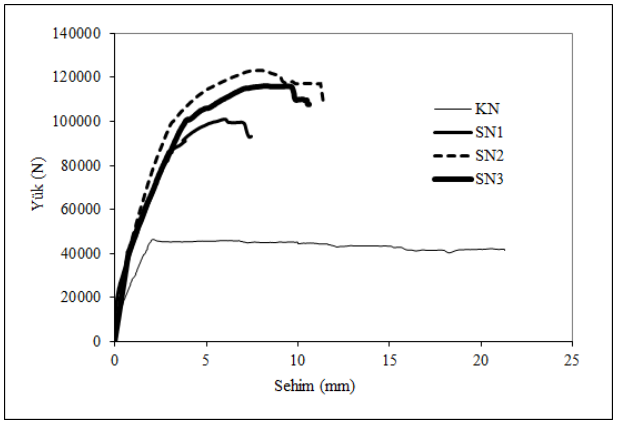


a. b.



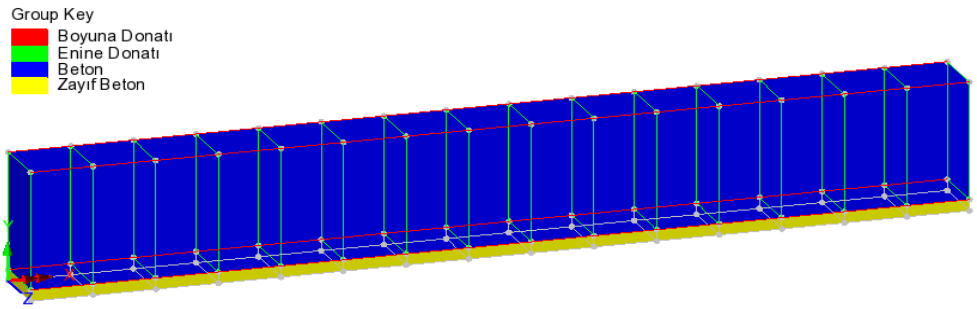
c. d.

Şekil 14:
Yalın ve güçlendirilmiş betonarme kirişlerin görünüşleri ***a.*** *KN* ***b.*** *SN1* ***c.*** *SN2* ***d.*** *SN3 (Köksal ve diğ., 2017)*

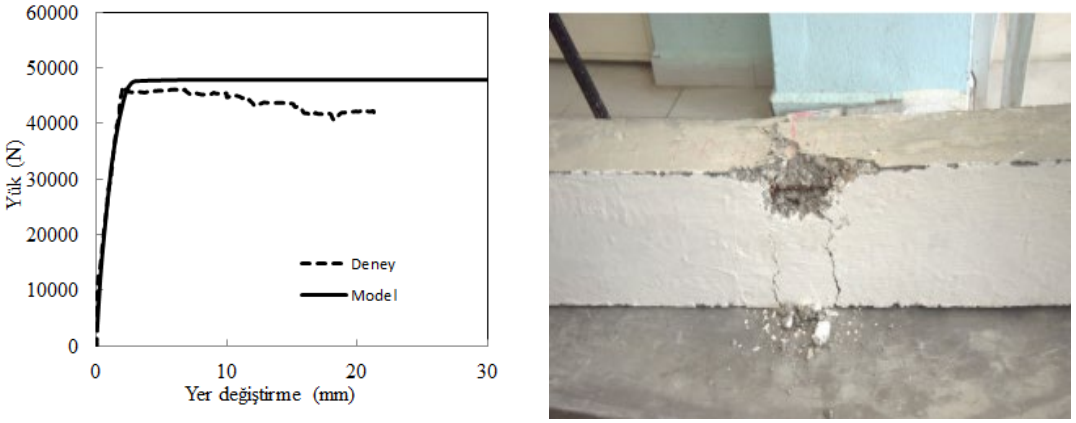


Şekil 15:
Deney kirişlerinin karşılaştırmalı yük sehim grafiği (Köksal ve diğ, 2017)

Köksal ve diğ. (2017) çalışmasına ait KN deney kirişinin numerik modeli, modelleme aşamasında yapılan eleman gruplandırması ile birlikte Şekil 16'da görülmektedir. KN kirişine ait deneysel ve modelleme çalışması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi Şekil 17a'da, deney sonrası kirişin görünüşü ise Şekil 17b'de verilmiştir.



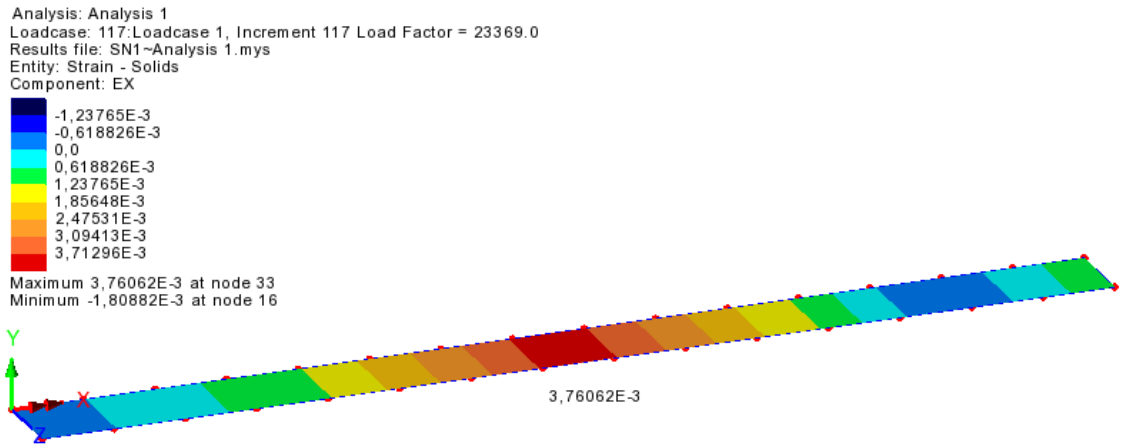
Şekil 16:
KN deney kirişinin numerik modeli



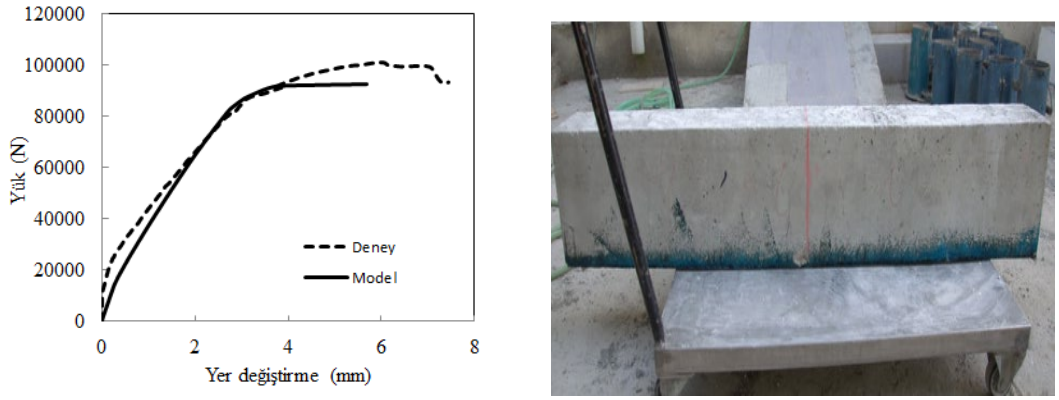
a. b.

Şekil 17:
a. *KN deney kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi* ***b.*** *Deney sonrası kirişin görünüşü*

Köksal ve diğ. (2017) çalışmasına ait SN1 deney kirişinin analiz sonucu LP kısmının şekil değiştirme dağılımı Şekil 18'de verilmiştir. Şekil 18 incelendiğinde oluşan şekil değiştirme değeri 0,008'e ulaşmamıştır ve bu durum deneye göre daha önce sonuçlanan yük-yer değiştirme ilişkisinde de görülebilmektedir. Deneysel ve modelleme çalışması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi ise Şekil 19a'da, deney sonrası kirişin görünüşü ise Şekil 19b'de verilmiştir.



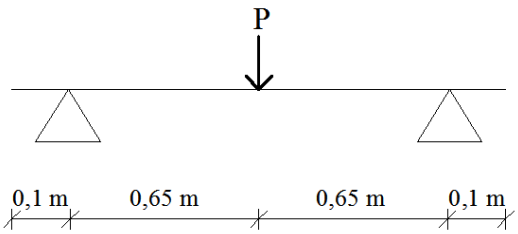
Şekil 18:
SN1 deney kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı



a. b.

Şekil 19:
a. *SN1 deney kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi* ***b.*** *Deney sonrası kirişin görünüşü*

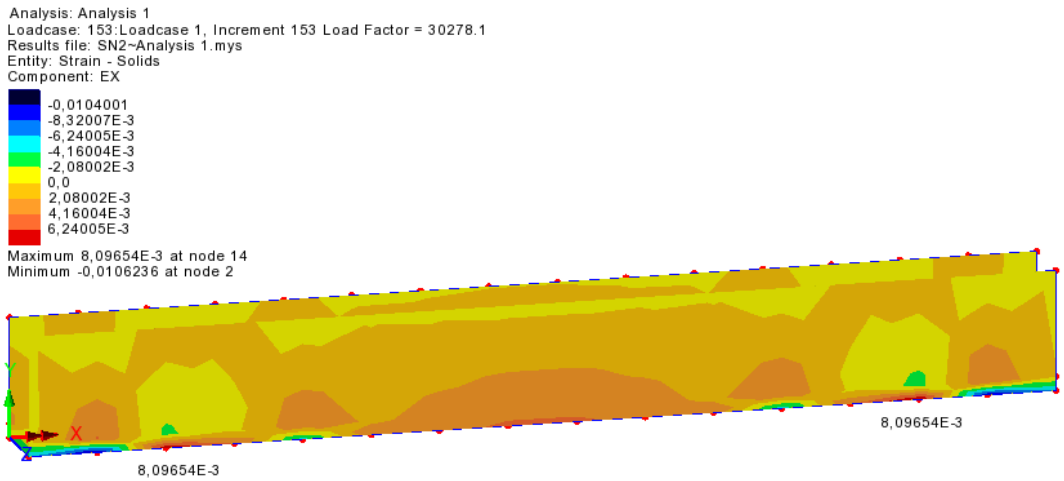
RR3 kirişindeki gibi yalnızca alt yüzeyi LP ile güçlendirilmiş olan SN1 kirişinde de Denklem 11 ve 12 yardımıyla betonarme kesit hesabı yapılmış ve moment taşıma gücü ile taşıma yükü hesaplanmıştır. Deformasyonların uygunluğu şartları kullanılarak çözüldüğünde M=35,3 kNm elde edilmiştir. Şekil 20'de görülen yükleme durumu göz önüne alınarak taşıma yükü 108,5 kN olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada ise bu değer 101 kN'dur. SN1 kirişi için teorik olarak hesaplanan yük değeri deneysel çalışmada elde edilen yük değerinden yaklaşık %7 daha fazladır. Bunun nedeni hazır beton kullanılmadan beton karışım hesabı yapılarak dökülen deneysel kiriş numunelerinde oluşan deney koşullarındaki olumsuzluklardır. Ancak elde edilen yük değerleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Modelleme sonucu elde edilen yük 92,7 kN'dur.



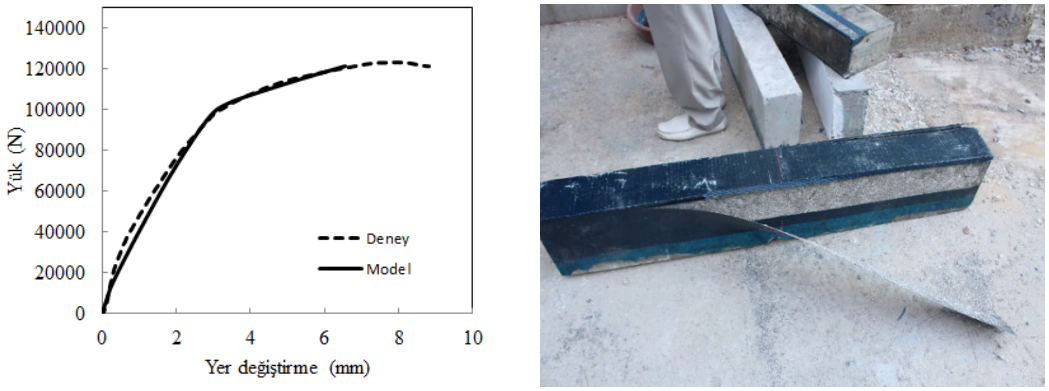
Şekil 20:
Moment taşıma gücünden yük tayini

M = P/2 x 0,65
P = 108,5 kN

SN2 kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı Şekil 21'de verilmiştir. SN2 kirişine ait deneysel ve modelleme çalışması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi ise Şekil 22a'da, deney sonrası kirişin görünüşü ise Şekil 22b'de verilmiştir. Şekil 21'de şekil değiştirme değerleri beklenildiği gibi uç noktalarda oluşmuştur ve deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları büyük bir uyum içerisindedir.



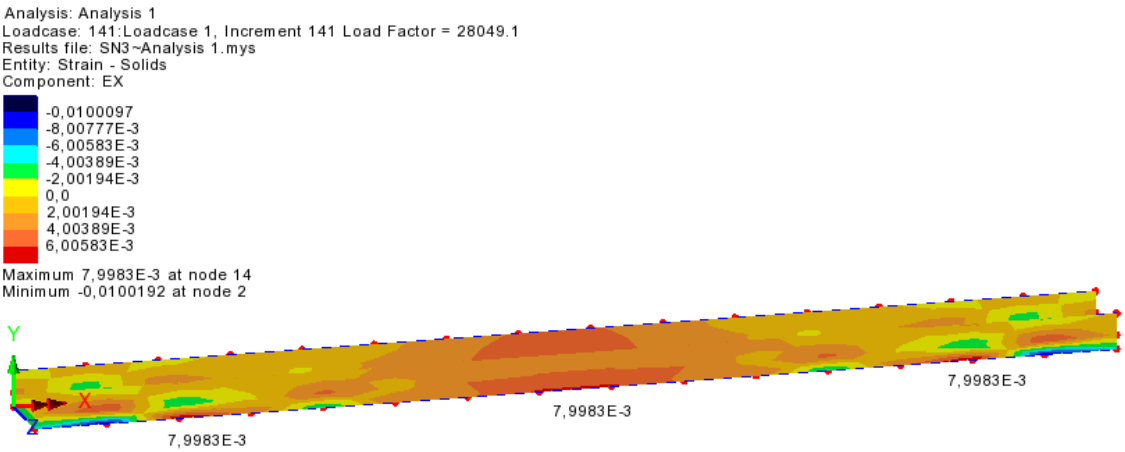
Şekil 21:
SN2 deney kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı



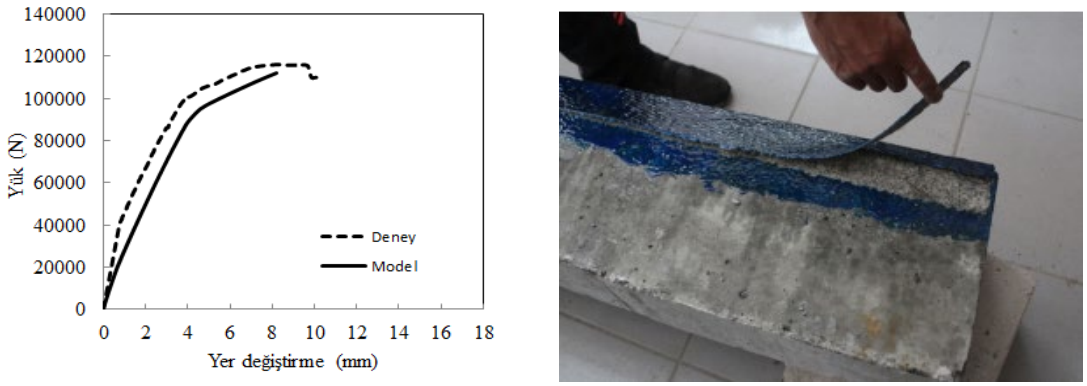
a. b.

Şekil 22:
a. *SN2 deney kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi* ***b.*** *Deney sonrası kirişin görünüşü*

SN3 deney kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı Şekil 23'te verilmiştir. Kirişin deneysel ve modelleme çalışması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ilişkisi ise Şekil 24a'da, deney sonrası kirişin görünüşü ise Şekil 24b'de verilmiştir. Şekil 23'te SN3 deney kirişine ait LP'nin şekil değiştirme dağılımı incelendiğinde hem orta bölgede hem de uç bölgelerde şekil değiştirme değerleri 0,008 değerine ulaşmıştır ve Şekil 24b'deki deneysel hasar ile benzer yaklaşım gösterdiği görülebilmektedir.



Şekil 23:
SN3 deney kirişine ait LP'nin analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı



a. b.

Şekil 24:
a. *SN3 deney kirişine ait yük-yer değiştirme ilişkisi* ***b.*** *Deney sonrası kirişin görünüşü*

4. SONUÇLAR

Betonarme kirişlerde gerçekleştirilen modelleme çalışmalarında Al-Amery ve Al-Mahaidi (2006) çalışmasına ait deneysel kirişler DP kriterini temel alan elasto-plastik analiz ile elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılarak ayrı ayrı modellenmiş ve her iki yaklaşımla birlikte deneysel yük-yer değiştirme ilişkilerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. DP kriteri kullanılarak yapılan modelleme çalışması parametrelerin elde edilmesi bakımından pratik bir modelleme yöntemidir. Ayrıca LP kısmının iki boyutlu eleman kullanılarak modellenmesi, sonlu eleman çözümünde eleman sayısını azaltarak daha hızlı bir çözüm sağlamaktadır. Ancak yapılan modelleme çalışmasında elasto-plastik hasar yaklaşımı ile yapılan model taşıma yükü değeri olarak daha yakın bir değer sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışmadaki kirişte betonarme kesit hesabı

yapılarak moment taşıma gücü ve yük taşıma kapasitesi bulunmuştur. Bu değerin hem deneyde hem modellemede elde edilen değerlerle yakın olduğu görülmüştür.

Köksal ve diğ. (2017) çalışmasına ait yalın ve üç farklı biçimde LP sargı ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin modelleme çalışması ise elasto-plastik hasar yaklaşımı kullanılarak, betonarme kirişlerde çekme donatısının altında kalan bölgedeki betonun yük etkisinde öncelikle kırılacağı için o bölgenin zayıf beton olarak tanımlanması ile yapılmıştır. Betonarme kirişin malzeme parametreleri ve zayıf beton için malzeme parametreleri Oliver hasar modeli kullanılarak hesaplanmış ve tanımlanmıştır. Kullanılan izotropik hasar modelinin ihtiyaç duyduğu en önemli parametre G_f kırılma enerjisi değeridir. Çekme altında bir çatlağın açılması için gerekli olan enerjinin betonun karakteristik bir özelliği olarak kabul edilmesinden yola çıkılarak bu değerin kullanılmasıyla analizlerde meydana gelen boyut bağımlı davranışın etkisinin ihmal edilebileceği ileri sürülmüştür. Ancak, yapılan analizlerde bu yaklaşımın tek başına yeterli olmadığı ve beton için seçilebilecek bir optimum boyutun kullanılmasının gerektiği sonucunu varılmıştır. Donatı altındaki zayıf betonun davranışını ise LP sargının stabil bir hale getirerek dayanım ve deformasyon özelliklerini büyük oranda iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu bölge için seçilecek malzeme parametre ya da modellerinin sonuçları önemli oranda etkilediği görülmüştür.

Modelleme çalışmasında analizin sonlandırılma şartı olarak daha önceki çalışmalarda eksenel yüklü elemanlar için kabul edilen lifli polimerin şekil değiştirme değerinin 0,008 olduğu değer seçilmiş ve bu değere ulaşıldığında analiz sonlandırılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBA-2016-1035 proje kodu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Aktan, S. (2016) Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

2. Al-Amery, R. and Al-Mahaidi, R. (2006) Coupled Flexural-Shear Retrofitting of RC Beams using CFRP Straps, *Composite Structures*, 75, 457-464. doi:10.1016/j.compstruct.2006.04.037

3. Barenblatt, G.I. (1962) The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture, *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55-129. doi:10.1016/S0065-2156(08)70121-2

4. Can, H. ve Ünay, A.İ. (2012) Tarihi Yapıların Deprem Davranışını Belirlemek için Sayısal Analiz Yöntemleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 211-217.

5. Ceylan, İ. (2008) Metallerin Plastik Şekillendirilmesinde Kullanılan Malzeme Modellerinin Sonlu Elemanlar ile Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

6. Chandrupatla,T.R, ve Belegundu, A.D. (2002) *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice Hall, Third Edition.

7. Chen, W.F. ve Han, D.J. (1988) *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag New York Inc.

8. Citto, C. (2008) Two-dimensional Interface Model Applied to Masonry Structures, M.S. Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Bologna, Italy.

9. Dong, J.F., Wang Q.Y. and Guan Z.W. (2012) Structural Behaviour of RC Beams Externally Strengthened with FRP Sheets under Fatigue and Monotonic Loading. *Engineering Structures,* 41, 24-33. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.03.024

10. Doran, B., Koksal, H.O, Polat, Z. and Karakoç, C. (1998) The Use of Drucker-Prager Criterion in the Analysis of Reinforced Concrete Elements by Finite Elements, *Teknik Dergi*, 9(2), 1617-1625. *Digest, 98*, 489-493.

11. Dugdale, D.S. (1960) Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2), 100-104. doi: 10.1016/0022-5096(60)90013-2

12. Godat, A., Qu, Z., Lu, X.Z., Labossière, P., Ye, L.P. and Neale, K.W. (2010) Size Effects for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with CFRP Strips. *Journal Of Composites for Construction,* 14(3), 260-271. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000072

13. Hui, C.Y., Jagota, A., Bennison, S.J. ve Londono, J.D. (2003) Crack Blunting and the Strength of Soft Elastic Solids, *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 459, 1489-1516. doi: 10.1098/rspa.2002.1057

14. Irwin, G.R., (1958) *Fracture*, in Hanbuch der Physik, edited by W.Flügge, 6, 551-590, Springer, New York.

15. Kachanov, L.M. (1958) On the Creep Fracture Time, *Izv. Akad. Nauk USSR Otd. Tech*., 8, 26-31.

16. Kachanov, L.M. (1986) *Introduction to Continuum Damage Mechanics*, Mechanics of Elastc Stability (Book 10), Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands.

17. Karakoç, C., Küyük, S., Köksal, H.O. ve Çağlar, N. (2005) Yüksek ve Normal Dayanımlı Kesme Donatısız Betonarme Kirişlerde Eğik Çatlama Dayanımlarının İncelenmesi, *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, 22-24 Eylül, Antalya, Türkiye.

18. Khalifa, A. and Nanni, A. (2000) Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams using CFRP Composites. *Cement and Concrete Composites*, 22, 165-174. doi: 10.1016/S0958-9465(99)00051-7

19. Köksal, H.O. (1992) Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structure, MsC Thesis, Boğaziçi University, Istanbul.

20. Köksal, H.O. and Karakoç, C. (1999) An Isotropic Damage Model for Concrete, *Materials and Structures*, 32(222), 611-617. doi: 10.1007/BF02480497

21. Köksal, H.O., Doran, B., Özsoy, A.E. ve Alacalı, S. (2004) Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(6), 1012-1023. doi:10.1139/l04-058

22. Köksal H.O., Altinsoy F., Aktan S., Karahan N.Ş., Çankaya R. (2017) Üç Noktalı Eğilme Altındaki Betonarme Kirişlerde Karbon Lifli Polimerin Etkin ve Ekonomik Kullanımı, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3, 1-16. doi: 10.28979/comufbed.325678

23. Liu, Y. (2003) Lecture Notes: *Introduction to the Finite Element Method*, CAE Research Laboratory Mechanical Engineering Department University of Cincinnati, USA.

24. Lubliner, J., Oliver, J., Ollers, S. and Onate, E. (1989) Plastic Damage Model for Concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), 299-326. doi:10.1016/0020-7683(89)90050-4

25. LUSAS Finite Element System. FEA Ltd, Surrey, UK.

26. Mitolidis, G.J., Salonikios, T.N. and Kappos, A.J. (2012) Test Results and Strength Estimation of R/C Beams Strengthened Against Flexural or Shear Failure by the Use of SRP and CFRP. *Composites:Part* B, 43, 1117-1129. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.11.034

27. Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. (1997) Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets. *Journal of Structural Engineering*, 123(7), 903-911.doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)

28. Oliver, J., Cervera, M., Oller, S. and Lubliner, J. (1990) Isotropic Damage Models and Smeared Crack Analysis of Concrete, *Proc. 2nd ICCAADCS,* 2, 945-958.

29. Parra, C., Martinez-Conesa, E., Valcuende, M. and Garrido, A. (2012) Analisis de Metodos para Evaluar el Refuerzo a Esfuerzo Cortante con CFRP en Vigas de Hormigon Armado. *Informes de la Construccion,* 64(526), 197-206. doi: 10.3989/ic.11.007

30. Sayın B., Manisalı E. (2010) An Investigation of Interfacial Stresses in Reinforced Concrete Beams using FRP Laminates, *The Journal of Adhesion*, 86(11), 1132-1157. doi:10.1080/00218464.2010.519260