



YÜK VAGONU BOJİSİ TASARIMINDA ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİKLERİ İLE MALZEME SEÇİMİ

M. Hüseyin ÇETİN*, Gülüstan Tuğçe ALVALI

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
Y25 Boji, ANSYS, TOPSIS, VIKOR.	Demiryolu araçlarının mekanik mühendisliği açısından en kritik parçası bojidir. Boji, masif yüklere maruz demiryolu araçlarının hareket, yük taşıma ve sönümleme işlemlerini yerine getirir. Kaynaklı çelik konstrüksiyondan imal edilen bojilerde yapı malzemesi olarak karbonlu çelik malzemeler tercih edilmektedir. Bu çalışmada, boji malzemesi için S235, S275 ve S355 malzemeler dikkate alınarak en uygun karbonlu çelik alaşımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Malzeme seçiminde; emniyet katsayısı maksimizasyonu, birim fiyat minimizasyonu ve kaynak edilebilirlik maksimizasyonu hedef fonksiyonlar olarak dikkate alınarak optimizasyon problemi modellenmiştir. Modelin çözümü için çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar birinci derecede en uygun malzemenin S355 çeliği, ikinci derecede en uygun malzemenin ise S275 çeliği olduğunu göstermektedir. Ayrıca S355-S275 kombinasyonu ile gerçekleştirilecek konstrüksiyonun çok daha iyi sonuçlar vereceği belirlenmiştir.

MATERIAL SELECTION USING MULTI CRITERIA DECISION MAKING METHODS IN THE DESIGN OF FREIGHT WAGON BOGIE

Keywords	Abstract
Y25 Bogie, ANSYS, TOPSIS, VIKOR.	In terms of mechanical engineering, the most critical part of rolling stocks is bogies. Bogies perform the processes of movement, freightage and damping of rolling stocks exposed to massive freight. Carbon steel materials are preferred as the construction material of bogies when they are produced by welded steel construction. In this study, it is aimed to determine the most suitable carbon steel alloy for the material of bogies taking into consideration S235, S275 and S355 materials. Optimization problem has been modelled in material selection by considering the target functions as maximisation of safety factor, minimisation of unit price and maximisation of weldability. Algorithms of TOPSIS and VIKOR, which are multi-criteria decision-making models, have been used for the solution of model. According to the results, it is seen that the most suitable material is primarily steel of S355 and secondarily steel of S275. Furthermore, it is determined that constructions with the combination of S355 and S275 will enable much better results.

Alıntı / Cite

Çetin, M. H., Alvalı, G. T., (2020). Yük Vagonu Bojisi Tasarımında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Malzeme Seçimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(1), 91-104.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
M. H. Çetin, 0000-0003-0429-5507	Başvuru Tarihi / Submission Date
G. T. Alvalı, 0000-0003-0315-506X	Revizyon Tarihi / Revision Date
	Kabul Tarihi / Accepted Date
	Yayın Tarihi / Published Date

* İlgili yazar / Corresponding author: hçetin@karabuk.edu.tr, +90-551-905-4354

1. Giriş (Introduction)

Demiryolu taşımacılığı diğer taşımacılık sistemlerine göre güvenli, düşük maliyetli ve çevrecidir. Ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ile demiryolu kullanımı arasında pozitif yönde ve güçlü bir korelasyon bulunmaktadır. ABD 293.564 kilometre (km) demiryolu hat uzunluğu ile en uzun demiryolu hattına sahip iken, Çin 127.000 km ile ikinci sıradadır. Ülkemizde ise anahat uzunluğu 12.008 km olup, hat uzunluğu bakımından dünyada 20. sırada yer almaktadır. Yatırım politikaları neticesinde 2023 yılına kadar ulaşımaya ayrılan 300 milyar euroluk yatırımın, 50 milyar euroluk kısmının demiryolu hatlarına tahsis edilmesi planlanmaktadır (Pektaş, 2017).

Demiryolu araçlarını oluşturan ve vagon ile tekerlek arasında bağlantıyı sağlayan parçaya boji denir. Bojinin görevi, vagon hareketini sağlamak ve vagonun aktarılan yükleri taşımaktır. Taşıtın güvenliği ve konforu kullanılan bojiye bağlıdır. Boji üzerinde konforu ve güveni sağlamak üzere birçok yardımcı makine elemanı bulunur. Bojinin güvenliğini etkileyen birincil unsur taşıdığı yük miktarı, ikincil unsur ise yol kalitesi ve yol geometrisidir. Dünyada genel olarak yolcu vagonlarında Y32 bojisi, yük vagonlarında ise Y25 bojisi kullanılmaktadır. Yük vagon bojileri, daha fazla yük ve daha engebeli arazilerde gidebildikleri için yolcu vagon bojilerine göre daha kritik yapıdadırlar.

Bojilerin konstrüktif açıdan iyileştirilmeleri sadece geometriye ve yükleme koşullarına değil farklı malzeme kullanımına da bağlıdır. Boji üretiminde ağırlıklı olarak düşük ve orta karbonlu genel makine imalatı çelikleri kullanılmaktadır (S235, S275, S355). Seçilen malzemenin kimyasal özellikleri emniyet katsayısını, kaynak edilebilirliği, kaynak işçiliğini ve malzemenin işlenebilirliğini etkilemektedir. Ayrıca boji imalatında tek bir malzeme yerine farklı özelliklerde çelik alaşımlarının kombinasyonları da tercih edilebilmektedir. Farklı malzeme kombinasyonu ile imal edilen bojilerin üretimi, tek malzeme ile üretilen bojilere göre daha zor ve maliyetlidir. Bu durum boji tasarımı aşamasında ideal imalat malzemesinin seçilmesi aşamasını çok kriterli bir optimizasyon problemi haline getirmektedir. Optimizasyon yaklaşımında en uygun malzemenin belirlenmesi, maksimum güvenliğin, maksimum kaynak edilebilirliğin, maksimum işlenebilirliğinin sağlanması ile mümkün olurken, minimum işçilik saati ve minimum malzeme maliyeti de diğer belirleyici unsurlar olacaktır.

Bu çalışmada, Y25 bojisinin üretiminde en uygun malzemenin belirlenebilmesi için emniyet katsayısı, kaynak edilebilirlik ve birim fiyat parametreleri dikkate alınarak çok kriterli bir optimizasyon problemi analiz edilmiştir. Literatürdeki mevcut çalışmalarda bojinin mekanik emniyeti ile diğer üretim parametrelerinin birlikte değerlendirildiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. 3 farklı çelik alaşımının (S235, S275, S355) araştırıldığı çalışmada, emniyet katsayısı hesabında statik analiz sonuçları, kaynak edilebilirlik için de malzemelerin kimyasal içeriğine bağlı olarak hesaplanan karbon eşdeğeri parametresi dikkate alınmıştır. Diğer bir kriter olan malzeme maliyeti için de ilgili malzemelerin birim satış fiyatları dikkate alınmıştır. Problemin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR Metotları kullanılmıştır.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Bojilerin bilgisayar destekli statik ve dinamik analizleri üzerine hem üreticiler hem de araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Üreticiler tarafından yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak sistem emniyetinin belirlenmesi, araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ise konstrüktif iyileştirmeler üzerinedir. Özsoy tarafından yapılan çalışmada bojiye etki eden kuvvetler ve boji statik kuvvetleri belirlenmiştir. Analizi yapılan bojinin gerilme değerlerinin, kullanılan malzemenin akma değeri sınırları altında kaldığı görülmüştür (Özsoy,2008). Kima ve Yonaa kompozit bir boji şasisinin yapısal güvenliğini, statik test ve sonlu eleman analizi kullanılarak değerlendirmişlerdir. Goodman diyagramı kullanılarak yapılan yapısal güvenlik analizine göre, kompozit boji çerçevesinin sürekli mukavemet açısından güvenli bölge içinde olduğu görülmüştür (Kima ve Yonaa, 2011). Bayraktar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Y32 yolcu vagonu bojisinin statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. 114.001 N dik yönde ve 96.471 N yatay yönde kuvvet uygulanarak bojinin statik analizi gerçekleştirilmiştir. Statik analiz sonucu bojide 105 MPa lık gerilme meydana gelmiştir. Dinamik analizde ise 22 doğal frekans belirlenmiştir. Dinamik analiz sonucu meydana gelen 51,7930 Hz'lik frekans ile daha önce Yaho-hui tarafından yapılan çalışma sonucu bulunan bulguların benzer olduğu görülmüştür (Yaho-hui, 2009). Statik ve dinamik analizler neticesinde Y32 bojisinin güvenli olduğu gözlemlenmiştir (Bayraktar vd., 2013). Uygun tarafından yapılan çalışmada ise elektrikli bir bojinin şasisine gelen yükler dört farklı durum için hesaplanmış ve Ansys programında statik analiz yapılmıştır. Çıkan sonuçlarda bojide meydana gelen gerilmenin, kullanılan malzemenin akma değeri altında olduğu görülmüştür (Uygun, 2017).

Literatürdeki çalışmalarda, farklı bojilerin statik ve dinamik analizleri yapılmış ve bojilerin maruz kaldığı yükler altındaki gerilme durumları incelenmiştir. Gerilmenin büyüklüğü şasisinin emniyetini belirlemek için kullanılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar neticesinde bojilerin emniyet katsayıları belirlenmiş ve güvenlik kriterleri incelenmiştir. Genel olarak bojilerin güvenli olduğu ortaya çıkmış ve iyileştirilmesi gereken ekipmanlar belirlenmiştir. Mevcut

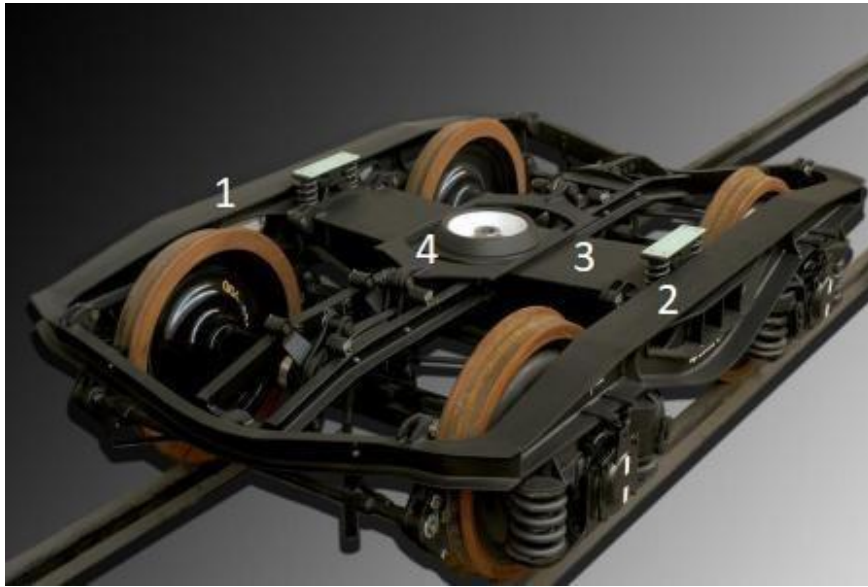
çalışmada literatürden farklı olarak üç farklı çelik alaşımının boji malzemesi olarak kullanılabilirliği, imalat ve maliyet faktörleri de dikkate alınarak analiz edilmiştir. Malzeme seçiminde sadece emniyet katsayısını dikkate almanın yeterli olmayacağı düşünülmüş, sürdürülebilir üretim için imal edilebilirlik ve optimum maliyet unsurlarının da analiz edilebilmesi için çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak problem modellenmiştir. Çalışma, mekanik bilimine ilişkin emniyet katsayısı parametresi, malzeme bilimine ilişkin karbon eşdeğeri parametresi ve ekonomik imalat için birim malzeme maliyeti verisini birlikte analiz edebilmesi itibarıyla literatüre önemli oranda katkı sağlayabilecektir. Ayrıca çalışma, araç teknolojileri için malzeme seçimi problemine referans olabilecek niteliktedir.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Boji konstrüksiyonunda ana unsurlar dayanım, işlenebilirlik, kaynak edilebilirliktir. Dayanım aşaması ise kendi içinde; emniyet koşullarını sağlayan malzemelerin seçimi, temin edilebilirlik ve maliyet unsurlarını barındırmaktadır. Bu unsurlardan emniyet koşulu, malzeme maliyeti ve kaynak edilebilirlik parametreleri çalışma kapsamında dikkate alınmıştır. Emniyet koşulu analizi adımları; konstrüksiyonun modellenmesi, kuvvetlerin belirlenmesi, analiz şartlarının belirlenmesi ve analizin gerçekleştirilmesi şeklindedir. Kaynak edilebilirliğin analizi aşamasında, elemental analiz değerlerine göre hesaplanan karbon eşdeğeri parametresine göre derecelendirilme yapılmıştır. Malzeme maliyeti için de firmalardan alınan satış fiyatlarının ortalama değerleri dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.

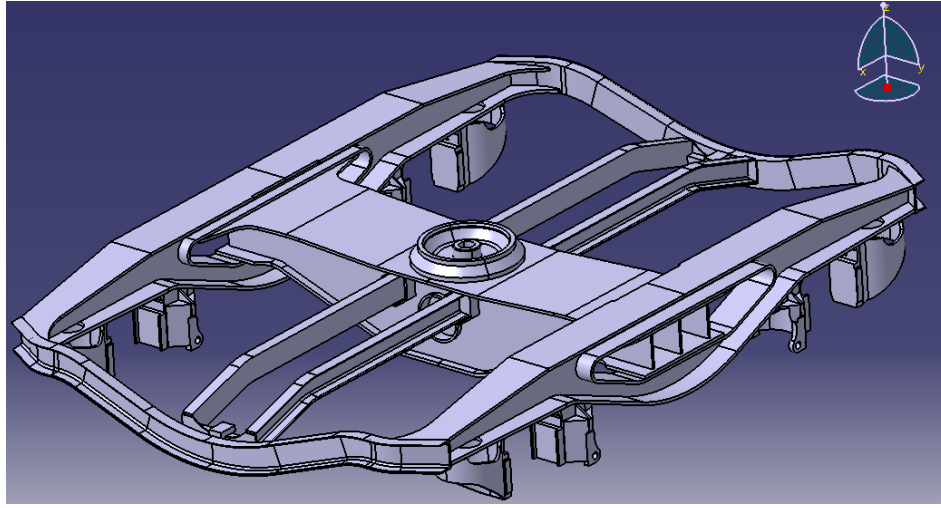
3.1. Boji Dayanımı İçin Statik Kuvvetlerin Belirlenmesi ve Sonlu Elemanlar Analizi (Determination of Static Forces and Finite Element Analysis for Bogie Strength)

Ağır yük vagonu olarak kullanılan Y25 bojisi Avrupa Demiryolu Standartlarına (UIC) uygun olarak üretilmektedir (Şekil 1). Basit kullanımı ve kullanım esnasındaki uyumu sayesinde demiryolu yük taşımacılığı yapan firmalar tarafından yüksek oranda tercih edilmektedir. Y25 yük vagon bojisi, 22,5 ton dingil basınçlı ve 120 km/h hızlara kadar tüm yük vagonu tiplerine uyumlu olarak üretilmektedir. Bojinin ağırlığı ise yaklaşık olarak 5 tondur (URL1). Yük vagon bojisi, kurplarda daha rahat hareket edebilmesi için üç ana parçadan konstrükte edilmiştir. Y25 bojisi temel olarak iki ana taşıyıcı kiriş (1,2) ve pivotun (4) yatağı olan bolsterden (3) oluşmaktadır. Boji, vagon gövdesine pivottan (4) bağlanmaktadır (Vladimir, 2014.).



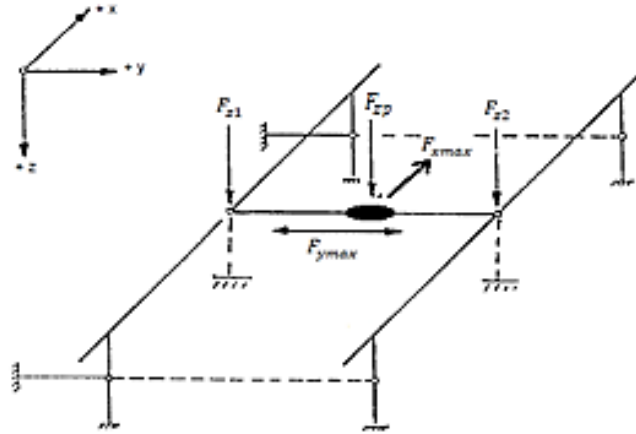
Şekil 1. Y25 Boji modeli (URL2) (Model of Y25 bogie)

Y25 bojisi, statik analiz için ilk olarak bilgisayar ortamında 3 boyutlu olarak modellenmiştir (Şekil 2). Statik analiz yapılabilmesi için uygulanacak kuvvetler TS EN 13749 "Demiryolu Uygulamaları- Tekerlek Takımları ve Bojiler-Boji Şasilerinin Yapısal Şartlarını Belirleme Metotları" standardında belirtilmiştir (TS EN 13749). Standartta yük vagon bojileri "Examples Of Loads For Freight Bogies With A Central Pivot And Two Side Bearers - Category B-V" kategorisinde yer almaktadır.



Şekil 2. Tasarlanan Y25 boji şasisi (Designed Y25 bogie chassis)

Statik analiz için uygulanacak kuvvetler Şekil 3'deki gibi etki etmektedir.



Şekil 3. Boji şasisine etki eden kuvvetler (TS EN 13749) (Forces acting on the bogie frame)

Şekil 3'te, F_z bojiye dik gelen kuvveti, F_{zp} pivot için uygulanan dikey yükü, m^+ boji toplam ağırlığını ve M ise toplam vagon yükünü temsil etmektedir. Statik analiz yapılırken en büyük vagon olan Gabs vagonu seçilmiştir. Vagonun darası 28,5 ton ve maksimum yükleme kapasitesi 61,5 tondur (URL3).

Bojiye dik olarak etki eden kuvvet Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$F_z = ((M/2) - m^+) \cdot g \quad (1)$$

Dik kuvvet yalnızca pivota uygulandığında oluşacak kuvvet Eşitlik 2'de belirtilmiştir. Eşitlik 2'de yük çarpanı 2 olarak hesaba katılmıştır.

$$F_{zp} = 2 \cdot F_z \quad (2)$$

Dik kuvvetler hem taşıyıcıya hem de pivota uygulandığında oluşacak kuvvet ise Eşitlik 3 (yük çarpanı 1,5) ile hesaplanmaktadır. α ifadesi salınım katsayısı olup genel olarak 0,1 olarak alınır.

$$F_{z1} = F_{z2} = 1,5 \cdot F_z \cdot \alpha \quad (3)$$

$$F_{zp} = 1,5 \cdot F_z \cdot (1 - \alpha) \quad (4)$$

Bojiye yatay yönde etki eden kuvvet hesabı ise Eşitlik 5'teki gibidir. F_{ytrmin} , yüksüz parçanın çarpaz kuvvet direnci olarak tanımlanır ve 10^4 olarak hesaba katılır.

$$F_{y1} = F_{y2} = \frac{F_{ymax}}{2} = F_{ytrmin} + \frac{F_z + (m^+ \cdot g)}{6} \quad (5)$$

Son olarak ise, her bir tekerleğe ve şasi kısmına karşılıklı, ters kuvvetler olarak uygulanan kuvvet hesabı yapılır.

$$F_{x\max} = 0,1 \cdot (F_z + m^+ \cdot g) \quad (6)$$

Eşitlik 2-5'te verilen katsayılar, bojiye etkiyen kuvvetlerin belirlenmesi amacıyla kullanılan TS EN 13749 standardına göre belirlenmiştir. Boji konstrüksiyonu kompleks bir geometriye sahip olup çok sayıda kaynaklı ve cıvatalı bağlantı noktası bulunmaktadır. Bu sebeple boji üzerindeki kuvvet akışının doğru bir şekilde belirlenmesi güçtür. Bu durum dikkate alınarak kuvvetlerin belirlenmesi aşamasında nominal değerler dikkate alınmış ve standartlarda tanımlanmıştır. Literatürde de benzer değerlerin kullanıldığı belirlenmiştir (Özsoy,2008, Bayraktar vd., 2013, Uygun, 2017).

TS EN 13749 ve UIC 515-4 standartlarına göre statik durumda bojiye etki eden kuvvetler hesaplanmıştır (Tablo 1). Standartlarda, yük vagon bojilerinin yedi farklı yükleme durumu için statik analiz kuvvetleri belirtilmiştir. Bu çalışmada, dikkate alınan yük koşulları için (5 ton boji ve 61,5 ton yük) emniyetli tasarım şartını sağlayan *sağ tarafa eğimli kurp durumu* göz önünde bulundurulmuştur (Tablo 2).

Tablo 1. Bojiye etki eden kuvvetler (Forces acting on bogie)

Kuvvetler	Hesaplanan Değerler (kN)	Uygulanan Eşitlikler
F_z	392,40	(1)
1.Durum F_{zp}	784,80	(2)
2.Durum F_{zp}	529,74	(3)
F_{z1}	58,860	(4)
F_{z2}	58,860	(4)
F_{y1}	83,575	(5)
F_{y2}	83,575	(5)
F_x	44,145	(6)

Tablo 2. Bojiye etki eden statik kuvvetler (TS EN 13749) (Static forces affecting the bogie)

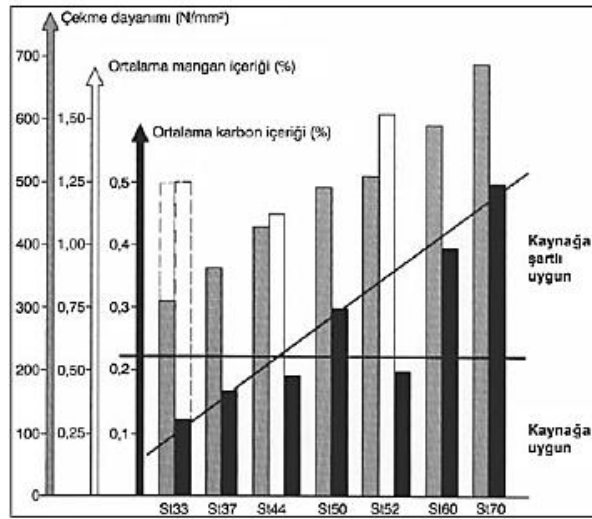
Yan Yüzeye Etki Eden Kuvvet 1	Pivota Gelen Kuvvet (F_{zp})	Yan Yüzeye Etki Eden Kuvvet 2	Enine Kuvvet (F_y)
$\alpha(1-\beta) F_z$	$(1-\alpha)(1-\beta) F_z$	0	$-F_y$

Belirlenen kuvvetlere göre gerçekleştirilen statik analizler sonucunda bojinin emniyet katsayıları belirlenmiştir. Statik analiz için Ansys-Workbench ticari sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Gerilme değerleri maksimum eşdeğer gerilme (von-Misses) hipotezine göre belirlenmiştir. Analizin güvenilirliğini arttırabilmek için yoğun ağ örgüsü tercih edilmiştir (47344 eleman için 100788 ağ örgü noktası). Seçilen üç malzeme ve tek yükleme durumu için ayrı ayrı analizler gerçekleştirilmiştir. Maksimum ve minimum olmak üzere her malzeme için iki farklı emniyet katsayısı belirlenmiştir. Minimum emniyet katsayısı bojinin kritik olduğu bölgeleri temsil etmektedir.

3.2. Boji İçin Seçilen Malzemelerin Kaynak Edilebilirliği ve Maliyet Faktörü (Weldability of Materials Selected for Bogie and Cost Factor)

Üretimde rol sahibi olan ikinci unsurumuz ise seçilen malzemelerin kaynaklanabilirliğidir. Yapı çeliklerinin kaynaklanma kabiliyetleri pareto grafiği ile gösterilmiştir (Şekil 4) (Piroğlu vd., 2012). Çeliklerde karbon miktarı % 0,2 nin üzerinde olduğu zaman ön tavlama işlemi gerektirmektedir. Bu sebepten dolayı karbon miktarı %0,2'nin üzerinde olan çeliklerin kaynak kabiliyetleri düşüktür. Çeliklerde elemental olarak nikel, molibden, vanadyum vb. elementlerde bulunmakta ve çeliğin kaynak kabiliyetini etkilemektedir. Karbon ve diğer elementlerin, çeliklerin kaynak kabiliyeti üzerindeki etkileşimlerinin analizi için karbon eşdeğeri adında ampirik bir bağıntı geliştirilmiştir (Eşitlik 7). Seçilen üç farklı malzemenin elemental analizleri Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca element miktarlarına göre Eşitlik 7 dikkate alınarak hesaplanan karbon eşdeğeri miktarları da Tablo 3'te verilmiştir (URL4). Karbon eşdeğerliğinin yüksek olması kaynak kabiliyetini düşürmektedir. Bu sebeple karbon eşdeğeri parametresinde minimizasyon hedefi dikkate alınmıştır.

$$\%C_{es} = \%C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (7)$$



Şekil 4. Yapı çeliklerinin kaynağa uygunluğu (Piroğlu vd., 2012) (The convenience of structural steels for welding)

Tablo 3. Malzemelerin kimyasal özellikleri ve karbon eşdeğer miktarları (URL4) (Chemical properties and carbon equivalents of materials)

	%C	% Si	% Mn	% P	% S	% N	% Cu	C _{es}
S235	0,17	-	1,40	0,035	0,045	0,012	0,60	0,48
S275	0,21	-	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	0,50
S355	0,24	0,55	1,60	0,025	0,017	0,012	0,55	0,54

Son unsur olan malzeme birim fiyatları ise firmalardan temin edilmiş olup Tablo 4'te Türk Lirası cinsinden gösterilmiştir.

Tablo 4. Birim fiyatlar (Unit prices)

Çelik	Malzeme Birim Fiyatı (₺)
S235	2650
S275	2740
S355	2750

3 farklı çelik alaşımı (S235, S275, S355) için belirlenen kriterler çok kriterli bir problem oluşturmuştur. Problemin çözümünde çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan TOPSIS ve VIKOR Metotları kullanılmıştır.

4. TOPSIS Metodu (TOPSIS Method)

TOPSIS yöntemi, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biridir. Prensip, optimum ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözümden en uzak olan noktanın belirlenmesidir (Ünal ve Maleki, 2018). TOPSIS yöntemi, kompleks karar problemlerinde önemli bir değerlendirme yöntemi haline gelmiştir. Kullanımı hem akademik hem de işletme alanlarında çok geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. TOPSIS yöntemi beş adımdan oluşmaktadır. TOPSIS yöntemi aşağıda belirtilen adımlarla matematiksel olarak özetlenmiştir (Khorshidi ve Hassani, 2013).

1. Matris Eşitlik 8'e göre normalize edilmiştir.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (8)$$

2. Normalleştirilmiş karar matris elemanları, eşitliklerle elde edilen ilgili ağırlıklar ile çarpılır ve ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 9 tarafından oluşturulur;

$$V_{ij} = n_{ij}w_j \quad j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (9)$$

3. İdeal çözümler Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 ile hesaplanır.

$$\{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \{(\text{Max} V_{ij} | j \in K), ((\text{Min} V_{ij} | j \in K')) | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

$$\{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \{(\text{Max} V_{ij} | j \in K), ((\text{Min} V_{ij} | j \in K')) | i = 1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

K, fayda ölçütlerinin indeks kümesidir ve K' negatif kriterler içindir.

4. Optimum ideal (Eşitlik 12) ve negatif ideal (Eşitlik 13) değerler aşağıda verilmiştir.

$$S_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{0.5} j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (12)$$

$$S_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{0.5} j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (13)$$

5. İdeal çözüm için yakınlık, Eşitlik 14 ile değerlendirilir;

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, 3, \dots, m; 0 < C_i < 1 \quad (14)$$

En yüksek C_i değeri, TOPSIS Yöntemi için en ideal parametredir.

5. VIKOR Metodu (VIKOR Method)

VIKOR metodu, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden bir diğeridir. VIKOR yöntemi çoğunluk için maksimum fayda ve minimum zarar sağlayan, ideale yakın uzlaşmacı bir çözüm belirler. Son yıllarda VIKOR yöntemi çok kriterli ve alternatifli problemlerin çözümünde yoğun kullanım alanı olan bir destek aracı haline gelmiştir (URL5). VIKOR yöntemi aşağıdaki gibi matematiksel olarak özetlenmiştir (Khorshidi ve Hassani, 2013, URL5);

1. En yüksek $(x_{ij})_{\max}$ ve en düşük $(x_{ij})_{\min}$ parametrelerinin öncelikle karar matrisinden belirlenen tüm kriterler arasında belirlenmesi gerekir.
2. E_i ve F_i parametreleri Eşitlik 15-16'ya göre hesaplanır.

$$E_i = \sum_{j=1}^n w_j \left[\frac{[w_i[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})]/[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}]}{1} \right] \quad (15)$$

$$F_i = \max \left[\frac{[w_i[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})]/[(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}]}{1} \right] \quad (16)$$

3. Q_i değeri Eşitlik 17'ye göre hesaplanır.

$$Q_i = (v(E_i - E_{i_{\min}})/(E_{i_{\max}} - E_{i_{\min}})) + (1 - v)((F_i - F_{i_{\min}})/(F_{i_{\max}} - F_{i_{\min}})) \quad (17)$$

v değişkeni grup faydası olarak adlandırılır ve yaklaşık olarak 0,5 olarak alınır. E_i , F_i ve Q_i değerleri istatistiki ağırlık katsayısı değerleridir.

4. E_i , F_i ve Q_i değerleri küçükten büyüğe sıralanır.
5. Kabul edilebilir (C_1) ve kabul edilebilir istikrar (C_2) kümeleri belirlenir.

Herhangi bir alternatifi C_1 kümesinde yer alabilmesi için Eşitlik 18'de gösterilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ \quad (18)$$

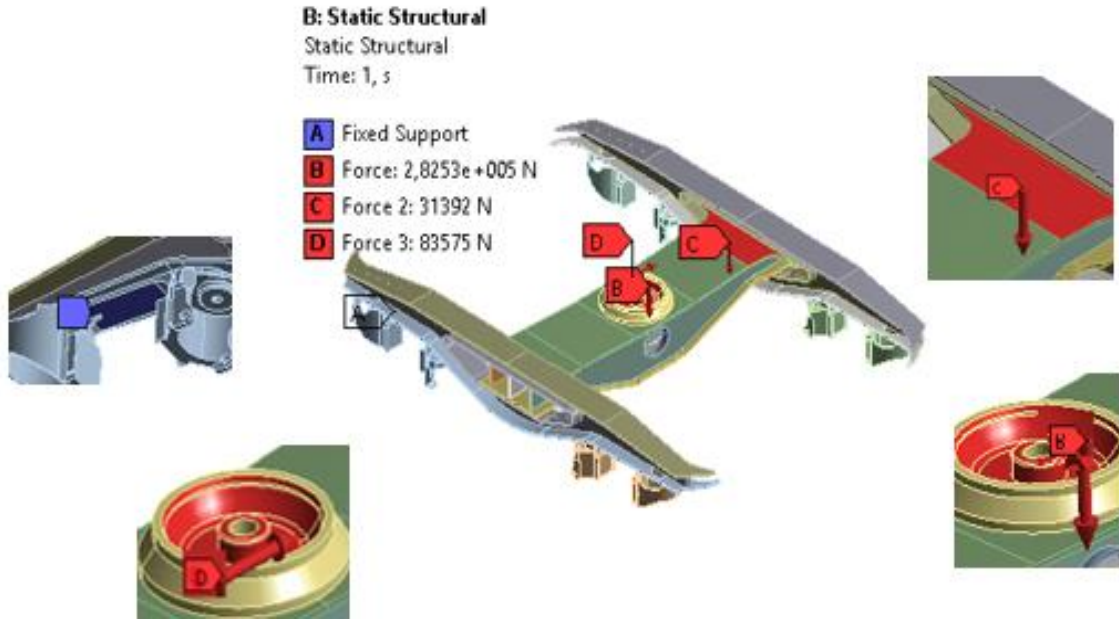
DQ değeri; m alternatif sayısı olmak üzere $(1/(1-m))$ ile hesaplanmaktadır. Q_j sıralamasına göre A_2 alternatifi A_1 alternatifinden sonraki sırada yer alıyorsa A_1 karar noktası C_1 grubunda yer alır. C_2 kümesi ise E_i , F_i ve Q_i sıralamalarının tamamında aynı sırada yer alan alternatiflerden oluşmaktadır. Diğer yaklaşımların aksine küçük Q_i değeri en iyi sonucu vermektedir.

6. Bulgular ve Tartışma (Findings and Discussion)

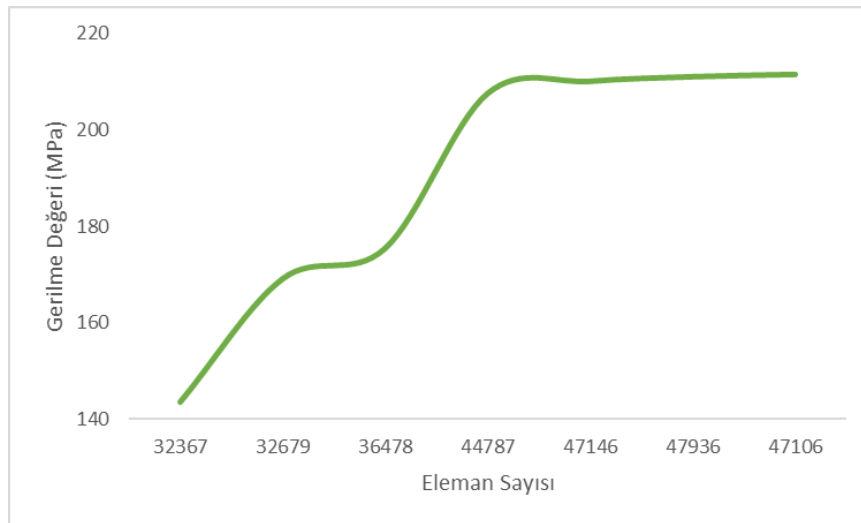
Çok kriterli karar verme uygulamalarında birinci adım karar parametrelerinin ağırlıklarının belirlenmesidir. Bu aşama ilgili parametrenin ne oranda önemli olduğunu göstermektedir. Toplam 100 üzerinden yapılan ağırlıklandırma, 100 puanlık katsayı önem büyüklüğüne göre parametrelere dağıtılmaktadır. Mevcut çalışmada emniyet katsayısı için %60 (0,60), birim fiyat için %15 (0,15) ve kaynak edilebilirlik parametresi için de %25 (0,25) ağırlık oranı belirlenmiştir. Emniyet katsayısı boji tasarımında %60 ağırlıkla en önemli parametre olarak dikkate alınmıştır. Bojinin temel görevi vagonu ve vagona uygulanan yükleri emniyetli bir şekilde sonsuz ömür verecek şekilde taşımaktır. Bu sebeple bojinin varlık sebebini gerçekleştirebilmesi güvenilirlik değerine bağlıdır. Güvenirliği düşük olan bir boji hem yük-yolcu hem de seyir emniyeti açısından riskli duruma düşecektir. Raylı sistem araçlarında araç maliyeti, taşınan yük maliyeti, olası kazalar sebebiyle oluşan maliyetler düşünüldüğünde boji emniyetinin (mukavemetinin) en temel karar kriteri olduğu görülmektedir.

Boji imalatında çok sayıda metalik parça kaynaklı yöntemle birleştirilmektedir. Parça birleştirme işlemlerinin başarısı mekanik sistemin başarısının temel unsurlarındandır. Kaynak işleminin başarısını da birleştirilen malzemelerin kaynak edilebilirliği belirlemektedir. Bu sebeple bojinin varlık sebebini istenilen koşullarda gerçekleştirebilmesi, güvenilirlik katsayısının yüksekliğinden sonra, boji parçalarının iyi kaynak edilmiş olmasına bağlıdır. Çalışma kapsamında kaynak edilebilirlik için %25 ağırlık ile 2. sırada önem katsayısı belirlenmiştir. 3. sırada önemli olarak da %15 ile birim fiyat yani malzeme maliyeti unsuru dikkate alınmıştır. Ekonomiklik, mühendislik tasarımları için emniyet göz ardı edilmeden göz önünde bulundurulması gereken unsurlardan bir tanesidir. Tasarımın çok daha ekonomik olması için emniyet unsurları yetersiz bırakılırsa, uzun veya kısa vadede telafisi zor ve maliyetli (kazalar, sık arıza verme, engellenemeyen titreşim vb.) durumlarla karşılaşılabilir. Bu sebeple mevcut çalışma kapsamında ekonomiklik dikkate alınmış fakat etki oranı düşük belirlenmiştir.

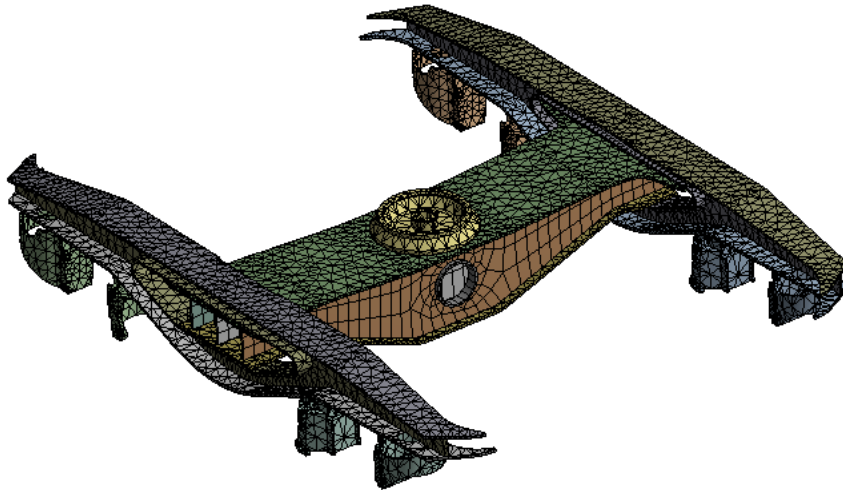
Boji tasarımı ve analizinde, gerilme dağılımı ve bojinin emniyet katsayısı önemlidir. Emniyet katsayısının hesabı için Y25 bojisinde meydana gelen gerilme dağılımlarının belirlenmesi gerekmektedir. Tasarımı yapılan Y25 boji statik analizin gerçekleştirilmesi için ANSYS Sonlu Elemanlar Programına aktarılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri Ansys Workbench yazılımının "Static Structural" modülü kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizi modelleri oluşturulurken sırasıyla katı modelin çizilmesi, sınır şartlarının modele uygulanması, malzeme özelliklerinin programa girilmesi ve çözüm yapıp değerlendirilmesi aşamaları izlenmiştir. Boji katı modeli CATIA 3 boyutlu modelleme programı kullanılarak çizilmiş ve "stp" formatında kayıt edilmiştir. Daha sonra Ansys Workbench programına aktarılmış ve sonlu elemanlar modeli ağ örülerek oluşturulmuştur. Sonlu eleman tipi olarak 3 boyutlu 10 düğüm noktalı yapısal katı tipi tetrahedral eleman kullanılmıştır. Şekil 5'te gösterilen sınır şartları modele uygulandı. Şekil 5'te A noktası ile ifade edilen yer bojinin sabitlendiği kısımdır. Boji A noktasında gösterilen 4 noktadan sabitlenerek analizler uygulanmıştır. Pivottan dik uygulanan kuvvet B, sağ tarafa yanal uygulanan kuvvet ise D noktası olarak ifade edilmiştir. C noktası ile ifade edilen kısım ise bojinin sağ eğimli dönme durumunda maruz kaldığı kuvveti ifade etmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde optimum sonucu elde etmek için mesh yakınsama analizleri yapılmıştır. Bu amaçla 55-90 mm arası 7 farklı eleman boyutunda 32367, 32679, 36478, 44787, 47146, 47936 ve 48106 eleman sayılarında modeller analize tabi tutulmuştur. Elde edilen maksimum gerilmeler açısından değerlerin karşılaştırılması için mesh yakınsama grafiği çizdirilmiştir (Şekil 6). 44787 eleman için 100788 ağ örgü sayısı optimum değerler olarak belirlenmiş ve belirlenen eleman sayıları ile bojiye ağ örgüsü yapılmıştır (Şekil 7).



Şekil 5. Kuvvetlerin gösterimi (Representation of forces)



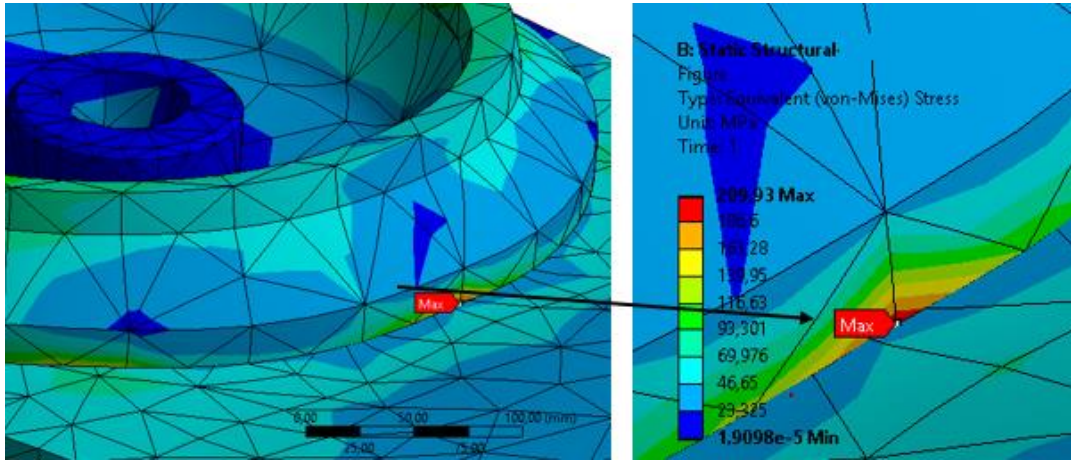
Şekil 6. Mesh yakınsama grafiği (Mesh convergence chart)



Şekil 7. Analiz için ağ örgüsü (Meshwork for analysis)

Boji şasisinde meydana gelen gerilmeler Şekil 8'de gösterilmiştir. Bojiye uygulanan statik kuvvetler; dik yönde pivot kısmından 282.530 N, bolsterin sağ kısmından 31.392 N ve yatay yönde ise 83.575 N luk olarak etki

etmektedir. Analiz sonucu pivotta meydana gelen 209,93 MPa'lık gerilme, seçilen malzemelerin akma değerlerinden küçük olduğu için, belirlenen malzemelerle üretilecek Y25 bojisi güvenli'dir (Şekil 8). Bulunan gerilme değeri 40 ton yük altında çalışacak bir konstrüksiyon için anlamlılık taşımaktadır. Makine imalatında kullanılabilecek en düşük dayanımlı çelik malzemenin yaklaşık 235 MPa (S235) akma gerilmesi olduğu düşünülürse, hesaplanan 209,93 MPa'lık gerilme değerinin endüstriyel açıdan emniyetle taşınabilecek bir seviyede olduğu görülmektedir. Şasi üzerine monte edilen yük vagonlarının ağırlık merkezlerinin pivot ile aynı ekseninde olması sebebiyle, maksimum gerilmenin pivot parçasında çıkması da anlamlıdır (Bilgin, 2015). Vagon yükünün pivot yataklama noktası üzerinden boji şasisine dağılması sebebiyle, pivot ile bolsterin ilk temas noktaları hem kesme hemde maksimum eğilme zorlanmalarına maruz kalacaktır (iki ucundan ankastre ve orta noktasından yüklenmiş kiriş problemi örneği). Maksimum gerilmenin olduğu nokta için hesaplanan maksimum çökme miktarı 1,498 mm'dir. 2,5 metre uzunluğundaki boji parçası için 1,498 mm'lik çökme değeri plastisite teorisi açısından kabul edilebilir limitler dahilindedir (çelik malzemeler için metre başına 0,2 mm). Emniyet katsayılarının belirlenebilmesi için seçilen malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Tablo 6'da malzemelerin mekanik özellikleri verilmiş ve bu değerlere göre emniyet katsayıları hesaplanmıştır.

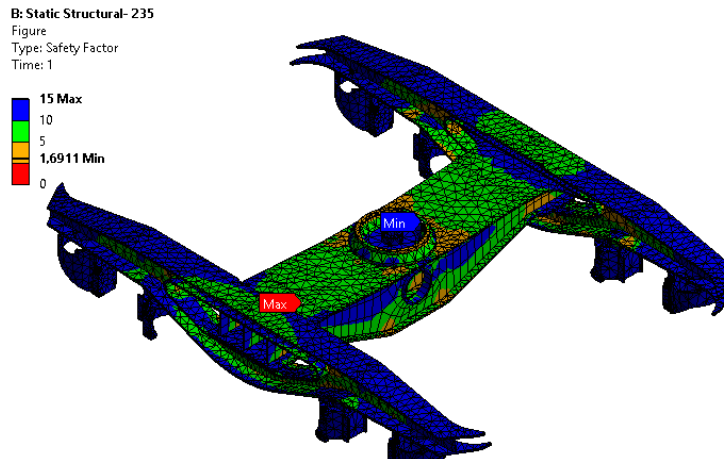


Şekil 8. Bojide meydana gelen maksimum gerilme (Maximum stress in bogie)

Tablo 5. Seçilen yapı çeliklerinin özellikleri (URL6) (Properties of selected structural steels)

	Akma Dayanımı (σ_{akma})	Çekme Dayanımı ($\sigma_{çekme}$)	Uzama (%)
S235	235 MPa	360-510 MPa	19 mm
S275	275 MPa	410-560 MPa	19 mm
S355	355 MPa	510-680 MPa	18 mm

Analizin gerçekleştirilebilmesi için bojilerin üç ana parçası da aynı malzeme olarak düşünülmüş ve üç farklı boji tasarımı oluşturulmuştur. Her üç tasarımda da maksimum ve minimum gerilmeler beklendiği üzere aynı noktalarda ve aynı değerlerde oluşmuştur (Şekil 9). Her farklı durumda oluşan maksimum gerilme değerleri ($\sigma_{nominal}$) Tablo 6'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Emniyet gerilmesi için maksimum (kırmızı imleç) ve minimum gerilme (mavi imleç) noktaları (Maximum (red cursor) and minimum stress (blue cursor) points for safety stress)

Her bir bojinin emniyet katsayısı " $s = \sigma_{akma} / \sigma_{nominal}$ " bağıntısı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Tablo 6). S355 malzemesi S275 ve S235'e göre daha yüksek akma dayanımı değerine sahip olduğu için emniyet katsayısı maksimum değerde çıkmıştır. S275'te S235'e kıyasla yüksek akma dayanımına sahiptir ve 1,31 emniyet katsayısı değeri vermiştir. Makine tasarımında çelik konstrüksiyonlar için minimum emniyet katsayısı 1,5 değeri olarak kabul görmektedir. Bu sebeple, malzeme seçimi sadece emniyet katsayısı değerlerine göre yapılsaydı S355 malzeme en uygun malzeme olarak seçilebilecektir.

Tablo 6. Boji malzemelerine göre emniyet katsayıları (Safety coefficients according to bogie materials)

Çelik	Maksimum Gerilme ($\sigma_{nominal}$)	Akma Gerilmesi (σ_{akma})	Emniyet Katsayısı (s)
S235	210	235	1,11
S275	210	275	1,31
S355	210	355	1,70

Üretimde rol oynayan diğer bir unsur olan malzemelerin kaynaklanabilirlikleri parametresi için Tablo 7'de hesaplanan $C_{eş}$ değerleri dikkate alınmıştır. $C_{eş}$ değeri küçük olan malzemenin kaynak edilebilirliği daha iyidir. Tabloya göre seçilen malzemelerden kaynaklanabilirliği en iyi S235 iken, en düşük kaynaklanabilirliğe sahip malzeme ise S355'tir. Çalışmada belirlenen son unsur olan birim fiyatta ise Tablo 3'te ki verilerden yararlanılmıştır. Belirlenen üretim unsurları ve parametreler Tablo 7'deki gibi yazılarak problem matrisi oluşturulmuştur. Yapılan analizler ve belirlenen kriterler neticesinde TOPSIS Yöntemi ve VIKOR Yöntemi ile çok kriterli karar verme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7. Etki derecelendirme yöntemine göre parametrelerin sınıflandırılması (Classification of parameters according to impact rating method)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	1,11	2650	0,48
S275	1,31	2740	0,50
S355	1,70	2750	0,54
S355-S275	1,70	2743	0,56

TOPSIS yönteminde ilk olarak Eşitlik 8 yardımıyla eşitlik normleştirilmiştir (Tablo 8).

Tablo 8. Normalizasyon tablosu (Normalization table)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,225	0,486	0,460
S275	0,266	0,503	0,480
S355	0,3452	0,505	0,518
S355-S275	0,3452	0,504	0,537

İkinci adımda ise ağırlıkları belirlenen unsurların ağırlıklı normleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 9 yardımıyla elde edilmiştir. (Tablo 9).

Tablo 9. Ağırlıklandırılmış normalizasyon tablosu (Weighted normalization table)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,225	0,073	0,115
S275	0,266	0,075	0,119
S355	0,3452	0,076	0,129
S355-S275	0,3452	0,076	0,134

İdeal çözümler, Eşitlik 10 ve Eşitlik 11 yardımıyla hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. İdeal çözüm tablosu (Ideal solution table)

	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
V ⁺	0,345	0,073	0,116
V ⁻	0,225	0,076	0,134

Optimum ideal ve negatif ideal çözüm eşitliklerine mesafeler ile ideal çözüme yakınlık değerleri hesaplanarak TOPSIS yöntemine göre en ideal malzeme belirlenmiştir. TOPSIS çok kriterli karar verme yöntemine göre seçilen malzemelerden en ideal olanı S355'tir (Tablo 11).

Tablo 11. İdeal çözüme yakınlık tablosu (Closeness to the ideal solution)

Çelik	Si+	Si-	Pi	Sıralama
S235	0,119	0,019	0,139	3
S275	0,079	0,043	0,351	2
S355	0,015	0,119	0,891	1
S355-S275	0,019	0,120	0,861	

VIKOR yönteminde ilk olarak en yüksek ve en düşük parametreler belirlenmiştir (Tablo 12).

Tablo 12. En yüksek ve en düşük parametreler (Highest and lowest parameters)

	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
X_i^+	1,7	2650	0,48
X_i^-	1,11	2750	0,54

Bir sonraki adımda her bir kriterin E_i değerleri hesaplanmıştır (Tablo 13).

Tablo 13. E_i değerleri (E_i values)

Çelik	Emniyet Katsayısı	Birim Fiyat	Kaynak Edilebilirliği
S235	0,600	0	0
S275	0,396	0,135	0,063
S355	0	0,150	0,188
S355-S275	0	0,141	0,250

Tüm parametreler için E_i , F_i ve Q_i değerleri sırasıyla Eşitlik 16 ve Eşitlik 17 yardımıyla hesaplanarak sonuçlar Tablo 14'te gösterildiği şekilde sıralanmıştır. VIKOR yönteminde diğer yaklaşımların aksine en küçük Q_i değeri en iyi sonucu vermektedir. VIKOR yöntemine göre de en ideal malzeme S355 çıkmıştır (Tablo 14). 3 alternatif olduğu için $DQ=0,33$ olarak bulunmuştur. 1.alternatif olan $P(Q_1)$ değeri 0, ikinci alternatif $P(Q_2)$ ifadesi ise 0,742 olarak belirlenmiştir. Eşitlik 18 çözüldüğünde ise S355 malzemesinin C_1 kümesinde olduğu görülmektedir.

Tablo 14. E_i , F_i , Q_i değerleri ve sıralama (E_i , F_i , Q_i values and sequencing)

Çelik	E_i	F_i	Q_i	Sıralama
S235	0,6	0,6	1	3
S275	0,594	0,396	0,742	2
S355	0,337	0,188	0	1
S355-S275	0,391	0,25	0,177	

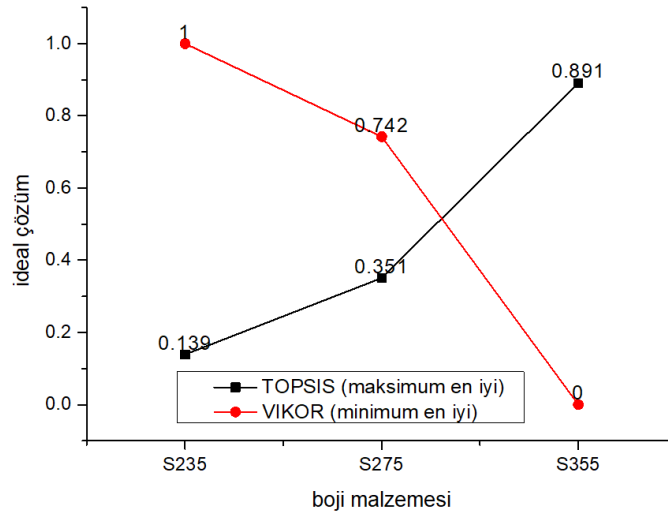
7. Sonuçlar (Results)

Çalışma kapsamında mekanik dayanım, imal edilebilirlik ve malzeme maliyeti kavramları birlikte analiz edilerek boji için optimum malzeme belirlenmeye çalışılmıştır. Karar probleminin oluşturulmasında mekanik, malzeme ve maliyet kavramları birlikte kullanılarak entegre bir model oluşturulmuştur. Problemin çözüm aşamasında birden fazla karar kriteri olması sebebiyle çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözümleme yapılmıştır.

Çok kriterli problem iki yöntem kullanılarak çözülmüştür. Çok kriterli karar verme yöntemleri olan TOPSIS ve VIKOR yöntemine göre en ideal malzeme S355'tir. İkinci ideal malzeme ise her iki yönteme göre de S275 çeliği çıkmaktadır (Şekil 10). Her iki yönteminde benzer sonuç vermesi, oluşturulan problem matrisinin anlamlılığını göstermektedir. S355 çeliği Tablo 7'de verilen problem matrisine göre yüksek emniyet katsayısı sağlaması açısından tercih edilebilir gözükmesine rağmen, kaynak edilebilirlik ve maliyet faktörleri açısından dezavantaj taşımaktadır. TOPSIS ve VIKOR yöntemleri, S355 malzemesinin dezavantajı olmasına rağmen yüksek seçim katsayısı ile S355 malzemenin seçilmesi gerektiği sonucunu vermiştir (TOPSIS için 0,894, VIKOR için 0 değeri) (Şekil 10). Bu durum güvenilirliğin ön planda tutulması ile açıklanabilir. Emniyet katsayısının ağırlık değerinin %60 gibi büyük bir oranda tutulması diğer iki parametrenin etkisini baskılamıştır.

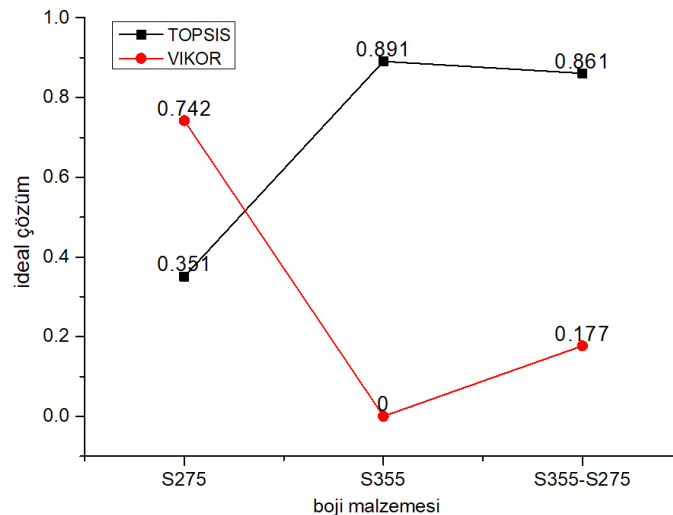
Her iki yöntemde, S355 malzemedan sonra S275 malzemenin 2. sırada tercih edilebileceği sonucunu vermektedir (TOPSIS için 0,3442, VIKOR için 1 değeri) (Şekil 10). S275 malzeme, maliyet ve kaynak edilebilirlik parametreleri açısından S355 malzemeye yakın özelliklere sahip olmasına rağmen, seçim katsayısı değeri bakımında ideal çözüme uzak bir sonuç vermiştir. Şekil 8'den de anlaşılacağı üzere, S275 malzeme için elde edilen değerler S235 malzemeye daha yakın durmaktadır. Bu durumda emniyet katsayısı için belirlenen yüksek ağırlık oranıyla bağlantılıdır. Emniyet katsayısı değeri diğer iki parametreyi güçlü bir şekilde baskılamaktadır. S235 malzeme ise

emniyet katsayısı değerinin kabul edilebilir alt sınır değere ($s \geq 1$) çok yakın olması sebebiyle ideal çözüme çok uzak bir noktada kalmıştır.



Şekil 10. Karar verme grafiği (Decision making chart)

Boji konstrüksiyonu sadece tek bir malzeme ile imal edilmek zorunda değildir. Boji parçaları (Şekil 1) farklı malzemeler kullanarak ayrı ayrı imal edildikten sonra yine kaynaklı imalat ile birleştirilebilir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin burada sağlayacağı fayda uygun malzeme kombinasyonlarının belirlenmesini sağlamaktır. Elde edilen sonuçlar S355 ve S275 malzemesinin en uygun iki malzeme olduğu sonucunu vermiştir. S235 malzemesinin emniyet katsayısının düşük olması ise tasarım mühendisliği açısından kaygı verici olarak karşılanacak bir durumdur. Bu sebeple sadece S355 ve S275 kullanılarak optimum bir konstrüksiyon planlanabilir. S355 yüksek emniyet katsayısı sağlaması sebebiyle en kritik parça olan pivotta (Şekil 1, 4 numaralı makine parçası) kullanılabilir. S275 malzeme ise maliyet unsurunun düşük olması sebebiyle, emniyetin ikinci planda olduğu ve ağırlıkça yüksek miktarda malzeme gereksinimi olan bolster ve taşıyıcı kirişlerde (Şekil 1, 1-3 numaralı makine parçaları) tercih edilebilir. Bu şekilde bir kombinasyon için parametre katsayıları belirlenip tekrar problem matrisi oluşturularak, TOPSIS ve VIKOR yöntemlerine göre problem tekraren çözülmüştür (Emniyet katsayısı:1,7, Kaynak edilebilirlik:0,56, Birim Fiyat:2744) (Şekil 11). Elde edilen yeni değerler optimum malzemenin tekraren S355 olduğunu göstermektedir. Fakat, S275-S355 malzeme çiftinin S355 malzemesine oldukça yakın değerler verdiği de Şekil 11’de görülmektedir. S355 kullanımı ile S275-S355 malzeme çifti kullanımı arasında, karar verme katsayıları açısından sadece %3’lük bir fark mevcuttur. Çalışmada kullanılan ağırlık katsayılarının sezgisel olarak dikkate alınması sebebiyle %3’lük bir fark, hata sınırları içerisinde dikkate alınabilir. Bu sebeple maliyet unsurları göz önünde bulundurulduğunda S275-S355 çifti optimum tasarım olarak kabul edilebilir.



Şekil 11. Karar verme grafiği (Decision making chart)

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Kaynaklar (References)

- Arisoy, D. O., Ahan, O., Müderrisoğlu, K., Bayraktar, M., 2012. Static And Dynamic Analysis Of Railway Wagon Trailer Bogie In Computer Environment, 1. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı (IWRSE'12), Karabük.
- Bilgin, E., 2015. Y32 Bojisinin Farklı Vagon Ağırlıklarına Adaptasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khorshidi, R., Hassani, A., 2013. Comparative analysis between TOPSIS and PSI methods of materials selection to achieve a desirable combination of strength and workability in Al/SiC composite, Materials & Design (1980-2015) Volume 52, sayfa 999-1010.
- Kima, J. S., Yoona, H. K., 2011. Structural Behaviors of a GFRP Composite Bogie Frame for Urban Subway Trains under Critical Load Conditions, Procedia Engineering 10, 2375-2380.
- Özsoy, M. İ., 2008. Y32 Bojisinin Bilgisayar Destekli Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Piroğlu, F., Uzgider, E., Çağlayan, Ö. B., Vural, M., 2013. Yapı Çeliklerinin Kaynaklanabilirliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pektaş, İ., 2017. Raylı Ulaşım Sistemleri Sektör Analizi, Ankara.
- TS EN 13749, Railway Applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames, European Committee for Standardization (Brussels, Belgium, 2011).
- UIC 515-4, Passenger Rolling Stock - Trailer Bogies - Running Gear - Bogie Running Gear - Bogie Frame Structure Strength Tests.
- URL1.<http://rayvag.com.tr/urunler/bojiler/y25-bsd1-uic-boji/> (30.12.2018)
- URL2.<https://turkish.alibaba.com/product-detail/uic-standard-tsi-certification-bogie-y25-for-european-railway-freight-wagon-60009398100.html/> (30.12.2018)
- URL3.<http://www.akarlojistik.com.tr/vagon-olculeri/> (30.12.2018)
- URL4. <https://www.leecosteel.com/> (30.12.2018)
- URL5.<https://www.slideshare.net/ahmetsonmez37/btnleik-ahp-topsisvikor-uygulamas/> (30.12.2018)
- URL6. <http://turkish.stainlesssteel-sheetmetal.com/> (30.12.2018)
- Uygun R., 2017. Örnek Bir Emu Boji Şasisinin Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum
- Ünal, O., Maleki, E., 2018. Shot peening optimization with complex decision-making tool: Multi criteria decision-making, Measurement, 125, 133-141.
- Vladimir, Dr. V. V., 2014. Design and Simulation of Rail Vehicles, Program of Master of Science in Mechatronic Systems Engineering Lawrence Technological University, Michigan.
- Yao-hui, L., Jing, Z., Wu, P., Guan, Q., 2009. Modeling of rigid-flexible coupling system dynamics for railway vehicles with flexible bogie frame, 4th International. Conference on Innovative Computing, Information and Control.