

Öngerilmeli T Kesitli Köprü Kirişlerinin Seçimi ve Doğrusal Programlama ile Optimizasyonu

Berrin Nevra KATİ EKER^{1*}, Ömer KELEŞOĞLU², Sedat SAVAŞ³

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

³İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*berrinnevrakati@gmail.com, okelesoglu@hotmail.com, ssavas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/01/2020);

Kabul/Accepted: 09/08/2020)

Öz: Bu makale kapsamında, Elazığ-Diyarbakır Devlet Yolu işi dahilinde bulunan 38 m açıklıklı Maden Viyadüğü tasarımı emniyet ve ekonomik açıdan değerlendirilmiş, öngerilmeli kiriş boyut optimizasyonu yapılmıştır. Bu doğrultuda Maden Viyadüğü'nün tüm hesap parametreleri, Ulaştırma Bakanlığı Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü tarafından yapılan hesap raporundan alınmıştır. Viyadükte kullanılmış olan öngerilmeli kirişler yerine optimum bir yapı elemanı kullanmak için AASHTO 8.1'den (American Association of State Highway and Transportation) altı farklı tip T kesitli kiriş alınmış ve bu kirişler arasındaki en emniyetli kiriş optimize edilmiştir. Kiriş seçimi için özel bir algoritma geliştirilmiş ve kiriş optimizasyonu yapılırken "doğrusal programlama" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde gerilme, boyut ve maliyet kısıtlayıcıları kullanılmıştır. Elde edilen veriler hesap raporundaki sonuçlarla karşılaştırılmış ve AASHTO 8.1'den seçilen kiriş tipinin, mevcut yapıda kullanılan kiriş tipinden daha ekonomik ve emniyetli olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışma, bu kapsamdaki tasarımlarda optimizasyon tekniğinin pratik olarak kullanılmasının güvenlik ve ekonomik açıdan gerekliliğini açıklamaktadır.

Anahtar kelimeler: Doğrusal programlama, ms solver, optimizasyon, öngerilmeli kiriş, visual basic

Selection of Prestressed T Section Bridge Beams and Their Optimization with Linear Programming

Abstract: Within the scope of this article, the design of the 38 m span Maden Viaduct within Elazığ-Diyarbakır State Highway work was evaluated in terms of safety and economy and prestressed beam dimension optimization was performed. Accordingly, all account parameters of the Maden Viaduct are taken from the account report prepared by the 8th Regional Directorate of the Ministry of Transportation. Six types of T-section beams have been taken from AASHTO 8.1 (American Association of State Highway and Transportation) to use an optimum structural element instead of the prestressed beams used on the viaduct and the safest beam between these beams has been optimized. A special algorithm was developed for beam selection and "linear programming" method was used for beam optimization. Stress, size and cost constraints were used in this method. The data obtained were compared with the results in the account report and it was concluded that the type of beam chosen from AASHTO 8.1 was more economical and safer than the type of beam used in the present structure. The study explains the security and economic necessity of using the optimization technique practically in the designs in this scope.

Key words: Linear programming, ms solver, optimization, prestressed beam, visual basic

1. Giriş

Karar verme sürecinde çok farklı etken olmasına rağmen, inşaat mühendisliğinde yapıların ekonomik ve emniyetli olarak tasarlanması önemlidir. Genellikle yapısal optimizasyon ifadesi topoloji, boyut ve şekil parametrelerini temel almaktadır. Bu bağlamda Cohn ve Lounis (1994) betonarme köprü sistemlerinin optimum tasarımı üzerine çalışmışlar ve yapı maliyeti, gerekli ön germe donatısı ve beton miktarı gibi amaç fonksiyonlarını göz önüne almışlardır [1]. Ahsan, Rana ve Ghani (2012) çalışmasında, I en kesitli, ard çekimli beton köprü kirişlerini ele alarak maliyet optimizasyonu yapmışlardır [2].

Yapı tasarım optimizasyonu aşamasında çeşitli metodolojiler kullanılmaktadır. Örneğin; doğrusal programlama, ulaştırma modelleri, Leontief modeli, şebeke analizi, stok modelleri, oyun kuramı, bekleme hattı modelleri, dinamik programlama vb. gibi. İster sayısal analiz, ister yön-eylem araştırması adı altında olsun bütün model ve teknikler, aslında işletme sorunlarının matematik olarak programlanması ve çözülmesi anlamına gelmektedir. Tüm bu tekniklerle bulunan sonuçlar gerçeğe uygunluk derecelerinin araştırılması, gerekli kontrollerin yapılması, stratejilerinin saptanması ile tanımlanabilir ve bu süreç matematiksel programlama

* Sorumlu yazar: berrinnevrakati@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-4647-5568, ² 0000-0001-8967-5976, ³0000-0003-2466-3514

kapsamında değerlendirilir. Karar verme aşamasında problemleri sayısal verilerle ifade edebilen ve anlatımına en basit şekilde olanak sağlayan metotlardan biri doğrusal programlama yöntemidir. Seçme (2005)'ye göre, doğrusal programlama, belirli bir amacı maksimize ederek, sınırlı kaynakların nasıl kullanılması gerektiğine çözüm sunan bir karar verme aracıdır [3]. Doğrusal programlamanın temel konusu ise sınırlı kaynakların yarışan faaliyetler arasında optimum biçimde dağıtımını sağlamak olduğundan, bu teknik yapısal optimizasyonlarda sıkça kullanılmaktadır [4]. Bu yöntemde, amaçların önem derecesine göre sıralanması ve hedeflerin belirlenmesi gerekmektedir ve amaçlarla tanımlanmış kısıtların önem sırasına göre hedeflerden sapmaları minimize edilmektedir [5].

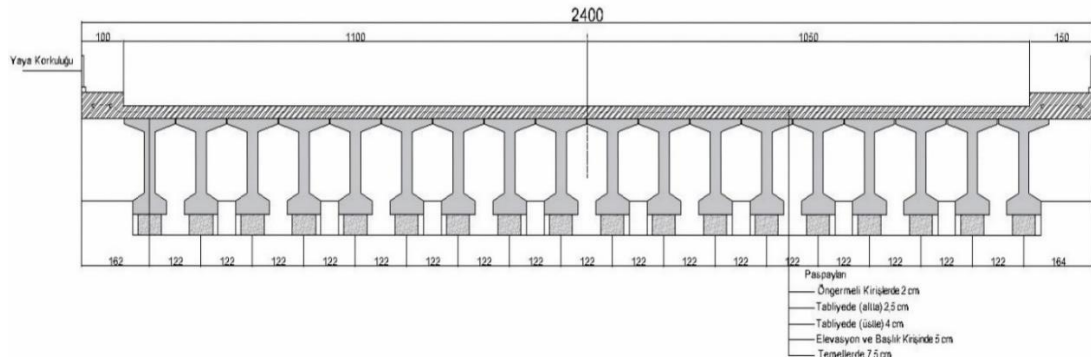
Hedef programlama ilk defa doğrusal hedef programlama olarak Charnes ve Cooper (1961) tarafından önerilmiştir [6]. George Dantzig'in geliştirmiş olduğu Simpleks Algoritması, işletme konusundaki problemlere uygulanmış ve bu alandaki uygulama bu yolla gerçekleştirilmiştir [7]. Simpleks algoritmasının gelişiminden bu yana, doğrusal programlama; bankacılık, eğitim, ormancılık, petrol ve taşımacılık gibi farklı alanlarda olduğu kadar endüstrilerde de optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır [8]. Chen ve Wang (1997) Kanada'da faaliyet gösteren entegre bir çelik üretim işletmesinde, üretim ve dağıtım planlaması için doğrusal programlamayı kullanmışlardır [9]. Bu uygulamada doğrusal programlama yaklaşımıyla kurulan modelin çözümüyle, işletmeye büyük finansal fayda sağlamışlardır. Ergülen ve Gürbüz (2006), enerji ve inşaat sektöründe faaliyet gösteren betonarme aydınlatma direği üreten bir işletmede: üretim kapasitesi, kalıp sayısı, tonaj ve işgücü kısıtları altında kapasitenin maksimum kullanılmasını mümkün kılan bir doğrusal programlama modeli ile üretim planlamasını gerçekleştirmişlerdir [10].

Bu makale kapsamında, Elazığ ilinin Maden ilçesinde bulunan Maden Viyadüğü tasarımına ait öngerilmeli kirişlerin boyut optimizasyonu, doğrusal programlama yöntemi ile yapılmış olup, mevcut tasarımda kullanılan kiriş yerine daha ekonomik başka bir kiriş tipinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla AASHTO 8.1'den yararlanılarak farklı altı tip T kesitli kiriş seçilmiş ve bunlardan hangi tipin kullanımının uygun olacağı belirlenmiştir. Kullanılacak tip seçimi yapılırken, tarafımızca hazırlanan özel bir algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Kiriş seçimi yapıldıktan sonra seçilen kirişin boyut optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Boyut optimizasyonu yapılırken doğrusal programlama yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal programlamanın bir gereği olarak belirlenmesi gereken tüm gerilme kısıtlayıcılar AASHTO 9.15'den alınmıştır. Ayrıca gerilme kısıtlayıcılarına ek olarak boyut kısıtlayıcıları da kullanılmıştır. Enkesit alanı en küçük kirişi kullanarak emniyetli bir çözüm amaçlanmıştır, böylece daha ekonomik bir yapı elde edilmiştir. Optimizasyon yapılırken genel amaçlı optimizasyon makrosu olan Solver kullanılmış olup, elde edilen bulgular önceki hesap raporlarıyla karşılaştırılmış ve mevcut tasarımdan daha güvenli ve ekonomik bir çözümlemenin optimizasyon metotları kullanılarak mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

2. Materyal ve Yöntemler

2.1. Maden Viyadüğü'nde kullanılan kirişlerin geometrik ve mukavemet özellikleri

Maden Viyadüğü'nde 108 adet 38 m uzunluğunda prefabrike kiriş kullanılmıştır. Maden Viyadüğüne ait enkesit tasarımı Şekil 1'de gösterilmiş olup sistem basit kiriş olarak tasarlanmıştır.



Şekil 1. Maden Viyadüğü'nün enkesit tasarımı

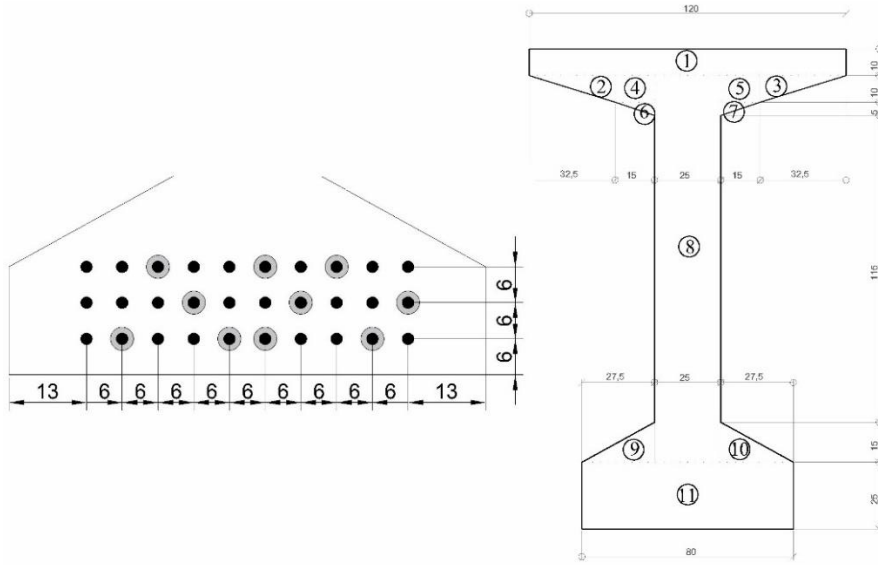
Maden Viyadüğü'nün tasarımında kullanılan kirişlerin geometrik özellikleri ve kiriş en kesitinde ki öngerme halatları Şekil 2'de, kirişlere ait mukavemet özelliklerinin değerleri Tablo 1'de verilmiş olup, veriler Karayolları

genel Müdürlüğü'nün Maden Viyadüğü Hesap Raporu'ndan alınmıştır [11]. Y ile gösterilen değerler kirişin ağırlık merkezini, A ifadesi kirişin enkesit alanını, S mukavemet momentini ve I ise kirişlerin atalet momentlerini ifade etmektedir.

Tablo 1. Maden Viyadüğü'nün tasarımında prefabrike ve kompozit kirişe ait mukavemet özellikleri

Mukavemet Özelliği	Y_{bb} (m)	Y_{bt} (m)	A_b (m^2)	I_{xb} (m^4)	S_{bb} (m^3)	S_{bt} (m^3)	X_{bb} (m)	I_{yb} (m^4)
Prefabrike	0,902493	0,897507	0,793750	0,327939	0,363370	0,365389	0,600000	0,035526
Kompozit	1,130079	0,919921	1,021000	0,513834	0,454689	0,767007	0,600000	0,051174

Tasarımda kullanılan 38m uzunluğundaki öngerilmeli kirişlerin geometrik özellikleri ve enkesiti Şekil 2.'de verilmiş olup, kirişlerde kullanılan öngerme halatları ve kılıflanan öngerme halatları gösterilmiştir.



Şekil 2. Maden Viyadüğü'nün tasarımında kullanılan kirişlerin geometrik özellikleri ve kiriş enkesitindeki öngerme halatları

2.2. Tasarım kirişinin malzeme özellikleri

Geometrik ve dayanım özellikleri bilinen köprü kirişinin optimizasyonu yapılırken hesaplamalarda kullanılacak değerleri belirlemek amacıyla kirişlerde kullanılan malzeme özelliklerinin bilinmesi gerekir. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Tasarımda kullanılan malzeme özellikleri

Beton Özellikleri	
Prefabrike Kirişlerde	:C45 ($f_{ck} = 45 MPa$)
Temelerde	:C25 ($f_{ck} = 25 MPa$)
Döşemelerde	:C25 ($f_{ck} = 25 MPa$)
Yaya Bordürlerinde	:C25 ($f_{ck} = 25 MPa$)
Grobeton	:C16 ($f_{ck} = 16 MPa$)
Tabliyede	:C25 ($f_{ck} = 25 MPa$)
Çelik Özellikleri	
Betonarme Çeliği	:S420
Öngerme Çeliği	:0,6'' 270 K Düşük Gevşemeli ASTM A 416-80

2.3. Köprü tasarımına etki eden yükler

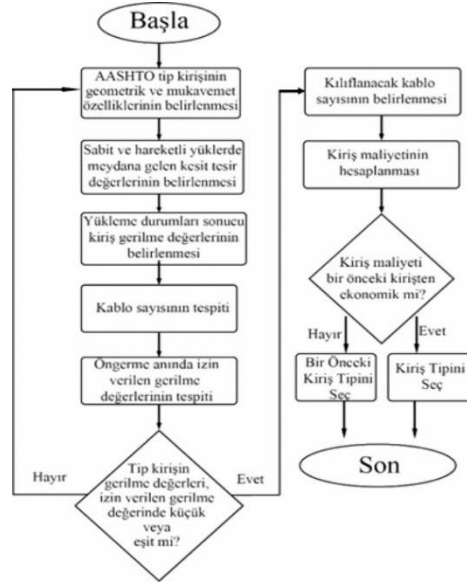
Bir köprü tasarımında üstyapı elemanlarına etkiyen yüklerin öncelikli olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmaya konu olan yükler, sabit ve hareketli yükler kapsamında ele alınmış olup Tablo 3’de sunulmuştur. İlave yük olarak ilave zati kiriş ağırlığı, korkuluk ve yaya yükleri alınmış olup, hareketli yük olarak kullanılan H30-S24 kamyon yükü ise 1,20 m tork aralığına ve 79,855 kN dingil ağırlığına sahiptir.

Tablo 3. Hareketli ve sabit yük parametreleri

Hareketli Yükler	
Standart kamyon yükü	H30 – S24
Sabit Yükler	
Kiriş zati ağırlığı	$G_k = 15,794 \text{ kN/m}$
Asfalt + tecrit	$G_a = 1,684 \text{ kN/m}$
İlave yükler	$G_I = 0,250 \text{ kN/m}$
Toplam yükler	$G_T = 1,934 \text{ kN/m}$

2.4. Köprüde kullanılacak öngörülme kiriş seçimi

Maden Viyadüğü ’nün tasarımında kullanılan öngörülme T kesitli kirişlere alternatif olarak kullanılacak kirişleri belirlemek amacıyla AASHTO 8.1’den T kesitli altı tip kiriş seçilmiştir. Kiriş seçimi yapılırken özel olarak geliştirilen yazılım kullanılmıştır. Tip kirişlerinin seçimleri için yazılan algoritmanın akış şeması Şekil 3’de verilmektedir.



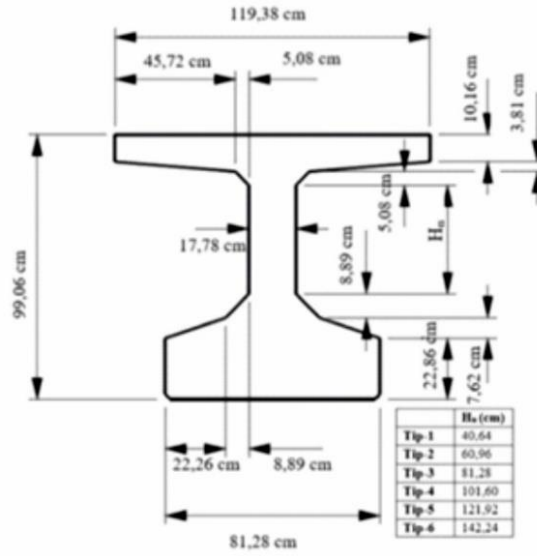
Şekil 3. Kiriş seçimi için geliştirilen algoritmanın akış şeması

Kiriş seçimi yapılmadan önce öncelikle kullanılması planlanan kiriş tiplerinin kullanıma uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu çalışma gerçekleştirilirken ASSHTO 8.1’den farklı geometrik boyutlara sahip T kesitli kiriş tipleri arasından seçim yapılmıştır. Öncelikle her kiriş tipinin mukavemet özellikleri teker teker belirlenmiş ve her bir kiriş için kiriş zati yüklerinden meydana gelen sabit yük parametrelerine göre kesit tesir değerleri hesaplanmıştır. Hareketli ve sabit yüklerden dolayı meydana gelen gerilme değerlerine bakılarak kirişlerde kullanılması gereken öngörülme halat adedi belirlenmiştir. Halat sayısının tespitiyle ön germe anında izin verilen gerilme değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar sonucunda sınır değerlerini aşmayan üç tip kiriş olduğu görülmüştür. Fakat köprü tasarımında tek tip kiriş kullanılacağı için ekstra bir seçim parametresi oluşturulmaya gerek duyulmuştur.

Seçimi uygun olan kirişler arasında en iyi seçimi yapabilmek amacıyla, kirişlerin hangisinin kullanımının daha ekonomik olduğuna bakılmaya karar verilmiştir. Bu amaçla öncelikle kirişte kılıflınması gereken öngerilmeli halat adetleri hesaplanmıştır. Ve maliyet hesabı çıkarılmıştır. Hesaplama sonucunda en ekonomik ve emniyetli tarafta kalan kiriş tipinin seçilmesine karar verilmiştir. Bu çalışmada seçilen kiriş tipi Tip-5 olarak belirlenmiştir.

2.5. AASHTO tip kirişlerin mukavemet özellikleri

Kiriş seçimi yapılırken ilk adım olarak tip kirişlerin mukavemet özelliklerini belirlemek uygun olacaktır bu amaçla her tipin geometrisi incelenmiştir. Şekil 4’de AASHTO tip kirişlerinin geometrik özellikleri görülmektedir [12]. Kirişlerin zati ağırlıkları altında meydana gelen gerilme değerleri ve öngerilmeli kirişlerde kullanılması gereken ön germe halat adedinin belirlenmesi amacıyla gerekli olan kiriş mukavemet değerleri Tablo 4’de sunulmuştur. Bu değerler ayrıca ön germe anında izin verilen gerilme değerlerini hesaplamak için de kullanılmıştır.



Şekil 4. AASHTO 8.1 Tip kirişlerinin geometrik özellikleri

Tablo 4. AASHTO Tip kirişlerinin mukavemet özellikleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6	Birim
Y_{bb}	0,476761	0,568588	0,661678	0,755800	0,850777	0,946470	m
Y_{bt}	0,513839	0,625212	0,735322	0,844400	0,952523	1,060130	m
A_b	0,487257	0,523386	0,559515	0,595644	0,631773	0,667902	m ²
I_{xb}	0,061742	0,099631	0,148239	0,208327	0,280654	0,365973	m ⁴
S_{bb}	0,129502	0,175226	0,224035	0,275638	0,329879	0,386672	m ³
S_{bt}	0,120157	0,159356	0,201598	0,246716	0,294611	0,345216	m ³
X_{bb}	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	0,596900	m
I_{yb}	0,028302	0,028397	0,028492	0,028588	0,028683	0,028778	m ⁴

2.6. AASHTO tip kirişlerine etki eden kiriş zati yükleri

Kullanılan kiriş tipi değiştirildiği zaman hareketli yükler sabit kalırken, sabit yüklerin değişkenlik göstermesinden dolayı kiriş zati ağırlığı da tiplere göre değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada her tip kiriş için kullanılan betonun özellikleri benzer olarak alınmıştır. AASHTO 8.1. tip kirişlerde meydana gelen sabit yüklerin gösterdiği bu değişkenlik kirişlerin alt ve üst liflerinde meydana gelen gerilme değerlerini değiştirmektedir. Kiriş tiplerinden dolayı meydana gelen kiriş zati ağırlıkları Tablo 5’de sunulmuştur.

Tablo 5. AASHTO 8.1 tip kirişlerinden meydana gelen kiriş zati ağırlıkları

Kiriş tipleri	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
G_k (kN/m)	12,181	13,085	13,988	14,891	15,794	16,698

2.7. ASSHTO 8.1 tip kirişlerinde meydana gelen kesit tesir değerleri

Kirişlere etki eden hareketli ve sabit yüklerden dolayı her bir kirişte farklı kiriş tesir kuvvetleri meydana gelmektedir. Mesnetlenme ekseninde ve kiriş ortasında meydana gelen kesme ve moment değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada kiriş ortasındaki maksimum moment değerleri bir değişken olarak kullanılmıştır. Her tip kiriş için hesaplanan açıklık ortası moment değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. AASHTO tip kirişlerde meydana gelen açıklık ortası maksimum moment değerleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
M_1 (kNm)	2198,18	2361,32	2524,27	2687,23	2850,19	3013,32
M_2 (kNm)	1375,70	1375,70	1375,70	375,70	1375,70	1375,70
M_3 (kNm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_4 (kNm)	348,93	348,93	348,93	348,93	348,93	348,93
M_H (kNm)	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04	1993,04

2.8. Doğrusal programlamanın matematiksel yapısı

Doğrusal programlama modeli değişkenler arasındaki ilişkilerin doğrusal olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu varsayım, bütün ilişkilerin birinci dereceden fonksiyonlar ile ifade edilmesinden kaynaklanır [13]. Doğrusallık varsayımı aslında temel olarak orantılı olma ve katkı olmak üzere iki özelliğe ilgilidir [14]. Orantılı olma özelliği, her bir karar değişkeninin gerek amaç fonksiyonuna gerekse de tüm kısıtlara etkisinin, söz konusu değişkenin değeriyle doğru orantılı olması gerektiğini ifade etmektedir. Kısıtlardaki ve amaç fonksiyonundaki tüm değişkenlerin toplam katkısının bu değişkenlerin bireysel katkılarının toplamından oluşması şartına dayanır [4].

Doğrusal programlama modelinin dayandığı bir diğer varsayıma göre ise her bir amacın sonsuz derecede bölünebilir olmasıdır. Bu varsayım çerçevesinde, karar değişkenleri tamsayı değerlerin yanında kesirli değerler de alabilmektedir ve kit kaynaklar kesirli miktarlarda kullanılabilir [14]. Doğrusal programlamanın üç önemli bileşeni vardır. Bunlar;

- Amaç fonksiyonu
- Sınırlayıcı fonksiyonlar
- Pozitif sınırlama [15].

Amaç fonksiyonu; kontrol edilebilir değişkenler x_j ($j=1,2,3,\dots,n$) ve sabit katsayılarından oluşan bir ifadedir. Amaç fonksiyonu maksimizasyon, minimizasyon veya belirli bir değere eşitleme şeklinde olur [16]. Amaç fonksiyonu Z olmak üzere, $Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$ olarak gösterilebilir. Sınırlayıcı fonksiyonlar; karar oluşturma sürecinde, kararımızı sınırlayan dış veya iç etkenlerin matematiksel ifadesidir [16]. Sınırlayıcı fonksiyonlar karar oluşturulacak probleme göre farklılık göstermekte olup, deplasman sınırlayıcıları, boyut sınırlayıcıları, gerilme sınırlayıcıları vb. olabilirler. Sınırlayıcı fonksiyonlar maksimizasyon problemlerinde; $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$ ($i = 1,2,3,\dots,n$), minimizasyon problemlerinde ise; $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$ ($i = 1,2,3,\dots,n$) fonksiyonlarıyla ifade edilebilir. Üretim, maliyet, alan, ağırlık, kuvvet, boyut vb. değişkenler negatif olmayacağından karar değişkenleri pozitifdir. Pozitif sınırlamanın gösterimi ise, $x_j \geq 0$, $j = 1,2,3,\dots,n$ şeklindedir.

3. Bulgular

3.1. AAASHTO 8.1. tip kirişlerde meydana gelen toplam gerilme değerleri

Kirişlerde meydana gelen gerilme değerlerini elde edebilmek amacıyla üç yükleme durumu ele alınmış olup, bunlardan birinci yükleme durumunda kirişin zati ağırlığı altında, kirişin ortasında alt ve üst liflerde meydana gelen aşağıda sunulan gerilme ifadeleri kullanılmıştır.

$$\sigma_{b1} = (M_1 + M_2 + M_3) / S_{bb} \quad (1)$$

$$\sigma_{t1} = (M_1 + M_2 + M_3) / S_{bt} \quad (2)$$

İkinci durumda ise ilave yüklerin etkisiyle meydana gelen gerilme durumlarını yansıtan aşağıdaki ifadeler temel alınmıştır.

$$\sigma_{b2} = M_4 / S_{cb} \quad (3)$$

$$\sigma_{t2} = M_4 / S_{ct} \quad (4)$$

Üçüncü durumda ise hareketli yükler altında kesitte meydana gelen gerilme değerleri göz önüne alınmıştır.

$$\sigma_{b4} = M_H / S_{cb} \quad (5)$$

$$\sigma_{t4} = M_H / S_{ct} \quad (6)$$

Burada;

M_1 : kiriş zati ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_2 : tabliye ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_3 : enleme kiriş ağırlığından meydana gelen kesit tesir momenti,

M_4 : kompozit kesitte ilave yüklerden meydana gelen kesit tesir momenti

M_H : standart kamyon yükünden meydana gelen kesit tesir momenti olarak gösterilmiştir. Kullanılan tüm moment değerleri, açıklık ortasında meydana gelen moment değerleridir. Kirişlerde meydana gelen toplam gerilme ise

$$\sigma_{bp} = \sigma_{b1} + \sigma_{b2} + \sigma_{b4} - 3341 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{tp} = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} + \sigma_{t4} - 1409 \text{ kN/m}^2 \quad (8)$$

Formülleri ile hesaplanmıştır. Bu ifadelerdeki “-3341 kN/m²” ve “-1409 kN/m²” değerleri servis aşamasında kirişin alt ve üst liflerinde izin verilen öngerme gerilme değerleri olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. AASHTO 8.1. Tip Kirişlerin Alt Ve Üst Liflerinde Meydana Gelen Öngerme Gerilme Değerleri

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
$\sigma_{bp} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	36880,1	27801,1	26708,5	17986,8	15062,3	12838,7
$\sigma_{tp} \text{ (kN/m}^2\text{)}$	-19704,9	-16226,9	-19168,4	-12300,9	-11083,4	-10137,8

3.2. AASHTO 8.1 tip kirişlerde kullanılan halat sayıları

Optimizasyon sürecinde kiriş seçiminde, öngerme anında izin verilen emniyet gerilme değerleri ile birlikte, kullanılacak olan ön germe halat sayısı da göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan halat sayısını belirlemek kayıplardan sonra etkili ön germe kuvvetini (P_{se}) tespit etmekle mümkündür. P_{se} aşağıdaki ifadeden elde edilir;

$$\sigma_{bp} = (P_{se} / A_b) + (P_{se} \times e / S_{bb}) \quad (9)$$

Burada e halat eksantirisitesini ifade etmektedir. Kullanılacak halat sayısını belirlemek amacıyla kayıplardan sonra etkili öngerme kuvvet değerinin, bir halat için bütün kayıplardan sonra izin verilen öngerme kuvvetine oranı alınmıştır. Buna göre her tip için gerekli öngerme halat adet değeri Tablo 8’de sunulmuştur. Kirişlerde kullanılan halat maliyeti toplam maliyetin neredeyse %45~50’sini teşkil etmektedir.

Tablo 8. Tip kirişlerde kullanılacak halat adedi

	Tip-1	Tip-2	Tip-3	Tip-4	Tip-5	Tip-6
N' (Adet)	45	39	39	27	24	21

3.3. Öngörme anında izin verilen gerilme değerlerinin tespiti

Optimizasyon için seçilecek olan kiriş tipini belirlemek amacıyla iki aşama gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada öncelikle olarak izin verilen gerilme değerleri aşağıdaki ifadeleri temel almaktadır;

- Açıklık ortasında kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,5L) = (P_i/A_b) - (P_i \times e_p/S_{bt}) + (M_1/S_{bt}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (10)$$

- Açıklık ortasında kiriş altında;

$$\sigma_b(0,5L) = (P_i/A_b) + (P_i \times e_p/S_{bb}) + (M_1/S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (11)$$

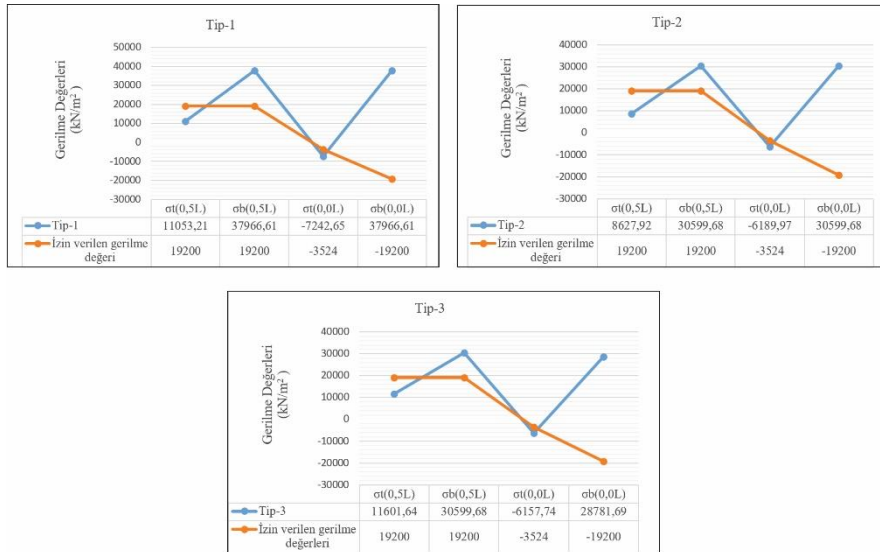
- Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,0L) = (P_i/A_b) - (P_i \times e_p/S_{bt}) \leq 0,623 \times \sqrt{f_{ci}} \quad (12)$$

- Mesnetlenme ekseninde kiriş altında;

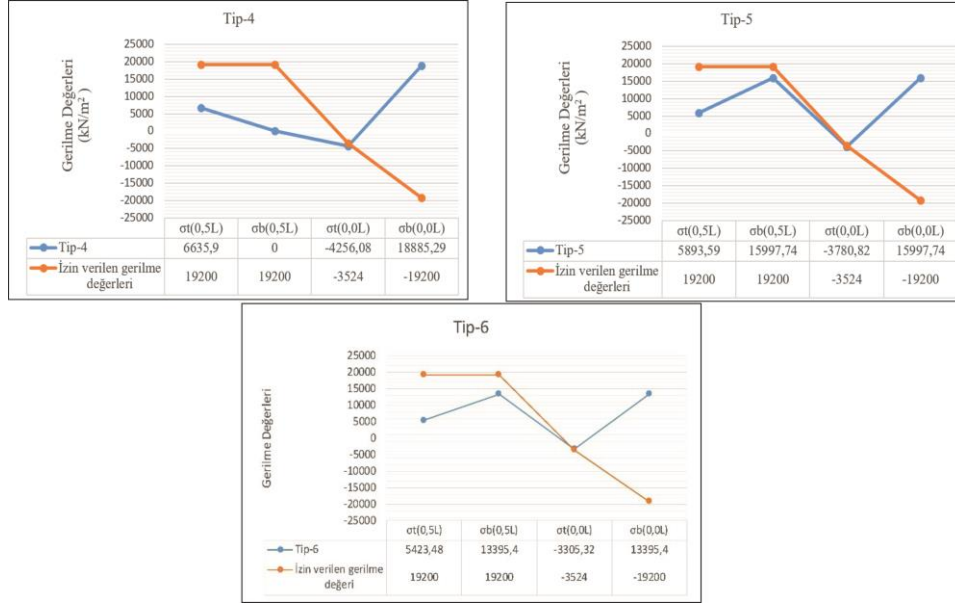
$$\sigma_b(0,0L) = (P_i/A_b) + (P_i \times e_p/S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (13)$$

Tip-1 Tip-2 ve Tip-3 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5’de Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 gerilme değer grafiklerinde görüldüğü gibi kirişlerin açıklık ortasında ve mesnetlenme ekseninde meydana gelen gerilme değerleri, izin verilen gerilme değerlerini aşmıştır. Eğer gerilme değerleri sınırlayıcı değerleri aşar ise, bu bölgelerde kılıflamaya gerek duyulur. Bu durum maliyeti arttırmakta olup, ekonomiden uzak bir tasarım anlamına gelecektir. Bu sebeple bu üç tipin seçilmesinin uygun olmadığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. Tip-1 ve Tip-2 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri

Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 için meydana gelen gerilme değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. Elde edilen bu veriler temel alındığında gerilme değerleri, izin verilen sınır gerilme durumlarını sadece mesnetlenme ekseninde, kiriş üstünde aşmaktadır. Bu durumlar için kılıflama yapmak gerekli olacağı açıktır. Fakat yapılacak olan kılıflama adedi her bir kiriş için meydana gelecek maliyeti değiştirmektedir. Bu çalışmada maliyet hesabı yapılırken, her kiriş için kullanılan toplam beton hacimi, kullanılan toplam öngerme halatı sayısı ve kılıflanması gereken öngerme halat adedi göz önüne alınmıştır. Tüm bu maliyet hesaplarına göre Tip-5 kirişinin seçimi uygun görülmüştür.

**Şekil 6.** Tip-4, Tip-5 ve Tip-6 için elde edilen gerilme değerleri ve izin verilen gerilme değerleri

3.4. Tip-5 kirişinin optimizasyonu

Tip-5 öngerilmeli kirişinin boyut optimizasyonunu gerçekleştirmek açısından, amaç fonksiyonu, kompozit kiriş için minimum alan ifadesi olarak aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\text{Min } Z = \sum_i^n A_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

Sınırlayıcı fonksiyonlar ilk ön germe anındaki beton gerilme sınırlayıcıları, kılıflamadan sonra ilk ön germe anındaki beton gerilme sınırlayıcıları, kılıflamadan sonra kritik kesitlerde ilk germe halinde beton gerilme sınırlayıcıları ve tüm kayıplardan sonra beton gerilmeleri olarak aşağıda ifade edildiği gibi belirlenmiştir.

• Açıklık ortasında kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,5L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) + (M_1 / S_{bt}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (15)$$

• Açıklık ortasında kiriş altında;

$$\sigma_b(0,5L) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) + (M_1 / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (16)$$

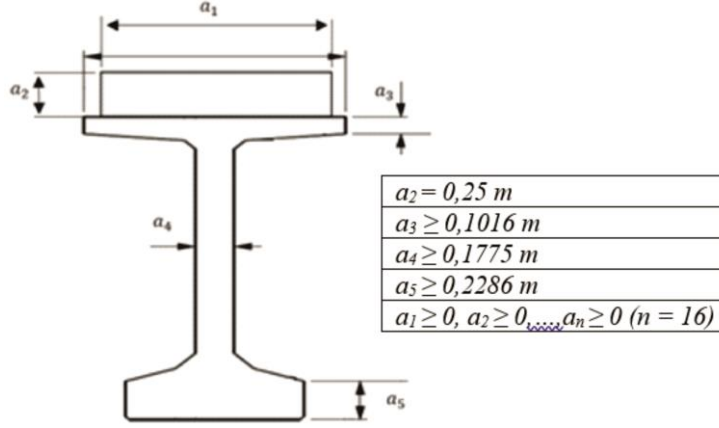
• Mesnetlenme ekseninde kiriş üstünde;

$$\sigma_t(0,0L) = (P_i / A_b) - (P_i \times e_p / S_{bt}) \leq 0,623 \times \sqrt{f_{ci}} \quad (17)$$

•Mesnetlenme ekseninde kiriş altında;

$$\sigma_b (0,OL) = (P_i / A_b) + (P_i \times e_p / S_{bb}) \leq 0,6 \times f_{ci} \quad (18)$$

Kirişlere ait boyut isimlendirmeleri Şekil 6'daki gibi verilmiş olup boyut sınırlayıcıları aşağıdaki gibi ele alınmıştır. Bu durumda kompozit kirişte tabliye boyutları ve boyut değerleri negatif olamayacağı için kirişin tüm boyut ölçüleri aşağıda belirtildiği gibi pozitif sınırlamaya tabi tutulmuştur.



Şekil 7. Kiriş boyut isimlendirmeleri

Seçilen Tip-5 kirişinin boyut optimizasyonu yapılırken doğrusal programlama yönteminin karmaşık matematiksel yapısını daha kolay çözmek amacıyla Microsoft Excel'in Solver makrosu kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları ve sınırlayıcıların kolayca kontrol edilme özelliğine sahip olan Solver makrosuna gerekli parametreler tanımlanarak çözüme ulaşılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda boyutlar gerekli gerilme sınırlayıcılarını aşmadan, minimize edilerek ekonomik boyutlar elde edilmiştir. Tip-5 kirişine ait optimize edilmiş mukavemet özellikleri Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Tasarımda kullanılan mevcut kiriş, Tip-5 kirişi ve optimize edilmiş kiriş mukavemet değerlerinin karşılaştırılması

	Mevcut Kiriş Değerleri	Tasarım Değerleri	Optimize Edilmiş Değerler	Birim
A_b	0,793739	0,631773	0,618294	m^2
Y_{bb}	0,902493	0,850777	0,828607	m
Y_{bt}	0,897507	0,952623	0,926201	m
I_{xb}	0,327939	0,280654	0,259422	m^4
X_{bb}	0,600000	0,596900	0,589430	m
I_{yb}	0,035526	0,028683	0,027630	m^4
S_{bb}	0,363370	0,329879	0,313082	m^3
S_{bt}	0,365389	0,294611	0,280093	m^3

4.Sonuç

Bu çalışmada Maden Viyadüğü'nde kullanılan kirişlerin yerine, boyutları daha ekonomik olarak seçilebilen kirişlerin kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır ve bu konu için özel bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaya göre hareketli ve sabit yükler altında, belirli kesitteki tip kirişlerin seçimi yapılmıştır. Kiriş tip seçimi yapılırken, kirişlerin geometrik ve mukavemet özellikleri, kirişlere etkiyen hareketli-sabit yük parametreleri ve halat sayıları ile servis aşamasındaki izin verilen gerilme değerleri dikkate alınmıştır.

Doğrusal programlama yönteminin kiriş boyut optimizasyonunda kullanılabilmesi görülmüştür. Burada optimizasyon için en elverişli kesitin Tip-5 olduğu sonucu çıkmaktadır (Tip-4 kirişi 'de ona oldukça yakındır.). Bu, bir anlamda optimizasyon tekniğini de doğrulaması bakımından ilginçtir. Doğrusal programlama ile yapılan

boyut optimizasyonu sonucunda Tip-5 kirişinin boyutları optimize edilmiştir. Seçimi yapılan optimize edilmiş Tip-5 kirişi ile viyadükte kullanılan kiriş boyutlarında en belirgin farklılığın gövde kalınlığında meydana geldiği görülmüştür. Elde edilen verilere göre gerilme ve boyut sınırlayıcıları kullanılarak aynı hareketli yükler ve hesap açıklığına sahip önerilmeli bir köprü kirişinin ekonomik bir şekilde tasarlanabileceği görülmüş olup pratik uygulamalarda hem kiriş seçiminde hem de boyut tespitinde optimum tasarımın kullanılabileceği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Cohn MZ, Lounis Z. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems. Journal of Structural Engineering. 1994;120(9):2653-74.
- [2] Ahsan R, Rana S, Ghani SN. Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm. Journal of Structural Engineering. 2012;138(2):273-84.
- [3] Seçme NY. Klasik Doğrusal Programlama ve Bulanık Doğrusal Programlamanın Karşılaştırmalı Bir Analizi: Üretim Planlama Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri, 2005.
- [4] Öztürk A. Yöneylem Araştırması, 10. Basım, Ankara: Ekin Kitapevi, Eylül 2005.
- [5] Turalı M ve Köse A. Doğrusal Hedef Programlama Yöntemi İle Türkiye'deki Sigorta Şirketlerinin Performans Değerlendirmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Dergisi 2005; 7: 19-39.
- [6] Charnes A ve Chooper WW. Management Models and Industrial Application of Linear Programming Vol. 1. New York: John Wiley and Sons, 1967.
- [7] Metin S ve Türkoğlu İ. Doğrusal Programlama Yöntemleri Kullanılarak Küçük İşletmelerdeki Kar Paylarının Artırılması: Mert Cam Örneği. Munzur Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, ISSN: 2636-7815, 2018; 6(12) : 107-118.
- [8] Winston, Wayne L. Operations Research: Application and Algorithms Third Edition. California: International Thomson Publishing, 1994.
- [9] Chen M, Wang W. A Linear Programming for Integrated Steel Production and Distribution Planning. International Journal of Operations & Production Management 1997;17(6): 592-610.
- [10] Ergülen A, Gürbüz E. İnşaat ve Enerji Sektöründe Beton Direk Üretimi Planlamasına Örnek Bir Model Önerisi. Tam Sayılı Doğrusal Programlama. Yönetim ve Ekonomi Dergisi 2006; 13(1): 1-15.
- [11] KGM, 2014, Maden Viyadüğü Hesap Raporu Km: 73+500.00-75+700.00, Dosya No:1710, 113p
- [12] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, "Standart Specifications for Highway Bridges", 17, 2002.
- [13] Özgüven C. Doğrusal Programlama Ve Uzantıları. Ankara: Detay Yayıncılık, 2003.
- [14] Taha HA. Yöneylem Araştırması, (Çev: Ş. Alp Baray, Ş. Esnaf). İstanbul: Literatür Yayıncılık, 2000.
- [15] Alan MA. ve Yeşilyurt, C. Doğrusal Programlama Problemleri'nin Excel İle Çözümü. C.Ü. İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi, 2012, 5(1): 151-162.
- [16] Eker BNK. Maden Viyadüğü'nün Öngerilmeli Prekast ve Kompozit T kesitli Köprü Kirişlerinin Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Frat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2018.