



Araştırma Makalesi

**Journal of Innovative Engineering
and Natural Science**

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

İnceltilmiş uçlu prefabrik kirişlerin yönetmelikler ve yeni yaklaşımlara göre tasarımının karşılaştırılması

Hacer Tülen^{a,*}, Hilal Meydanlı Atalay^a

^aKocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41001, Türkiye.

MAKELE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 10 Temmuz 2024

Düzeltilme 7 Ekim 2024

Kabul 28 Kasım 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Prefabrik yapı

İnceltilmiş uçlu kiriş

Çubuk analojisi

Beton prefabrikasyon el kitabı

PCI tasarım el kitabı

ÖZET

Prefabrik yapılar fabrikada üretilen yapı elemanlarının şantiyede birleştirilmesi ile oluşmaktadır ve bağlantılar, yapısal sistemin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bağlantı bölgesi, sadece elemanların birleştiği alanla sınırlı değildir, kuvvet aktarımı ve gerilme dağılımlarının gerçekleştiği her iki elemana bitişik bölgelerin tasarımı ve detaylandırmasından etkilenmektedir. Prefabrik taşıyıcı sistemlerde kolon-kiriş bağlantı bölgesinde kolon yüzeylerinde mevcut kısa konsollar ile kiriş birleşimlerinin yapılabilmesi için eleman uç kesitleri küçültülmekte ve kiriş uçları inceltildikçe bu bölgede kesme kuvveti artmaktadır. Bu sebeple prefabrik bir çerçeve sistemde kolon-kiriş bağlantı bölgesinde oluşan kuvvetlerin ve gerilmelerin izlediği yola göre elemanların birleşime bitişik bölgeleri tasarlanmalıdır. Sunulan çalışmada yayılı yük etkisindeki inceltmiş uçlu prefabrik kirişin yürürlükteki yönetmelikler ve yeni yaklaşımlara göre tasarım adımları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda örnek olarak seçilen inceltmiş uçlu prefabrik kiriş bağlantı bölgesi Beton Prefabrikasyon El Kitabı, Amerikan Prefabrik Beton Enstitüsü'nün (PCI Tasarım El Kitabı) tasarım el kitabı ve çubuk analojisi yöntemi esas alınarak tasarlanmıştır. Analiz sonuçları karşılaştırıldığında, çubuk analojisi yöntemine göre belirlenen toplam donatı alanının diğer yaklaşımlara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte PCI Tasarım El Kitabı kriterlerine göre belirlenen toplam donatı alanının, Beton Prefabrikasyon El Kitabı'na göre belirlenen toplam donatı alanından daha fazla olduğu ve bu nedenle güvenli tarafta kaldığı tespit edilmiştir.

Comparison on the design of dapped-end precast beams according to design codes and new approaches

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 July 2024

Received in revised form 7 October 2024

Accepted 28 November 2024

Available online

Keywords:

Prefabricated structure

Dapped-end beam

Strut and tie method

Concrete prefabrication handbook

PCI design handbook

ABSTRACT

The prefabricated structures are constructed by assembling the factory manufactured structural members at the construction site and the connections in these structures constitute an important part of the structural system. In the beam-column connection zone in prefabricated structural systems, the beam end section is reduced in order to make the beam connection with the short cantilever on the column surface. The shear force increases in this region as the beam ends are thinned and this should be considered in the design. In the present study, the design steps of the dapped-end precast beam under distributed load are compared according to the current regulations and new approaches. In this context, the dapped-end precast beam connection area selected as an example was designed based on the Concrete Prefabrication Handbook, the design handbook of the American Precast Concrete Institute (PCI Design Handbook) and the strut-and-tie method. When the analysis results were compared, it was seen that the total reinforcement area determined according to the strut-and-tie method was greater than the other approaches. However, it was determined that the total reinforcement area determined according to the PCI Design Handbook criteria was greater than the total reinforcement area determined according to the Concrete Prefabrication Handbook and therefore remained on the safe side.

I. GİRİŞ

Prefabrikasyon önceden imal edilen elemanlarla yapım anlamına gelmekte olup genel olarak yapıyı oluşturan eleman ve bileşenlerin inşaat sahasında birleştirilmesi esasına dayanan bir yapım şekli olarak ifade edilebilir.

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-505-550-9529; e-mail:hacer.tulen@kocaeli.edu.tr

Prefabrike yapıların kullanım alanları sanayi yapıları, konutlar, alt yapı projeleri ve mimari uygulamalar olarak karşımıza çıkmaktadır ve 20. yüzyılın son dönemlerinde prefabrike yapı endüstrisi dünyada oldukça popüler hale gelmiştir [1]. Prefabrike yapılar, yerinde dökme yapılara göre çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar yapımda hız, genel olarak yapı maliyetinde azalmalar, mimari tasarımda esneklik, kaliteli eleman üretimi ve enerji verimliliği olarak ifade edilebilir. Prefabrike yapılarda taşıyıcı sistem elemanlarının bağlantı detayları yapısal davranış üzerinde etkili olduğundan prefabrike elemanların birleşim bölgesinde kalan kısımlarının tasarımı önemlidir. Birleşim bölgeleri yükleri diğer elemanlara en kısa yoldan ve en güvenli şekilde aktarmalıdır. Prefabrike döşeme ve kirişlerin birleşim bölgeleri oluşturulurken, kolonlarda yer alan kısa konsollarla birleşimde konsolun üst yüzeyine kiriş ya da döşemenin üst yüzeyinin yerleşebilmesi için kesitler küçültülmektedir. Prefabrike yapıların birleşim bölgelerinde tek parça davranışı oluşturmak için önemli olan bu kesitlere sahip elemanlar inceltilmiş uçlu kirişler olarak adlandırılmaktadır [2]. Sunulan bu çalışmada inceltilmiş uçlu kirişlerde meydana gelen hasarlar ve hasar durumlarını etkileyen parametreleri içeren mevcut çalışmalar özetlenmiştir. Bununla birlikte inceltilmiş uçlu bir kirişte yayılı yük etkisinde oluşan gerilme dağılımı çubuk analogisi yöntemi (strut-and-tie model (STM)) kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın devamında, Beton Prefabrikasyon El Kitabı [3] ve PCI Tasarım El Kitabı'nda [4] yer alan tasarım kriterleri dikkate alınarak inceltilmiş uçlu kirişin bağlantı bölgesi tasarımı yapılmış ve üç tasarım yaklaşımının sonuçları karşılaştırılmıştır.

II. İNCELTİLMİŞ UÇLU KİRİŞLER

İnceltilmiş uçlu kirişler köprü kirişlerinde ve prefabrik yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Kiriş-kolon birleşimleri inşa edilirken kısa konsolları gizlemek için kiriş kesitleri inceltilmektedir. Uygulama sonucunda kirişin üst yüzeyi belirli bir seviyede tutulur ve deprem etkisi altında kat seviyelerinde diyaframlar oluşturmak için kolaylık sağlanır. İnceltilmiş uç bölgesinde kesme kuvveti kritiktir ve boyutlandırmada bu durum göz önüne alınmaktadır [5].

2.1 İnceltilmiş uçlu kirişlerin davranışı

Literatürde inceltilmiş uçlu kirişlerde oluşması beklenen hasar durumlarını ve hasarları minimum seviyede tutmak için yapılması gerekenleri ele alan birçok analitik ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Analitik çalışmalar incelendiğinde, inceltilmiş uçlu kirişler için kafes-kiriş analogisini içeren çalışmaların daha yaygın olduğu görülmektedir.

Mata-Falcón ve ark. [6] inceltilmiş uçlu kirişlerde oluşan hasar tiplerini incelemişler ve hesabı için STM modelini önermişlerdir. Önerilen modelin kontrolü için 15 farklı donatı konfigürasyonu ile 28 adet kiriş testi yapmışlardır. Testler sonucunda donatı miktarı değişiminin, yatay ve düşey donatı dağılımının davranış üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Tek bir bölgede yüksek miktarda donatıya sahip kirişlerde betonun ezilmesi ile hasar oluşmaktadır. STM geometrisi belirlenirken üst bölgede yer alan askı donatısının düğüm bölgesinin davranışını etkin bir biçimde yönettiği belirlenmiştir.

Aswin ve ark. [7] tarafından yapılan çalışmada inceltilmiş uçlu kirişlerde süreksizlikten dolayı oluşan gerilmeler ve bu gerilmelere bağlı hasarlar incelenmiştir. Dört farklı kiriş modeliyle üç parametrenin davranış üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu parametreler; inceltilmiş uçta bulunan donatı miktarı, eğilme donatısı miktarı ve uç kısımdaki beton tipinin etkisidir. Kirişlerin yük kapasiteleri belirlenirken deneysel sonuçlar, Amerikan tasarım

yönetmeliği kriterleri, STM ve Vector-2 programından alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda gerilmelerin ve hasarın yoğunlaştığı bölgelerin uç bölgeler olduğu raporlanmıştır. Eğilme donatısının artışı yük kapasitesini %46,7, uç bölgedeki donatı artışı %62,2 ve uç bölgedeki betonun kompozit bileşimlere sahip çimento karışımı kullanıldığında yük kapasitesinde %51,9 oranında artış olduğu sonucuna ulaşımlardır. Aswin ve ark. [8] tarafından yapılan diğer bir çalışmada deneysel olarak test edilmiş 24 adet inceltilmiş uçlu kirişin göçme yükünün farklı yönetmeliklere göre belirlenmesi amaçlanmıştır. ACI-318-08, Eurocode-2, BS-8110 ve bunların yanında PCI Tasarım El Kitabı dikkate alınarak nihai yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında kirişlerin yük taşıma kapasitesine beton basınç dayanımı, inceltilmiş ucun boyutları, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı (a/d), etriye tipi, boyuna donatının formu, inceltilmiş uçtaki donatı ve askı donatısının miktarının etkisi incelenmiştir. Beton basınç dayanımı ve askı donatısı miktarı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı belirtilmiş, deneysel ve analitik sonuçlar kıyaslandığında PCI ve ACI-318-08'e göre belirlenen yüklerin daha yakın değerler olduğu belirlenmiştir.

Wang ve Guo [9] inceltilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımlarını incelemek amacıyla 22 adet kirişi test etmişlerdir. Çalışmada incelenen parametreler, inceltilmiş uç bölgesinin yüksekliği, etriye ve eğilme donatısının konfigürasyonudur. Testler sonucunda eğik etriye veya ana donatının pilye şeklinde düzenlenmesinin kesme kapasitesinde düşey etriyeye kıyasla daha etkin olduğu belirlenmiştir. İlk kesme çatlağının göçme yükünün %13-45 seviye aralığında oluştuğu raporlanmıştır. İnceltilmiş ucun yüksekliğinin kesme kapasitesini önemli ölçüde etkilediği ve kesit yüksekliğinin $0,45h$ değerinden büyük olması gerektiği belirtilmiştir.

Mohammed ve ark. [10] 27 adet inceltilmiş uçlu kiriş statik yük etkisinde test edilmiştir. Çalışmada askı donatısının ve diyagonal donatının davranışa etkisi bununla birlikte uç kısımda çimento esaslı kompozitlerin (ECC) kullanılmasının etkileri incelenmiştir. İlk çatlağın her zaman inceltilmiş ucun köşesinden oluşmaya başladığı gözlenmiş, oluşan çapraz çatlaklar için diyagonal donatının kullanımının askı donatısı kullanımından daha etkin olduğu, nihai yükün diyagonal donatı kullanımında %40,79 oranında artış gösterdiği raporlanmıştır. Askı donatısı olmadan diyagonal donatıyla düzenlenen konfigürasyonda inceltilmemiş bölgenin alt kısmında ciddi hasar oluşmuştur. Kiriş uçlarında çimento esaslı kompozitlerin kullanılmasının yapı performansını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir.

Abdal-Moniem ve ark. [11] tarafından yapılan çalışmada 29 adet inceltilmiş uçlu kiriş için ABAQUS programı kullanarak iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak analizler yapılmış ve analiz sonuçlarını literatürde yer alan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen parametreler; kesme açıklığı/derinlik oranı (a/d), uzunluk oranı ve derinlik oranıdır. Kirişler, beton basınç dayanımına göre iki ana gruba ayrılarak incelendiğinde a/d oranı azaldıkça hem nihai dayanımın hem de başlangıç rijitliğinin arttığı gözlenmiştir. İnceltilmiş ucun derinliğinin kiriş derinliğine oranı arttıkça kesme çatlağına karşı direnç artmakta ve bu oran $0,45$ 'ten küçük olduğunda kesme çatlakları uç kısımda sonlanmaktadır. Uç kısmın uzunluğunun kirişin inceltilmemiş kısmının uzunluğuna oranının a/d oranıyla benzer bir davranış gösterdiği raporlanmıştır.

Abdul-Jawad [12] inceltilmiş uçlu kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir. Kirişlerin doğrusal olmayan analizi ABAQUS programıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikli olarak üç adet kiriş için analizler yapılmış ve analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışmada kesme açıklığının/derinliğe oranı (a/d), beton basınç dayanımı ve uç bölgedeki ana donatının miktarının davranışa etkisi incelenmiştir. a/d oranı azaldıkça

yük taşıma kapasitesinin arttığı, beton basınç dayanımı arttıkça taşınan yükün arttığı, uç bölgedeki ana donatı miktarı artıkça kirişin eğilme dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Ahmad ve ark. [13] varsayılan dış yükler için dört adet kirişi, derinliğine göre iki ayrı grup olarak düzenlenmişlerdir. Çalışmada kirişler monotonik yükleme etkisinde test edilmiş ve göçme yükleri belirlenmiştir. Deneysel sonucunda belirlenen göçme yükleri çubuk analogisiyle belirlenen analitik yükler ile karşılaştırılmıştır. Kiriş derinliği daha yüksek olan grupta test sonucunda elde edilen yükler analitik olarak belirlenen yüklere göre daha fazladır. Fakat derinliği daha az olan kirişlerde bu durumun tam tersi ortaya çıkmıştır. İncelenmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını etkileyen tek faktörün kiriş derinliği olmadığı ancak kesme açıklığının derinliğe oranının davranış üzerinde çok etkili olduğu ifade edilmiştir.

Özkılıç ve ark. [5] incelenmiş uçlu aşıkların kesme kapasitesindeki değişimini deneysel olarak incelemiş ve sonuçları sonlu eleman modeliyle karşılaştırmışlardır. Kirişlerden biri TS 9967'ye uygun olarak tasarlanmıştır. İncelenen diğer kirişin ise askı donatısı miktarı TS 9967'de önerilen donatı miktarından daha az olacak şekilde düzenlenmiştir. Yönetmeliğe uygun olarak üretilen kirişin kesme kapasitesinin diğer kirişe göre %9 fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar kıyaslandığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu raporlanmıştır.

Taher [14] çalışmasında incelenmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için kullanılan farklı güçlendirme tekniklerini deneysel olarak incelemiştir. Çelik köşebentler, eğik çelik cıvatalar, çelik levhalar ve karbon fiber kaplamalar güçlendirme için kullanılan elemanlardır. 52 adet kiriş 4 farklı grup şeklinde test edilmiştir. Gruplar farklı donatı detayları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çatlağın genellikle incelenmiş uç bölgesinin kirişle birleştiği bölgede oluştuğu ifade edilmiştir. Tüm güçlendirme yöntemlerinin kesme kapasitesini arttırdığı fakat güçlendirme yöntemleri içinde çelik bulonların en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir.

Nagy-György ve ark. [15] incelenmiş uçlu kirişlerin karbon elyaf takviyeli polimerler (CFRP) aracılığıyla güçlendirilmesi üzerine deneysel ve nümerik çalışmalar yapmışlardır. Çalışma incelenmiş uçlu prekast bir beton kirişte montaj sırasındaki hatalardan kaynaklı diyagonal çatlaklar oluşması ile başlatılmıştır. Çalışmanın deneysel aşamasında bir referans numune, iki adet yüksek dayanımlı CFRP plakalarıyla güçlendirilmiş kiriş ve bir adet yüksek elastisite modülüne sahip CFRP levhalarla güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Testler sonucunda CFRP plakalarıyla güçlendirilmiş kirişlerin referans numuneye göre yük taşıma kapasitesinde artış görüldüğü ifade edilmiştir. Bununla birlikte levhalarla güçlendirilen numunede kapasite artışı gözlenmemiştir. Kirişlerin sonlu eleman modelleri ATENA yazılımında oluşturulmuştur. Analizler sonucunda CFRP plakalarıyla kiriş arasındaki bağlantının incelenmiş uç bölgesinde kopma ihtimalinin yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Jirawattanasomkul ve ark. [16] incelenmiş uçlu ve öngerilmeli köprü kirişlerini incelemiştir. Kirişlerde mevcut hasarların ve muhtemel kırılma durumlarının belirlenmesi için 13 farklı kiriş için sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Etkisi incelenen parametreleri incelenmiş bölgede yer alan donatı miktarı ve öngerilme kuvvetlerinin kaybı olarak belirlemişlerdir. Analizler sonucunda kirişin incelenmiş uç bölgesinde meydana gelen diyagonal çatlağın yetersiz askı donatısı ve öngerilme kuvvetinin kaybı sonucu oluştuğu belirtilmiştir. PCI (2010) tarafından önerilen donatı düzeninin önemini vurgulamışlardır.

Moreno-Martínez ve Meli [17] mevcut incelenmiş uçlu kirişlerin servis yükleri ve nihai dayanım açısından performansını değerlendirmek ve incelenmiş uçta oluşan çatlak performansını arttıracak çözümlerin belirlenmesi

için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Dört adet numuneyi düşey yükler altında test etmişlerdir. İlk numune PCI Tasarım El Kitabı kriterlerine göre tasarlanmıştır. İkinci numuneye ardgerilme uygulanmıştır. Üçüncü numunede askı donatılarının yerine çapraz çubuklar kullanılmış ve son numunede hem çapraz çubuklar hem de ardgerme kullanılmıştır. Deneysel sonuçta ardgerme kuvveti uygulanan numunenin çatlak kontrolü açısından en iyi davranışı gösterdiği raporlanmıştır.

Desnerck ve arkadaşları [18] inceltirilmiş uçlu kirişlerin tasarımında yer alan takviye donatılarının katkısını belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada referans numunesi, diyagonal donatı içermeyen kiriş numunesi, U şekilli donatının kullanılmadığı numune ve kesme donatılarının azaltıldığı kiriş numunesi olarak 4 farklı durum göz önüne alınmıştır. Kesme donatılarının azaltıldığı kiriş dışında diğer kirişlerde kiriş ucunda kırılmalar gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçta takviye donatılarının kullanılmaması durumunda referans numunesine göre taşıma kapasitesinin yaklaşık %40 daha az olduğu belirtilmiştir.

Özkılıç ve ark. [19] inceltirilmiş uçlu aşıkların çelik lifler kullanarak kesme kapasitesini arttırmayı hedeflemişlerdir. Ana değişkenler kullanılan çelik lifler ve liflerin en-boy oranlarıdır. İnceltirilmiş uçlu aşıkların kirişlerini hem deneysel hem de analitik olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar referans numune ve 2 farklı çelik lif içeren 3 gruptan oluşmaktadır. Çalışmanın analitik kısmı Abaqus programıyla gerçekleştirilmiştir. Analizlerde çelik lif içeren betonun sadece kirişin inceltirilmiş bölgesinde ve hem inceltirilmiş bölgede hem de inceltirilmiş bölge ile kirişin birleştiği kısımda kullanılması durumu incelenmiştir ve optimum çelik içeriğini belirlemek amaçlanmıştır. Çelik lif kullanımının kesme kapasitesini 1.53 kat arttırdığı ve enerji tüketimine olumlu katkı sağladığı raporlanmıştır.

Aswin ve ark. [20] inceltirilmiş uçlu kirişlerde kullanılan ana donatılarının her birinin yapısal performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Farklı konfigürasyona sahip 8 adet kiriş test edilmiştir. Referans numunesi PCI kriterlerine uygun olarak tasarlanmıştır. Analizler sonucunda performansı etkileyen en önemli donatının inceltirilmiş kısımda yer alan eğilme donatısı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte diyagonal donatıların düşey askı donatılarından çok daha efektif olduğu ifade edilmiştir.

Lu ve ark. [21] çalışmalarında inceltirilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımını belirleyebilmek için 24 adet kiriş testi yapmışlardır. İncelenen ana parametreler beton basınç dayanımı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d), ana donatı ve kirişlerdeki düşey etriyelerdir. Test edilen kirişlerin tamamı eğilmeden göçmüştür. Beton dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı, a/d oranı küçüldükçe nihai dayanımın arttığı ifade edilmiştir. Kesme dayanımını belirlemek için önerilen STM modelinin farklı parametreler için doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Hussain ve Shakir [22] çalışmalarında kompozit kesitli inceltirilmiş uçlu kirişlerin statik ve tekrarlı yükler etkisi altında performansını incelemişlerdir. Yükleme şeklinin etkisi, farklı çelik kesitlerin kullanılması, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) incelenen parametrelerdir. Yapılan deneylerde ilk çatlak meydana geldiği yük, nihai dayanım, göçme modu, yük-deplasman ilişkisi ve süneklik oranının belirlenmesine odaklanılmıştır. Deneysel sonuçta inceltirilmiş uç bölgesinde I kesit kullanıldığında kesme kapasitesinin a/d oranı 1,0 olduğunda %33,33 ve a/d oranı 1,5 olduğunda %39,42 arttığı raporlanmıştır.

Rentería-Soto ve ark. [23] çalışmalarında inceltirilmiş uçlu kirişler için önerilen STM modellerinden ikisinin kıyaslamasını yapmışlardır. Biri ortogonal diğeri diyagonal bağlantılı olmak üzere iki STM modeli kullanılmıştır. Donatı detayları belirlenen kirişler test edilmiştir. Testler sonucunda diyagonal olarak düzenlenen donatının

ortogonal olandan daha iyi sonuç verdiğini belirlenmiş, buna karşın donatı diyagonal olarak düzenlendiğinde kirişin yer değiştirme kapasitesinin azaldığı ifade edilmiştir.

Aksoylu ve ark. [24] inceltirilmiş uçlu aşıklarında meydana gelen hasarlar ve bu hasarların nedenlerini incelemişlerdir. 5 farklı konfigürasyona sahip 10 adet numune için deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. TS-9967 kriterlerine uygun olarak tasarlanan ve tasarlanmayan kirişlerle birlikte mesnet bölgesinde çelik kesitlerin kullanıldığı kirişler ve Z tipinde donatıya sahip kirişler test edilmiştir. Çalışmanın sonunda Z tipinde donatıya sahip kirişlerin diğer numunelere göre yaklaşık %30 daha yüksek yük kapasitesi sergilediğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte optimum Z tipi donatıyı belirlemek için sonlu eleman analizleri yapmışlardır.

Syed ve ark. [25] inceltirilmiş uçlu kirişlerin dinamik yükler altındaki davranışını incelemişlerdir. Bu kapsamda 31 farklı kiriş analitik olarak test edilmiştir. Analizler LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada seçilen ana parametreler ana donatı, askı donatıları ve farklı beton sınıflarıdır. Analizler sonucunda beton dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı, farklı donatı konfigürasyonlarının inceltirilmiş uçlu kirişlerin göçme modunu değiştirmediğini ve hepsinin kesme kuvvetinden kaynaklı göçtüğü raporlanmıştır. Bununla birlikte askı donatılarının ve ana donatıların çatlak oluşumunda etkin rol oynadığı belirtilmiştir.

Rajapakse ve ark. [26] inceltirilmiş uçlu kirişlerin göçme modlarını belirlemek için 8 adet kiriş deneyi tabii tutmuşlardır. Çalışma kapsamında incelenen parametreler donatı miktarı ve yatay donatının düşey donatıya oranı olup bu parametrelerin çatlak kontrolü, dönme kapasitesi ve birleşimin dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda toplamda aynı yatay ve düşey donatı alanına sahip kiriş birleşimleri için daha fazla yatay donatı içeren birleşimin daha güçlü olduğu ifade edilmiştir. İnceltirilmiş uç bölgesine düşey olarak yerleştirilen donatıların çatlak kontrolünde etkin olmadığı buna karşın dönme kapasitesine önemli katkı sağladığı belirlenmiştir.

Mohamed ve Elliott [27] inceltirilmiş uçlu kirişlerin kayma mukavemetini artırmak için kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton kullanmışlardır. Donatı konfigürasyonu, beton basınç dayanımı ve uç bölgesinin yüksekliği dikkate alınarak 10 adet kiriş deneyi tabii tutulmuştur. Deneyler sonucunda tüm kiriş numunelerinde benzer çatlak gelişimi olduğunu gözlenmiş, çoğunlukla kiriş çatlaklarının inceltirilmiş bölgenin kirişle birleştiği bölgede başlayıp ardından uç bölgesinde eğimli çatlaklar oluştuğu ifade edilmiştir. Tüm numunelerin kesme etkisi nedeniyle göçtüğü raporlanmıştır. Çelik lifler kesme kapasitesinin artmasına katkı sağlamış inceltirilmiş bölgede çelik lifli beton kullanılması durumunda donatı miktarının azaltılabileceği belirtilmiştir.

Desnerck ve ark. [28] inceltirilmiş uçlu kirişlerin yük taşıma kapasitesine korozyon, ankraj çatlakları, kesme donatısı miktarı ve donatı düzeninin etkisini belirlemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada 9 adet farklı özelliğe sahip kiriş test edilmiştir. Referans numunenin donatıları STM yaklaşımıyla belirlenmiştir. Parametrelerin etkileri hem ayrı ayrı incelenmiş hem de birlikte değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda farklı donatı düzenlerinin yük taşıma kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi olduğu belirtilmiştir. İnceltirilmiş bölgede kullanılan köşegen, U ve düşey donatıların kesitlerinde ki %50' lik azalma kırılma yükünde %35' lik bir fark oluşmasına neden olmuştur. Birden fazla parametrenin etkisi aynı anda incelendiğinde yük taşıma kapasitesi üzerinde bu parametrelerin doğrusal kombinasyonlarından daha büyük bir etkiye neden olabileceği raporlanmıştır.

Oviedo ve ark. [29] STM yaklaşımının statik süreksizliğe sahip betonarme elemanlar için güçlü bir araç olduğu, bununla birlikte tasarıma yapısal optimizasyon yöntemlerinin dahil edilmesinin numerik olarak daha etkili

olduğunun kanıtlandığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında numerik olarak ispatlanan bu durumu deneysel olarak incelemişlerdir. İncelenen dokuz kirişten beşi homojenleştirme yapısal optimizasyon algoritmasından türetilen optimal modeller kullanılarak, dört tanesi de geleneksel STM modellerine göre tasarlanmıştır. Tüm homojenizasyon numuneleri geleneksel yöntemlerle tasarlanan numunelere göre çatlak kontrolünde daha iyi performans göstermiştir. Homojenizasyonun yük taşıma kapasitesinde artışa neden olduğunu raporlamışlardır.

Atta ve Taman [30] incelenmiş uçlu kirişlerin kırılma mekanizmalarını daha iyi anlamak ve kirişlerin dıştan öngerilmeye sahip elemanlarla güçlendirilmesi durumunda performansını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. 8 adet kiriş örneği deneye tabi tutulmuştur. Kirişler öngerilmeye sahip elemanların yanal, düşey ve eğimli olarak kirişe dıştan bağlanmasıyla ve bu elemanların farklı bölgelere yerleşimleriyle güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda düşey olarak uygulanan güçlendirmenin diğer yönlere göre daha etkili olduğu ve referans numunesine göre düşey olarak güçlendirilmiş kirişin kapasitesinin %82 arttığı ifade edilmiştir. Kirişlerin öngerilmeli elemanlarla yanal olarak güçlendirilmesi durumunda basınç kırılması olduğu raporlanmıştır.

Shakir ve Alliwe [31] incelenmiş uçlu kirişlerin davranışlarını incelemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Davranışa etkisi incelenen parametreler kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı (a/d), askı donatısı ve incelenmiş bölgede yer alan eğilme donatısının alanının azaltılması olarak ifade edilmiştir. Deneyler sonucunda a/d oranının davranış üzerinde etkili olduğu, a/d oranının 1,5' tan 1,0' e düşürülmesi durumunda kapasitede yaklaşık %48 artış meydana geldiği ifade edilmiştir. a/d oranı 1,0 olan kirişte askı donatısı alanının %40 azaltılması yük taşıma kapasitesini %6 oranında azaltmıştır. İncelenmiş bölgede yer alan eğilme donatısı alanının %50 azalması durumunda a/d oranı 1,0 olan kirişin kapasitesinin %12,4 ve 1,5 olan kirişin kapasitesinin %12 azaldığı raporlanmıştır.

Fayed ve ark. [32] farklı derinliklere sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada incelenen parametreler kiriş derinliği, etriye oranı, derinliğin değiştiği bölgelerde üst ve alt kısımda bulunan boyuna donatıların özellikleridir. 2 adet sabit derinlikli ve 10 adet incelenmiş uçlu kiriş test edilmiştir. Alt ve üst düzeyde ayrı ayrı derinliğin azaltılması sonucunda yük taşıma kapasitesinde referans numuneye göre sırasıyla %23,56 ve %27,35 azalma olduğu belirtilmiştir. İncelenmiş bölgelerde etriye kullanımı kirişlerin taşıma kapasitesini arttırmış ve sünekliği önemli ölçüde etkilemiştir. STM yöntemi kullanılarak belirlenen değerler ile testlerden elde edilen değerlerin yakın olduğu raporlanmıştır.

Syed ve ark. [33] daha önce statik olarak test edilmiş incelenmiş uçlu kirişlerin sonlu eleman modellerini oluşturarak dinamik yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Davranışa etkisi incelenen parametreler donatı çapları, eğilme ve askı donatısı miktarı, beton basınç dayanımı ve uygulanan yükün değeri olarak açıklanmıştır. Çalışmada LS-DYNA yazılımı kullanılmıştır. İncelenmiş uçlu kiriş modelleri oluşturulurken beton için farklı yapısal malzeme modelleri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına ağ boyutlarının etki ettiği belirtilmiştir. Kullanılan malzeme modellerinin üstünlükleri raporlanmış, modeller sayesinde betonda oluşan çatlaklarının yayılma durumunun izlenebileceği belirtilmiştir.

Shakir ve ark. [34] geometrik ve statik olarak süreksizlik içeren kirişlerin davranışını incelemek amacıyla analitik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kirişler 3 grup halinde incelenmiştir. İlk grup incelenmiş uçlu kirişlerden, ikinci grup T kesitli derin kirişlerden ve üçüncü grup dikdörtgen boşluklar içeren kirişlerden oluşmaktadır. Analizler ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. İncelenmiş uçlu kirişlerin uç bölgelerinde ve askı donatılarında %25

oranında azalma yük taşıma kapasitesinde sırasıyla %15 ve %32 oranında azalmaya yol açmıştır. İnceltilmiş uçlu kirişlerde kesme açıklığının faydalı derinliğe oranı azaldıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı ifade edilmiştir. T kesitli derin kirişlerde aynı donatı oranı boşluğun yerine bağlı olarak yük taşıma kapasitesinde %41-%49 oranında azalmaya yol açmıştır.

Aksoylu ve ark. [35] incelttilmiş uçlu aşık kirişlerinin davranışını belirlemek için hem deneysel hem analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında yönetmelikte belirtilen tasarım kriterlerini sağlayan ve sağlamayan kirişlerle CFRP yöntemiyle güçlendirilmiş kirişler test edilmiştir. Analizler ABAQUS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen sonuçların yakın olduğu belirlenmiştir. Analitik çalışmada etkisi incelenen parametreler beton basınç dayanımı, donatının çekme dayanımı ve öngerme seviyesidir. Beton basınç dayanımı ve donatı çekme dayanımı arttıkça kirişlerin kesme kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. CFRP güçlendirme tekniği kullanılan kirişlerin kapasitesinde artış olduğu ve hasar bölgesinin değiştiği raporlanmıştır.

Zamri ve ark. [36] incelttilmiş uçlu kirişlerde diyagonal çatlağı ve ani kırılmayı önlemek için yoğun olarak donatı kullanılan bölgelerde donatı miktarını azaltmak için çelik liflerin uygulanma olasılığını araştırmışlardır. Çalışmada 2 gruptan oluşan 10 adet kiriş test edilmiştir. Gruplar incelttilmiş bölgenin yüksekliğine göre belirlenmiştir. İncelenen bir diğer parametre ise kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır. Çelik lif kullanımının kesme kapasitesi ve sünekliği artırdığı belirtilmiştir. Bununla birlikte kesme kuvvetlerinin sadece diyagonal donatılara aktarıldığı ve bu donatıların kirişler için önemli olduğu ifade edilmiştir. Deneysel sonuçta incelttilmiş uçlu kirişlerin kesme dayanımlarını tahmin etmek için yarı ampirik iki denklem geliştirilmiştir.

Don ve ark. [37] literatürde test edilen incelttilmiş uçlu kirişler için doğrusal olmayan analizler yapmışlardır. Analizler için ATENA Science yazılımı kullanılmıştır. Referans numunesi, diyagonal donatının kullanılmadığı kiriş numunesi, incelttilmiş bölgede U şekilli donatının kullanılmadığı kiriş numunesi ve kesme donatısı azaltılan kiriş numunesi olmak üzere 4 adet kiriş incelenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar kıyaslandığında çatlak şekillerinin ve göçme durumlarının birbiriyle uyumlu olduğu belirtilmiştir. Yük taşıma kapasitesi ve deformasyon kapasitesi en çok azalan numune diyagonal donatının kullanılmadığı kiriş numunesi olup yaklaşık %50'lik bir azalma gözlenmiştir. Tüm kiriş numunelerinde ilk diyagonal çatlama incelttilmiş ucun kirişin inceltilmemiş bölgesiyle birleştiği köşede oluşmuştur. Oluşan çatlağın açısının ve boyutunun donatı düzenine göre değiştiği belirtilmiştir.

Shakir ve Hamad [38] 10 adet boşluklu kirişi test etmişlerdir. İncelenen numuneler incelttilmiş uçlu boşluklu kirişler ve boşluklu kirişler olarak 2 gruba ayrılmıştır. Her bir grupta boşluğun her iki yanında düşey donatı içeren bir adet referans numunesi bulunmaktadır. Bununla birlikte boşluklu kirişler farklı güçlendirme yöntemleri ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme için çelik lif katkılı beton, diyagonal donatılar, çelik plakalar kullanılmıştır. Kiriş davranışı, çatlak dağılımı, yükleme geçmişi, süneklik ve tokluk açısından değerlendirilmiştir. Kirişlere incelttilmiş uçların ilavesi ile yük taşıma kapasitesinin %9-12 oranında azaldığı belirtilmiştir. Her bir grupta kompozit kesitle güçlendirilmiş kirişlerde %21-23 ile en yüksek iyileştirmelerin sağlandığı raporlanmıştır.

Al-Maliki ve ark. [39] incelttilmiş uçlu kirişlerin ardgerme olarak çalışan bulonlarla güçlendirilmesini araştırmışlardır. Etkisi incelenen değişkenler civataların sayısı, boşluklu ve boşluksuz kesit durumudur. İncelttilmiş uçlu kiriş kesitlerinin boşluk içermesi durumunda kesme kapasitesinin %8-%16 azaldığı, sehimde ise %15-%20 arasında bir artış olduğunu gözlenmiştir. Bulonlarla güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %8-%20

aralığında artış gözlemlenmiş ve yer değiştirmenin %20-%30 aralığında azaldığı ifade edilmiştir. Kirişlerde güçlendirme ile ani hasarların azaldığı raporlanmıştır.

Santarsiero ve Picciano [40] inceltilmiş uçlu kirişlerin ard-germe tendonları kullanılarak güçlendirilmesinin davranış üzerindeki etkilerini incelemiştir. İki farklı donatı düzenine ve yük taşıma kapasitesine sahip inceltilmiş uçlu kiriş için sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve ATENA programı ile analizler yapılmıştır. Çalışmada ana parametre olarak tendonlara uygulanan gerilme miktarı incelenmiştir. Analizler sonucunda, ard-germe tendonlarının kırılma modlarını değiştirdiği ve yük taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir.

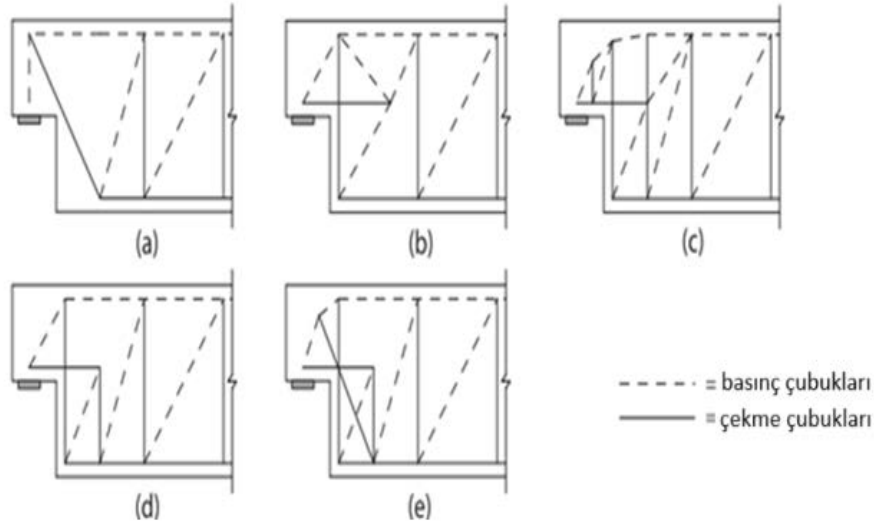
Mihaylov [41], inceltilmiş uçlu kirişlerin uç bölgelerinin kirişle birleştiği kısımlarda meydana gelen çatlak dağılımlarını incelemiş ve çatlak genişliğinin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için bir model önermiştir. Bu model, akma anındaki çatlak genişliğini tahmin etmek ve yüksüz halden akma anına kadar çatlakların gelişimini takip etmek amacıyla geliştirilmiştir. Modelin doğrulanması için 42 testlik bir veri tabanı kullanılmıştır. Çatlak genişliğini etkileyen ana faktörler, inceltilmiş uçlu kirişlerdeki donatı miktarı ve detayları olarak belirlenmiştir. Önerilen modelin, değişkenlerin etkisini iyi bir şekilde yakaladığı ve bu nedenle servis koşullarında çatlak kontrolü için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Literatürde inceltilmiş uçlu kirişlerle ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çatlakların genellikle inceltilmiş bölgenin kirişle birleştiği bağlantı bölgesinde başladığı ve hasarın yoğun olarak bu bölgede oluştuğu ifade edilmektedir. İnceltilmiş uçlu kirişlerin davranışları, deneyler, sonlu elemanlar analizi ve STM yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Donatının etkisi incelenirken, özellikle inceltilmiş bölgede yer alan donatı, eğilme donatısı ve askı donatıları dikkate alınmıştır. İnceltilmiş bölgede yer alan donatıların yük taşıma kapasitesini daha fazla etkilediği belirtilmiştir. Eğilme ve askı donatıları ise yük kapasitesini artırmaktadır. Beton basınç dayanımı da incelenen bir parametredir ve basınç dayanımı arttıkça yük kapasitesi ve kesme dayanımının arttığı ifade edilmiştir. Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve oran azaldıkça nihai dayanımın arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, inceltilmiş uç bölgesinin yüksekliği de önemli bir parametre olarak incelenmiş ve çalışmalarda bu değer 0.45h'dan daha büyük olması önerilmektedir.

2.2 Çubuk Analogisi Yöntemi (*Strut-and-tie method (STM)*)

Çubuk analogisi yöntemi, betonarme ve öngerilmeli yapılardaki süreksiz bölgelerinin (D-bölgesi) analizi için kullanılabilen basit ve etkili bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntem, mühendislerin yapı elemanlarında yük aktarım mekanizmasını kavrayarak donatı detaylarını iyi bir şekilde elde etmelerine ve elemanların yük taşıma kapasitelerini çok etkili bir şekilde belirlemelerine olanak sağlamaktadır. Betonarme elemanlarda yüklerin veya mesnet kuvvetlerinin etkilediği bölgeler ile eleman kesitlerinin değiştiği bölgelerde yani gerilmelerin birbirine paralel bir şekilde oluşmadığı, çok eksenli gerilme dağılımının mevcut olduğu bölgeler süreksizlik bölgesi (D-bölgesi) olarak tanımlanmaktadır. Süreksizliğin olmadığı bölgeler ise B Bölgesi olarak tanımlanmaktadır ve Bernoulli-Navier hipotezinin geçerli olduğu kabul edilen bu bölgelerde bile iç kuvvetlerin kesit tesirlerinden hesaplanması ancak bazı kabullerle yapılabilmektedir. Dolayısıyla yapı elemanlarında geometrik veya statik süreksizliğin bulunduğu bölgelerde iç kuvvetleri belirlemek için geleneksel yöntemler yeterli olmamaktadır. Bu sebeple süreksizlik bölgelerinde yaklaşık yöntemler veya çubuk sistem modelleri kullanılmaktadır [42]. Kafes-kiriş modeli olarak da tanımlanan çubuk analogisi yöntemi gerilme alanlarının betonarme tasarıma uygulanması esasına

dayanan alt sınır plastisite teoremi olarak ifade edilebilmektedir. Yöntemde analiz edilecek yapısal bir eleman, uygulanan yük boyunca çekme ve basınç çubuklarından oluşan kafes kiriş olarak idealize edilmektedir. Kesikli çizgiler basınç çubuklarını, sürekli çizgiler çekme çubuklarını temsil etmektedir. Çubuk analogisi yönteminin kullanımı, gerilmelerin yayılışının net bir şekilde anlaşılmasında ve gerilme alanının görselleştirilmesinde deneyim beceri gerektirmektedir. Literatürde inceltilmiş uç kirişler için geliştirilmiş farklı çubuk modelleri önerilmektedir ve bu modellerden bazıları Şekil 1’de gösterilmektedir [43].



Şekil 1. Literatürde inceltilmiş uç kirişler için önerilen çubuk modelleri [44]

2.2.1. Model çubuklarının ve düğüm noktalarının boyutlandırılması

Ülkemizde bulunan şartnamelerde çubuk analogisiyle hesap detayları mevcut değildir. Bu nedenle boyutlandırmada ACI 318-19’da [44] tanımlanan limitler kullanılmaktadır ve Tablo 1’de elemanların tasarımında kullanılan denklemlere yer verilmiştir.

Tablo 1. ACI-318-19’da önerilen denklemler

Elemanlar	Denklemler
Çekme çubukları	$F_{nt} = A_{ts} \cdot f_y + A_{tp} \cdot \Delta f_p$
Basınç çubukları	$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs}$ $F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} + A_s' \cdot f_s'$
Düğüm noktaları	$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_c \cdot \beta_s \cdot f_c'$ $F_{nz} = f_{ce} \cdot A_{nz}$ $f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_c \cdot \beta_n \cdot f_c'$

Tablo 1’de A_{ts} çekme donatısı kesit alanı, f_y akma dayanımı, A_{tp} öngerilmemiş elemanlarda değeri sıfırdır, Δf_p yük faktörlerinden dolayı öngerilmeli donatıdaki gerilme artışı, f_{ce} efektif beton basınç dayanımı, A_{cs} kesit alanı, A_s' basınç donatısı alanı, f_s' basınç donatısının dayanımı, β_c ve β_s basınç ve çekme çubukları için tanımlanmış katsayılar ve f_c' beton basınç dayanımı, A_{nz} düğüm bölgesindeki alan, β_n düğüm noktası için ACI 318-19’a göre belirlenen bir katsayıdır.

İnceltilmiş uçlu kirişlerin kesit tesirleri hesaplanırken basit mesnetli kirişe benzer bir yol izlenmektedir. Bununla birlikte kiriş uçlarının kesitinin azaltılarak inceltilmesi kesme kuvvetinin önemli bir kısmının inceltilmiş bölgede oluşmasına neden olup bu durum inceltilmiş ucun boyutlandırılmasında dikkate alınmaktadır. İnceltilmiş uçlu kirişlerin çözümünde ilk olarak maruz kalacağı yük etkisinde oluşan kesit tesirleri belirlenerek iç kuvvet diyagramları oluşturulmaktadır. Oluşan mesnet tepkilerine göre kirişin her noktasındaki gerilmeler göz önüne alınarak kirişin uç kısmı boyutlandırılmaktadır. Prefabrike kiriş-kolon birleşimi moment aktarmayan bağlantı detayına sahip olduğunda dikkate alınan moment sıfır ve kesme kuvveti maksimum değerdedir [4]. BPEK ve PCI'da donatı alanlarını belirlemek için önerilen denklemler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Beton Prefabrikasyon El Kitabı ve PCI Tasarım El Kitabına göre tasarım detayları

	BPEK	PCI
İnceltilmiş uçta eğilme ve çekme donatısı	$A_s = \frac{[V_d \times a + H_d \times (h-d)]}{f_{yd} \times d} + \frac{H_d}{f_{yd}}$	$A_s = \frac{[V_u \left(\frac{a}{d}\right) + N_u \left(\frac{h}{d}\right)]}{\phi f_y}$
Kesme sürtünme donatısı	$A_s = A_{sf} + A_n = \frac{2}{3} \alpha \frac{V_d}{f_{yd} \mu_e} + \frac{H_d}{f_{yd}}$ $A_n = 0.5(A_s - A_{sf})$	$A_s = A_f + A_n = \frac{2V_u}{3\phi f_y \mu_e} + \frac{N_u}{\phi f_y}$ $A_n = 0.5(A_s - A_f)$
Sürtünme Katsayısı	$\mu_e = \frac{6.9 \times \lambda^2 \times b \times h \times \mu}{V_d}$	$\mu_e = \frac{1000 \lambda b h \mu}{V_u}$
İnceltilmiş uçtaki askı donatısı	$A_v = \frac{1}{2 \alpha f_{yd}} \times \left[\frac{V_d}{0.85} - 0.65 \alpha f_{cd} \times b \times d \right]$	$A_v = \frac{\left(\frac{V_u}{\phi} - 2 \lambda b d \sqrt{f_c} \right)}{2 f_y}$
İnceltilmemiş kesitteki askı donatısı	$A_{sh} = \frac{V_d}{f_{yd}}$	$A_{sh} = \frac{V_u}{\phi f_y}$
Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan donatı	$A'_{sh} = A_{sh}$	$A'_{sh} = A_{sh}$

Tablo 2'de a , kesme kuvvetinin A_{sh} donatısına olan uzaklığını, h inceltilmiş kısımdaki kiriş yüksekliğini, d inceltilmiş kısımdaki faydalı kiriş yüksekliğini, f_y donatının akma dayanımını, f_{yd} tasarım akma dayanımı, f_{cd} betonun çekme dayanımını ifade etmektedir. λ beton katsayısı ve μ sürtünme katsayısıdır. Her iki katsayıda tablolar aracılığıyla belirlenmektedir.

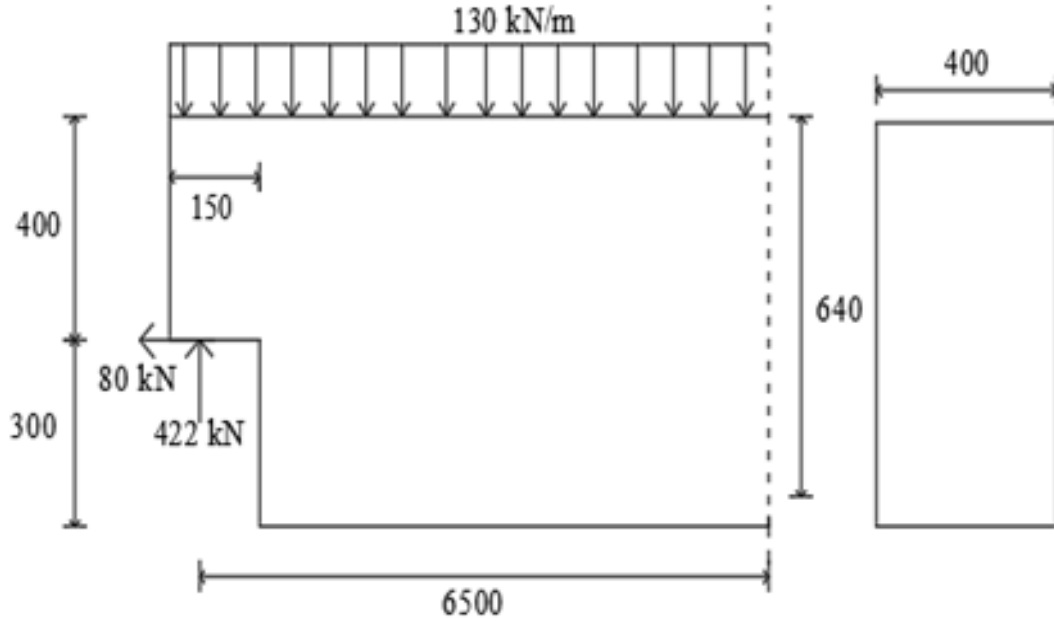
2.4 Düzgün Yayılı Yüke Maruz Kalan İnceltilmiş Uçlu Kirişlerin Tasarımı

Prefabrike betonarme inceltilmiş uçlu kirişlerin tasarımında çeşitli yönetmelikler ve farklı yaklaşımlardan faydalanılmaktadır. Çalışma kapsamında yayılı yüke maruz kalan inceltilmiş uçlu prefabrike bir kiriş, eğilmeyen elemanlar ve betonarme elemanların süreksizlik bölgelerinde uygulanabilir bir yaklaşım olan STM, Beton Prefabrikasyon El Kitabı (BPEK) ve PCI Tasarım El Kitabında (PCI) verilen koşullar dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Üç ayrı durum için yapılan tasarım sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarımı yapılacak prefabrike inceltilmiş uçlu kiriş Şekil 3'te gösterilmektedir. Kirişte beton basınç dayanımı 35 MPa ve donatı akma dayanımı ise 420 MPa olarak kabul edilmiştir.

2.4.1. Model çubuklarının ve düğüm noktalarının boyutlandırılması

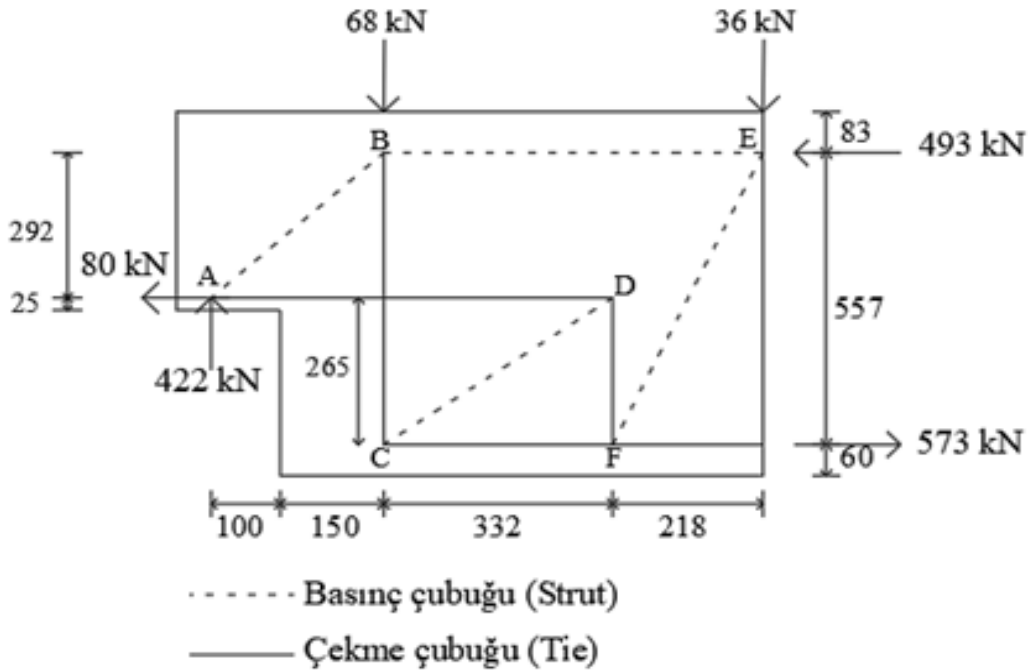
STM metodu ile hesap yapılırken taşıyıcı sistemin eleman boyutları, donatı düzeni, malzeme dayanımları, yükleme ve mesnetlenme durumu dikkate alınarak uygun bir çubuk model geliştirilmelidir. Türk yönetmeliklerinde çubuk

modellerle hesapta kullanılacak şartlara yer verilmediğinden boyutlandırma yapılırken ACI 318-19 yönetmeliğinde tanımlanan sınır değerler referans alınacaktır.



Şekil 3. Yayılı yüke maruz tasarımı yapılacak inceltmiş uçlu kiriş (Boyutlar mm'dir.)

D bölgesinin uzunluğu kiriş yüksekliğine eşit kabul edilmiştir. Tasarımda kullanılan STM modeli Şekil 4'te gösterilmektedir. İç kuvvetler belirlenip denge denklemleri yazılarak Tablo 3'te yer alan çubuk kuvvetler elde edilmiştir.



Şekil 4. Tasarımda kullanılan STM modeli

Tablo 3. Çubuk Analojisi Sonuçları

Elemanlar	AB	AD	BE	BC	CD	CF	DF	EF
Kuvvet(kN)	-556	442	-362	354	-567	443	354	-379
Donatı Alanı (mm ²)	785	1403	-	1124	-	1406	992	-
Seçilen Donatı	-	5Ø20	-	3Ø16	-	5Ø20	4Ø14	-

AD, BC, CF ve DF çekme çubuklarıdır. Gerekli donatı alanlarını belirlemek için çubuk kuvvetleri akma dayanımı ve kuvvet azaltma faktörünün çarpımına bölünmüştür. CB ve DF düşey çekme çubuklarının bulunduğu bölgede kullanılması gereken donatı alanı kapalı etriye olarak tasarlanmıştır. CF çekme çubuğunda oluşan kuvveti karşılamak için gerekli donatı belirlenmiştir.

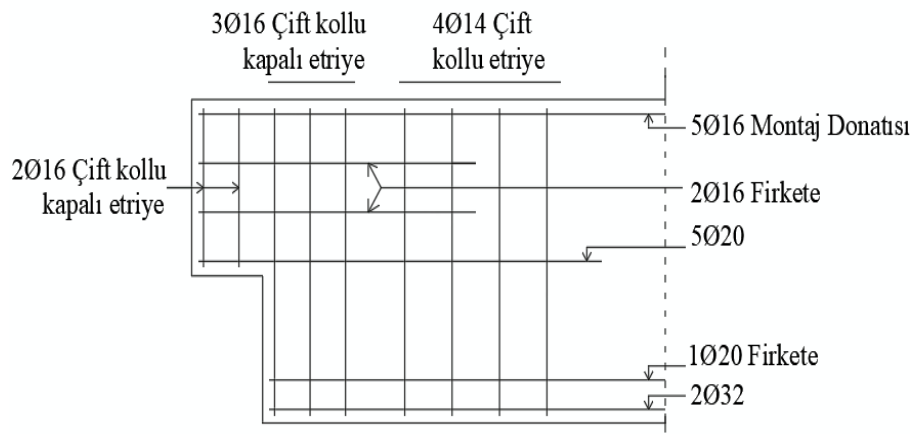
Düğüm noktalarının tasarımında düğüme birleşen çubuk kuvvetlerinin basınç ve çekme olması durumları seçilecek katsayı için önemlidir. A düğümü mesnetin yer aldığı düğümdür. Mesnet plağı 400x100x15 kabul edildiğinde oluşan gerilme 10,55 MPa, gerilme limiti ise 17,85 MPa olduğundan uygundur.

AB basınç çubuğundaki gerilmenin kontrolü için öncelikle basınç çubuğunun etkili boyu 121,5 mm olarak hesaplanmıştır. AB basınç çubuğunda oluşan gerilme 11,44 MPa iken gerilme limiti 16,7 MPa olduğundan güvenlidir.

B düğümü bir tane çekme çubuğu bulunan bir düğümdür. B düğümünün nihai dayanımı 17,85 MPa olarak belirlenmiştir. Nihai dayanımı sağlamak için gereken minimum efektif derinlik 55 mm'dir. Mesnet bölgesinde yerleştirilen kapalı etriye 3Ø16 olduğu dikkate alındığında ve 75 mm arayla yerleştirildiğinden düğüm bölgesinin genişliği 166 mm olarak belirlenmiştir.

C düğümü iki çekme çubuğu ve bir basınç çubuğu içermektedir. Düğüme izin verilen limitler ile donatı etkili derinliği kontrol edilmiştir. Düğümün nihai dayanımı 13,39 MPa ve CD basınç çubuğunun genişliği 106 mm olarak belirlenmiştir. CF çekme çubuğuyla aktarılacak kuvvet ve düğümün genişliği gözönüne alınarak kiriş açıklığında yer alan 32 mm'lik donatının üstüne 20 mm çapında U şeklinde donatı ilave edilmiştir. Donatılar arasındaki mesafe 50 mm olarak belirlenmiştir.

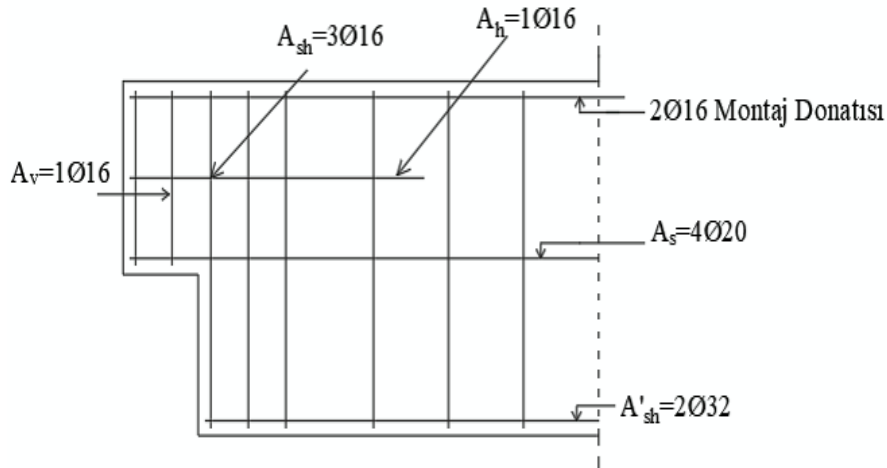
Mesnetin üzerindeki bölgede yer alan ana donatıya (A_s) paralel olacak şekilde düzenlenecek olan donatı için gerekli alan 575 mm² olarak hesaplanmış ve U şeklinde 2Ø16 donatı düzenlenmiştir. Ayrıca inceltilmiş kısma çift kollu 2Ø16'lık donatı yerleştirilmiştir. Şekil 5'de donatı düzeni gösterilmiştir.

**Şekil 5.** STM modeli dikkate alınarak oluşturulan donatı düzeni

2.4.2. İnceltmiş uçlu kirişin Beton Prefabrikasyon El Kitabına göre boyutlandırılması

Bu bölümde Şekil 3'te verilen betonarme prefabrikte inceltmiş uçlu kirişin yürürlükten kaldırılan TS 9967 yönetmeliğinde yer alan kriterleri içeren BPEK'ye göre tasarımı yapılmıştır. Tablo 2'de gösterilen denklemlere göre inceltmiş ucun alt yüzüne yerleştirilecek eğilme donatısı alanı A_s , 1005 mm^2 olarak belirlenmiştir. Donatı olarak $4\phi 20$ seçilmiştir. Buna göre kirişin üst yüzeyine yerleştirilecek konstrüktif montaj donatısı ise $2\phi 16$ olarak düzenlenmiştir.

İnceltmiş uçta kayma güvenliğini sağlamak için gereken donatı alanı 393 mm^2 olarak hesaplanmış ve donatı (A_h) $1\phi 16$ olarak düzenlenmiştir. İnceltmiş ucun hemen bitiminde kullanılacak kapalı etriye için ihtiyaç duyulan donatı alanı 1156 mm^2 'dir. A_{sh} donatısı $3\phi 16$ olarak düzenlenmiştir. Yönetmelikte A_{sh} ve A'_{sh} donatı alanlarının eşit olması gerektiği ifade edilmiş bu alan kiriş ana donatısıyla karşılanmıyorsa ilave donatı kullanılması önerilmiştir. A'_{sh} donatısı $2\phi 32$ olarak düzenlenmiştir. İnceltmiş uç bölgesinde olası çatlakları engellemek için kullanılacak askı donatısı alanı Tablo 2'de verilen ilgili denklem ile belirlenmiştir. İhtiyaç duyulan donatı alanı 399 mm^2 'dir. Seçilen donatı $1\phi 16$ 'dır ve kapalı etriye olarak düzenlenmiştir. Sonuç olarak inceltmiş uçlu prefabrikte kiriş için oluşan donatı düzeni Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Beton Prefabrikasyon El Kitabı kriterlerine göre donatı düzeni

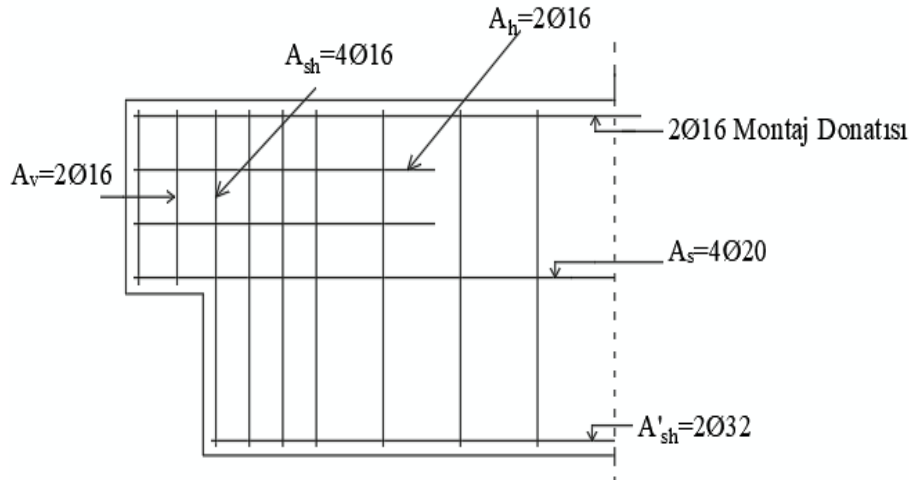
2.4.3. İnceltmiş uçlu kirişin PCI ile boyutlandırılması

Şekil 3'de yer alan kiriş verilen yükleme ve malzeme özellikleri dikkate alınarak PCI Tasarım El Kitabında yer alan koşullara uygun olarak tasarlanmıştır. Tasarım kitabında boyutlar inch (in) ve gerilmeler kips per square inch (ksi) birimleriyle ifade edilmiştir.

İnceltmiş uçta eğilme ve aksenal çekme için kullanılması gereken donatı miktarı Tablo 2'de A_s donatısını belirlemek için verilen denklemler kullanılmış ve büyük çıkan donatı alanı dikkate alınmıştır. Gelen etkileri karşılamak için gerekli donatı alanı (A_s) 1167.7 mm^2 olarak belirlenmiş, buna karşı gelen donatı $4\phi 20$ olarak seçilmiştir.

Doğrudan kesme durumunda oluşması muhtemel çatlağın önlenmesi için gerekli donatı (A_h) yine Tablo 2’de verilen denklem ile hesaplanmıştır. Gerekli donatı alanı 458 mm^2 ve yerleştirilecek donatı $2\text{Ø}16$ olarak belirlenmiştir.

İnceltilmiş ucun kirişle birleştiği köşeden itibaren oluşması muhtemel diyagonal çatlağı önlemek için ihtiyaç duyulan donatı alanı ise 1342 mm^2 olarak hesaplanmış, donatı konfigürasyonu $4\text{Ø}16$ olarak belirlenmiştir. PCI’da A'_{sh} donatısının alanının en az A_{sh} donatı alanı kadar olması önerildiğinden inceltilmemiş kısımdaki eğilme donatısı içinde $2\text{Ø}32$ kullanılmıştır. İnceltilmiş uçta oluşması beklenen diyagonal çatlağı engellemek için düşey olarak yerleştirilerek donatı (A_v) Tablo 2’de verilen ilgili denklem ile hesaplanmıştır. Gerekli donatı alanı 497 mm^2 ve seçilen donatı $2\text{Ø}16$ ’dır. Sonuç olarak inceltilmiş uçlu prefabrike kiriş için PCI’ya göre oluşan donatı konfigürasyonu Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. PCI şartlarına göre donatı düzeni

III. SONUÇLAR

Prefabrikasyon yüksek kalitede yapıların kısa sürede inşa edilmesine olanak sağlayan yapım teknolojisi olduğundan prefabrike elemanlar taşıyıcı sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte yapı elemanları önüretimli olduğundan farklı tipteki bağlantı detayları uygulanmakta olup yapı sistemlerinin statik ve dinamik yükler etkisindeki davranışı birleşim bölgesinin özelliklerine bağlıdır. Mimari gereklilikler sebebiyle prefabrike sistemlerin birleşim bölgelerinde kullanılan elemanlardan biri de inceltilmiş uç ve kenarlardır. Kolonlarda yer alan kısa konsollar ile birleşimlerde konsolun üst yüzeyine kiriş veya döşemenin tam olarak yerleştirilmesi amacıyla elemanların kesitleri küçültülerek inceltilmiş bölgeler oluşturulmaktadır. Eleman kesitinin küçültülmesi kesme kuvvetinin artışına neden olacağından tasarımda bu durum dikkate alınmaktadır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde inceltilmiş uçlu kirişlerin davranışını etkileyen parametreler donatı miktarı ve konfigürasyonu, beton dayanımı, inceltilmiş ucun boyutları, kiriş derinliği ve kesme açıklığının derinliğe oranı şeklinde ifade edilebilir. Bu etkileri gözlemleyebilmek için araştırmacılar analitik ve deneysel yollara başvurmuşlardır ve yapılan çalışmalarda sıklıkla STM modellerinin kullanıldığı görülmüştür.

Bu kapsamda sunulan çalışmada yayılı yüke maruz inceltilmiş uçlu prefabrikte bir kiriş için STM modeli, BPEK ve PCI'da yer alan denklem ve koşullar dikkate alınarak üç ayrı tasarım yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen kuvvetlere karşı direncin sağlanabilmesi için gereken donatı alanları Tablo 4'de birlikte gösterilmiştir. Tablo 5'de toplam donatı alanları verilmiştir.

Tablo 4. Tasarımda kullanılan donatı alanları

Kullanılan donatının yeri ve konfigürasyonu	STM	BPEK	PCI
İnceltilmiş uçta çekme donatısı, A_s	1403,2	1005,0	1167,7
Kesme sürtünme donatısı, A_h	575	393,0	458,0
İnceltilmemiş kesitteki askı donatısı, A_{sh}	1124,0	1156,0	1342,0
İnceltilmiş uçtaki askı donatısı, A_v	615	399,6	497,0
Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan donatı, A'_{sh}	1406,35	1156,0	1342,0

Tablo 5. Toplam donatı alanları

Toplam donatı alanları	STM	BPEK	PCI
	5123,5	4109,6	4806,7

Gerekli donatı alanları kıyaslandığında inceltilmiş uçta eğilme ve çekme kuvvetlerini karşılamak için kullanılması gereken donatının STM modelinde BPEK'na göre yaklaşık %40 ve PCI'a göre %20 daha fazla olduğu görülmüştür. PCI'da BPEK'a göre %16 daha fazla donatı kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

İnceltilmiş uç bölgesinde kesme kuvvetini karşılamak için yönetmeliklerde tasarım koşulu olarak belirtilen A_h donatısı, STM modelinde düğüm noktasındaki gerilme limitlerinin aşılmasına karşı direnç oluşturmak amacıyla tasarlanmıştır. BPEK'ye göre belirlenen kesme sürtünme donatısının alanı PCI'ya göre belirlenen donatı alanından %17 daha az bulunmuştur.

PCI'ya göre inceltilmiş ucun köşesinden başlaması muhtemel diyagonal çatlağı önlemek için kullanılması gereken düşey donatı STM modeline göre %19 ve BPEK'na göre %16 daha fazladır. BPEK'nda ise STM modeline göre %3 daha fazla donatı kullanılması gerektiği belirlenmiştir. PCI'ya göre inceltilmiş uçta oluşması muhtemel diyagonal çekme çatlağını önlemek için belirlenen donatı miktarı BPEK'na göre %25 daha fazla olması gerektiği belirlenmiştir. Eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alan A'_{sh} donatısı için belirlenen alanlar karşılaştırıldığında STM modelinde BPEK'ye göre %22 ve PCI'ya göre %5 daha fazla olduğu görülmüştür.

İnceltilmiş uçlu kirişler prefabrikte yapılarda sıklıkla kullanılmakta olup, bu kirişlerin uç bölgelerinde meydana gelen kesme kuvvetleri büyük önem taşımaktadır. STM yöntemi, betonarme elemanların süreksizlik bölgelerinin analizlerinde kullanılarak yük aktarım mekanizmasını göz önünde bulundurur ve donatı detaylarını belirler. Çalışmada, boyutları ve yükleme durumu literatüre uygun olarak belirlenen inceltilmiş uçlu kirişin STM yöntemi, PCI ve BPEK tasarım kriterleri ile donatı alanları belirlenmiştir. Toplam donatı alanları göz önüne alındığında, en yüksek donatı miktarının STM yönteminde belirlendiği görülmüştür. Bu durum, STM yönteminde inceltilmiş uçlu kirişin bağlantı bölgesinde meydana gelen gerilmelerin dağılımına bağlı olarak donatı alanlarının bulunması ile ilişkilendirilebilir.

PCI kriterleriyle belirlenen toplam donatı miktarı, BPEK kriterleriyle belirlenen toplam donatı miktarından daha fazladır ve PCI yönetmeliği daha güvenli tarafta kalmaktadır. İnceltilmiş uçlu kirişlerde kesme kuvvetleri etkindir ve inceltilmiş ucun kirişe bağlandığı köşede başlayan diyagonal çekme çatlağına karşı dayanım için üç yaklaşım karşılaştırıldığında, en yüksek donatı miktarı PCI'a göre belirlenmiştir. Donatı alanları ayrı ayrı incelendiğinde, genel olarak üç yaklaşımın birbiriyle uyumlu olduğu söylenebilir. PCI'da verilen tasarım kriterlerinin a/d oranı

1'den küçük inceltilmiş uçlu kirişler için olduğu ifade edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, a/d oranının farklı değerlerinin donatı alanı üzerindeki etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Binti Nur SJ (2013) Analysis of reinforced concrete dapped-end beams using Vector2. Dissertation, Universiti Teknologi Petronas.
2. Şeren C (2006) Depreme dayanıklı prefabrikte betonarme yapı tasarımı ve güçlendirilmesi. Dissertation, İstanbul Teknik Üniversitesi.
3. Barka G, Ataköy H, Yüksel E (2018) Beton Prefabrikasyon El Kitabı, Tasarım, Üretim ve Montaj Esasları, Türkiye Prefabrik Birliği, Ankara, Türkiye.
4. Design and typical details of connections for precast and prestressed concrete (PCI) (2010) Prestressed Concrete Institute, Chicago, USA.
5. Özkılıç YO, Aksoyly C, Yazman Ş, Gemi L, Arslan MH (2019) Prefabrikte inceltilmiş aşik uçlarının deneysel ve numerik sonlu eleman analizlerinin karşılaştırılması. International Science and Academic Congress, Konya, Türkiye, sayfa 303-310.
6. Mata-Falcón J, Pallarés L, Miguel PF (2019) Proposal and experimental validation of simplified strut-and-tie models on dapped-end beams. Eng Struct 183:594-609. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.010>
7. Aswin M, Mohammed BS, Liew MS, Syed ZI (2015) Shear failure of rc dapped-end beams. Advances in Materials Science and Engineering, 309135. <https://doi.org/10.1155/2015/309135>
8. Aswin M, Syed ZI, Wee T, Liew MS (2014) Prediction of failure loads of RC dapped-end beams. Applied Mechanics and Materials 567:463-468. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.463>
9. Wang O, Guo Z (2005) Experimental investigation on the shear capacity of RC dapped end beams and design recommendations. Struct Eng Mech 21(2):221-235.
10. Mohammed BS, Aswin M, Liew MS, Zawawi NAWA (2019) Structural performance of RC and R-ECC dapped-end beams based on the role of hanger or diagonal reinforcements combined by ECC. Int J Concr Struct Mater 13, 44. <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0356-x>
11. Abdal-Moniem AEN, Madkour H, Farah K, Abdullah A (2020) Numerical investigation of reinforced-concrete beams with half-joints. Struct Build 173(10):715-729. <https://doi.org/10.1680/jstbu.2020.173.10.703>
12. Abdul-Jawad HM (2018) Modelling of dapped-end beams using Abaqus software. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) 9(1):1-10.
13. Ahmad S, Elahi A, Hafeez J, Fawad M, Ahsan Z (2013) Evaluation of the shear strength of dapped ended beam. Life Science Journal 10(3):1038-1044.
14. Taher SEDF (2005) Strengthening of critically designed girders with dapped-ends. Struct. Build 158:141-152. <http://dx.doi.org/10.1680/stbu.2005.158.2.141>
15. Nagy-György T, Sas G, Daescu AC, Barros JAO, Stoian V (2012) Experimental and numerical assessment of the effectiveness of FRP-based strengthening configurations for dapped-end RC beams. Eng Struct 44:291-303. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.006>
16. Jirawattanasomkul T, Kongwang N, Likitlersuang S, Yodsudjai W, Charuvisit S, Sato Y. (2021) Failure analysis of dapped-end cracking in posttensioned bridge girder. American Society of Civil Engineers, J. Bridge Eng 26(11):04021082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001786](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001786)
17. Moreno-Martínez YJ, Meli R (2014) Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams. Eng Struct 75:152-163. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.051>
18. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2016) Impact of the reinforcement layout on the load capacity of reinforced concrete half-joints. Eng Struct 127:227-239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.061>
19. Özkılıç YO, Aksoyly C, Arslan MH (2021) Experimental and numerical investigations of steel fiber reinforced concrete dapped-end purlins. J Build Eng 36:102119. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102119>
20. Aswin M, Al-Fakih A, Syed ZI, Liew MS (2023) Influence of different dapped-end reinforcement configurations on structural behavior of rc dapped-end beam. Build 13, 116. <https://doi.org/10.3390/buildings13010116>
21. Lu WY, Chen TC, Lin IJ (2015) Shear strength of reinforced concrete dapped-end beams with shear span-to-depth ratios larger than unity. J Mar Sci Technol 23(4): 431-442. <https://doi.org/10.6119/JMST-015-0511-1>
22. Hussain HN, Shakir QM (2019) Experimental study of the behavior of reinforced concrete beams with composite dapped end under effect of static and repeated loads. Int J Appl Sci Technol 2, 1. <https://doi.org/10.30560/ijas.v2n1p43>

23. Rentería-Soto J, Cruz-Solís JJ, Betancourt-Chávez JR, Narayanasamy R (2019) Experimental study of two strut and tie models for dapped-end beams. *International Journal For Technological Research In Engineering* 6, 7.
24. Aksoylu C, Özkılıç YO, Arslan MH (2020) Damages on prefabricated concrete dapped-end purlins due to snow loads and a novel reinforcement detail. *Eng Struct* 225:111225. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111225>
25. Syed ZI, Kewalramani M, Hejah ES (2019) Structural reliability of dapped end beams with different reinforcement layouts under dynamic loading. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 575:012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/575/1/012003>
26. Rajapakse C, Degee H, Mihaylov B (2022) Investigation of shear and flexural failures of dapped-end connections with orthogonal reinforcement. *Eng Struct* 260:114233. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114233>
27. Mohamed RN, Elliott KS (2008) Shear strength of short recess precast dapped-end beams made of steel fiber self compacting concrete. Singapore Concrete Institute.
28. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2017) The effect of local reinforcing bar reductions and anchorage zone cracking on the load capacity of RC half-joints. *Eng Struct* 152:865–877. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.021>
29. Oviedo R, Gutiérrez S, María HS (2016) Experimental evaluation of optimized strut-and-tie models for a dapped beam. *Struct Concr* 17, 3. <https://doi.org/10.1002/suco.201500037>
30. Atta A, Taman M (2016) Innovative method for strengthening dapped-end beams using an external prestressing technique. *Mater Struct* 49:3005–3019. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0701-8>
31. Shakir QM, Allawe R (2019) Behavior of self-compacting reinforced concrete dapped end beams. *Int J of Appl Sci* 2,1. <https://doi.org/10.30560/ijas.v2n1p33>
32. Fayed S, Madenci E, Özkılıç YO (2022) Flexural behavior of rc beams with an abrupt change in depth: experimental work. *Build* 12, 2176. <https://doi.org/10.3390/buildings12122176>
33. Syed ZI, Hejah ES, Mohamed OA (2017) Modelling of dapped-end beams under dynamic loading. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 6, 3. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.6.3.242-247>
34. Shakir QM, Al-Sahlawi YM, Abd BB, Hamad SA (2023) Nonlinear finite element analysis of high-strength reinforced concrete beams with severely disturbed regions. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17, 1. <https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i1.03>
35. Aksoylu C, Özkılıç YO, Yazman Ş, Gemi L, Arslan MH (2021) İnceltilmiş uçlu önüretimli aşık kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinin deneysel ve numerik olarak irdelenmesi ve çözüm önerileri. *Teknik Dergi* 32(3):10823-10858. <https://doi.org/10.18400/tekderg.667066>
36. Zamri NF, Mohamed RN, Elliott KS (2021) Shear capacity of precast half-joint beams with steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 272:121813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121813>
37. Don W, Suryanto B, Tambusay A, Suprobo P (2022) Forensic assessments of the influence of reinforcement detailing in reinforced concrete half-joints: A nonlinear finite element study. *Struct* 38:689–703. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.029>
38. Shakir QM, Hamad SA (2021) Behavior of pocket-type high-strength rc beams without or with dapped ends, *Pract Period Struct Des Constr*, 26(4):04021048. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000624](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000624)
39. Al-Maliki HNG, Hussain AJ, Fahad JJ (2018) Comparative study on experimental behavior of r.c. inverted dapped-end girders with openings strengthened by vertical normal bolts. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences* 1, 25.
40. Santarsiero G, Picciano V (2024) Post-tension retrofitting of RC dapped-end beams: A numerical investigation. *Structural Concrete* 1–19. <https://doi.org/10.1002/suco.202300207>
41. Mihaylov BI (2024) Model for rapid evaluation of corner crack widths in reinforced concrete dapped-end connections. *Engineering Structures* 303, 117497. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117497>
42. El-Metwally SEE, Chen W (2018) *Structural Concrete strut and tie models for unified design*. Taylor and Francis, Boca Raton.
43. Desnerck P, Lees JM, Morley CT (2018) Strut-and-tie models for deteriorated reinforced concrete half-joints. *Eng Struct* 161:41-54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.01.013>
44. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)* (2019). American Concrete Institute, Michigan, USA.
45. *Yapı Elemanları, Taşıyıcı Sistemler ve Binalar-Prefabrikte Betonarme ve Öngerilmeli Betondan-Hesap Esasları ile İmalat ve Montaj Kuralları (TS 9967)* (1992), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
46. *Öndökümlü Beton Mamuller - Genel Kurallar (TS EN 13369)* (2010). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.