

PLATFORM TİPİ MANİPÜLATÖRLERİN YAPISAL SENTEZİNDE BAĞLANTI TEMELLİ KOMŞULUK DİZEYİNİN BİR VAKA ÇALIŞMASI ÜZERİNDE UYGULANMASI

Mustafa Volkan YAZICI^{1, a)}, Mertcan KOÇAK^{1, b)}, Tuğrul USLU^{2, c)} ve Erkin GEZGİN^{1, d)}

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü 35620, İZMİR

²İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü 35620, İZMİR

^{a)}mustafa.v.yazici@gmail.com, ^{b)}mertcan.kocak@ikcu.edu.tr, ^{c)}tugrul.uslu@ikcu.edu.tr,
^{d)}erkin.gezgin@ikcu.edu.tr

Belirlenmiş tasarım kısıtları dahilinde herhangi bir manipülatör sisteminin tasarımına, manipülatör kinematik yapısının ortaya çıkmasını sağlayacak uzuv sayısı/tipi, mafsal sayısı/tipi, eksen yönelimleri ve manipülatör serbestlik derecesi gibi temel parametrelerin ortaya çıkarıldığı bir yapısal sentez süreciyle başlanmalıdır. Bu doğrultuda, mevcut literatürde yapısal sentez sürecinin farklı yaklaşımlarla ele alındığı birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Alizade'nin yapısal sentez süreçlerine bakış açısı ise topolojik manipülatör tasarım yaklaşımının tasarımcıya esneklik kazandırdığı, basit ve uyarlanabilir yöntemler arasında yer almaktadır. Her ne kadar yazarlar tarafından önerilen yöntemler tasarım süreçlerinde etkili olsa da, tasarım kısıtlarının karmaşıklaşması durumunda, olası manipülatör topoloji sayısındaki artış, bu alternatiflerin tümünün görselleştirilmesi ve değerlendirilmesi açısından takip edilmesi gereken sürecin zorlaşmasına, olası bir tasarımın gözden kaçırılmasına ve bu nedenle de süreç dahilinde verimlilik düşüşüne neden olmaktadır. Bu sorunun giderilmesi amacıyla, Alizade'nin yapısal sentez süreçlerine entegre edilebilecek bağlantı temelli komşuluk dizeyi yaklaşımı önerilmiş ve tasarım kriterlerinin sağlandığı tüm manipülatör topolojilerinin ortaya çıkarılabilmesi matematiksel olarak sağlanarak ilgili yaklaşımların yazılım ortamında otomatik manipülatör yapısal sentez süreçlerine uyarlanabilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada ilgili süreç kullanımlarının netleştirilerek yaygınlaştırılabilmesi için, Alizade'nin varolan topolojik yapısal sentez kurgusunun ve bağlantı temelli komşuluk dizeyi entegrasyonunun hem kuramsal hem de pratik olarak bir vaka çalışması üzerinden ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapısal Sentez, Bağlantı Temelli Komşuluk Dizeyi, Topoloji Tabanlı Yapısal Tasarım, Platform Tipi Manipülatörler.

APPLICATION OF CONNECTION-BASED ADJACENCY MATRIX IN STRUCTURAL SYNTHESIS OF PLATFORM TYPE MANIPULATORS ON A CASE STUDY

ABSTRACT

The design of any manipulator system, within predefined design constraints, should begin with a structural synthesis procedure in which key parameters such as the number/type of the links, and joints, axis orientations, and the manipulator's degrees of freedom are defined to reveal desired manipulator kinematic structure. In light of this, ongoing literature presents a variety of methods that approach structural synthesis procedures from different perspectives. Among these, Alizade's perspective emphasizes a topological manipulator design approach that offers flexibility to the designer and provides a simple and adaptable methodology. Although proposed methodologies are efficient in authors approaches, when the design possibilities of coarse topologies increases with desired constraints, due to increased complexity it would be inefficient for designers to visualize or check all alternative designs. In order to remedy this, a connection based adjacency matrix approach was proposed in the literature recently to enable mathematical generation of all possible manipulator topologies that satisfy given design constraints, and facilitates the implementation of automatic manipulator structural synthesis in a software environment. This work briefly discusses Alizade's existing topology based structural synthesis procedure, and connection based adjacency matrix implementation both theoretically and

practically on a case study with the aim of clarifying and promoting the use of existing methodology in manipulator design processes

Keywords: Structural Synthesis, Connection Based Adjacency Matrix, Topology Based Structural Design, Platform Type Manipulators.

1. GİRİŞ

Mekanizma teorisine bağlı yapısal sentezde, manipülatör mobilitelerinin hesaplanması için evrensel formüller geliştirme çalışmalarına literatürde sıklıkla karışılmaktadır. Bu yaklaşımların çoğu, mekanizma son noktasının (uç işlemci) konumunu tanımlamak için gerekli bağımsız parametre sayısını belirlemeye odaklanırken, bazıları da bu formülasyonları kullanarak yeni manipülatör topolojileri oluşturmaktadır. Alizade ve çalışma arkadaşlarının “görev-tabanlı” yapısal sentez yöntemleri, platform-tipi manipülatörlerin farklı altuzay ve bağlantı yapılarını hesaba katan esnek bir tasarım süreci sunmaktadır [1-3]. Buna karşın, bu yöntemler kaba topolojilerin elle üretilmesine ve geçersiz yapıların tek tek elenmesine dayanmakta; kritik tasarımların gözden kaçma riski ile izomorfik (matematiksel olarak eş) yapıların ayıklanmasında ortaya çıkan yüksek hesap yükü, otomatik sentez yaklaşımlarının önünde önemli bir engel teşkil etmektedir.

Bu eksikliğe bağlı olarak, otomatik yapısal sentez kavramı, tasarım çeşitliliğini artırmak için kinematik zincirlerin algoritmik olarak oluşturulmasını ve geçerli topolojilerin sayısal olarak listelenmesini hedeflemektedir. Yan ve Chiu [4] tarafından derlenen sayısal yöntemler; sezgi veya görsel inceleme [5], Franke notasyonu [6, 7], çizge kuramı [8, 9], Baranov kafes yapıları [10, 11], dizey tabanlı teknikler [12, 13] ve grup teorisi [14, 15] gibi çok çeşitli araçları kapsar. Ding ve arkadaşlarının “akıllı tasarım” teorisi ise [16], tasarım görevleri ve topolojik kısıtlar doğrultusunda kinematik zincirlerin otomatik sentezi, fonksiyonel gereksinimlere göre mekanizmaların otomatik sentezi, yeni mekanizmaların performans değerlendirmesi olarak üç aşamalı bir süreç önerir. Ancak, zincirdeki eleman sayısı ve topoloji kombinasyonları arttıkça hesaplama yükü katlanarak yükselir; izomorfik topolojilerin ayıklanması zorlaşır ve manuel yöntemler kritik yapıları gözden kaçırma riskini beraberinde getirir [17].

Benzer şekilde, Alizade'nin [1] ve Gezgin'in [18] önerdiği sırasıyla ileri ve ters yapısal sentez prosedürleri kaba topolojik yapıları manuel olarak üretmeye dayanmaktadır. Tasarımcının kritik topolojileri kaçırma riski, el ile gerçekleştirilen işlemlerin kapsamlılık göstermesinin neredeyse imkânsız olması nedeniyle yüksektir. Ayrıca, izomorfik topolojilerin ayırt edilmesinde ortaya çıkan hesaplama yükü otomatik sentez yaklaşımlarının önünde önemli bir engel teşkil etmektedir. Bu yöntemler, universal mobilite formülasyonları kullanarak kaba topolojileri oluşturmaya imkân tanımış; ancak elde edilen topolojilerin manuel olarak sayılması ve geçersiz olanların ayıklanması, kritik tasarımların gözden kaçmasına ve izomorfizm tespitinde yüksek hesap yüküne yol açmaktadır.

İzomorfik sonuçların ayırt edilebilmesi ve topolojilerin tarif edilebilmesi için literatürde birçok çalışma yer almaktadır. Bunlar; yörünge ve çevrim sayımı [19,20], kanonik form metodu [21,22], permütasyon metodu [23,24], permütasyon grupları [25,26], yol dizeyi temelli yöntem [27], karakteristik polinom [28,29], uzuv ya da eklem yolları/mesafesi [30,31], Hamming sayısı [32,33], standart kod [34], özdeğerler ve özvektörler [35,36], yapay sinir ağları ya da evrimsel algoritma [37,38], uzuv ya da eklem komşuluk ilişkisi [39] şeklindedir. Tüm bu yöntemlerde temel maksat tasarım sonucunun özgün olduğunu ispatlamaktır ve bu yöntemlerde genellikle yapı özellikleri bir komşuluk dizeyinden elde edilmektedir. Özgünlük izomorf olmamak olarak açıklanacak olursa literatürde bu durumun tespiti için farklı çalışmalar bulunmaktadır. Chang ve arkadaşlarının çalışmasında kinematik zincirin komşuluk dizeyi üzerinden özdeğer ve özvektörlerin kıyaslanması ile izomorfizm kontrol edilmiştir. Cubillo ve arkadaşları permütasyon operasyonuna dayalı bir yöntem geliştirmiştir [40]. Rizvi ve arkadaşları bir algoritma geliştirilerek tüm olası sonuçları tespit etmeye çalışmışlardır [41]. Dargar ve arkadaşları ise

genişletilmiş komşuluk düzeyi önerisi ile gelmiştir [42]. Shukla ve arkadaşları ise uzuvlar ve eklemler arasındaki rotada bulunan kinematik elemanların sayısı ve konumuna odaklanmıştır [43]. Helal ve arkadaşları topolojideki uzuv ve eklem sayılarını, sıralamalarını ve tiplerini de belirten birleştirilmiş zincir düzeyini kullanmışlardır. Yu ve arkadaşları ise uzuv sınıflandırma düzeyini oluşturmuş ve uzuvları kategorize ederek yapısal özelliklere odaklanmıştır [44].

Literatürde yer alan çalışmalardan da görüldüğü üzere, araştırmacılar yapısal sentez çalışmalarında belirlenen tasarım hedeflerine ve kısıtlarına uygun olan olası tüm sonuçları tespit etmeye ve bu sırada da görsel olarak farklı görünmelerine rağmen hem matematiksel hem de mekanizma bakış açısına göre aynı olan tekrarlı sonuçları tespit ederek elemeye çalışmışlardır. Böylece tasarım süreçlerini hızlandırırken sonuçların keskinliğini artırmak amaçlanmıştır. Alizade yönteminin geliştirilme gerekliliğinin ortaya çıkması sonrasında, manuel üretim sürecini otomatikleştirebilecek, kaba topolojileri sistematik olarak listeleyip geçersiz olanları eleyebilecek, aynı zamanda izomorfizmi azaltarak hesap yükünü hafifletebilecek yeni bir matematiksel araç ihtiyacı sonrasında bağlantı bazlı komşuluk düzeyi (Connection-based Adjacency Matrix, CAM) kavramı tanıtılmış ve Alizade'nin yapısal tasarım prosedürlerinin otomatik sentez süreçlerine uyarlanabilmesi amaçlanmıştır [45]. Bu çalışmada ise ilgili yöntemin uygulaması, tasarım kısıtları belirlenmiş bir vaka çalışması üzerinden gösterilmektedir.

2. TOPOLOJİK TASARIM

Tasarım kısıtları belirlenmiş bir görev için belirli serbestlik derecesine sahip herhangi bir platform tipi manipülörün kinematik yapısının oluşturulabilmesi için en temel başlangıçlardan biri serbestlik derecesine sahip olmayan manipülör yapısal grubunun kurgulanarak ortaya çıkarılmasıdır. Bu noktada Alizade'nin önerdiği yapısal sentez yöntemi [1], platform tipi manipülörlerin farklı altuzay ve bağlantı yapılarını hesaba katan esnek bir tasarım süreci sunmaktadır. İlgili yöntem temel olarak yazarların önerdiği evrensel serbestlik derecesi formülü üzerinden kurgulanmıştır.

$$M = \sum f_i - \lambda(j_p - B - c) \quad (1)$$

Bu formülde, M manipülör serbestlik derecesini, $\sum f_i$ manipülör üzerinde bulunan tüm mafsalların toplam serbestlik derecesini, λ hareket uzayının boyutunu belirten alt uzay değerini, j_p manipülör platformları üzerinde bulunan toplam eleman sayısını, c manipülör platformları arasında bulunan toplam bağlantı sayısını ve B ise manipülör yapısında bulunan toplam platform sayısını göstermektedir.

Denklem 1 kullanılarak platform tipi manipülörlerin yapısal tasarımı için takip edilmesi gereken süreç maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir.

- Görev kısıtlamaları dahilinde manipülör hareketinin gerçekleşeceği hareket uzay boyutuna (λ) karar verilmesi.
- Manipülör platform sayısına (B) ve toplam platform eleman sayısını (j_p) ortaya çıkaracak platform tipine karar verilmesi (ikili, üçgen, dörtgen, beşgen, altıgen platformlar arasından seçim yapılır).
- Belirlenen platform sayı ve tipine göre olası bütün topolojik konfigürasyonların çıkarılarak platformlar arası bağlantı sayısının ($c=c_b+c_h$) hesaplanması. (c_b : zincir tipi (branch) bağlantı, c_h : menteşe tipi (hinge) bağlantı)

Bu noktada karmaşık platformlu tasarımlar için çok fazla olasılığın bulunması, manuel topoloji oluşumunu zorlaştırmakta ve görev için kullanılacak tüm olasılıkların tasarımcı tarafından görülebilmesi için bağlantı bazlı komşuluk düzeyi yaklaşımına ihtiyaç duyulmaktadır [45].

- Tüm olasılıklar içerisinde tasarımcı tarafından seçilecek kaba manipülör topolojisinden serbestlik derecesine sahip olmayan yapısal grubun oluşturulması için gerekli, manipülörde bulunacak toplam mafsallık serbestlik derecesinin ($\sum f_i$) denklem 1 kullanılarak hesaplanması.
- Hesaplanan toplam mafsallık serbestlik derecesi sayısı kadar tek serbestlik dereceli mafsallık kullanılacağı kabul edilerek, ilgili mafsalların manipülör uzuvlarına bağlantı

öncelikli ve homojen olarak dağıtılması [46].

- Hedeflenen serbestlik derecesine göre manipülatör eyleyicilerinin oluşturulan yapısal gruba entegrasyonu [46].
- Hareket uzayı, kompaktlık ve karmaşıklık gözetilerek [47] mafsal değişimlerinin gerçekleştirilmesi.
- Hareket uzayı gözetilerek mafsal eksenlerinin yönlendirilmesi [45]

3. BAĞLANTI TEMELLİ KOMŞULUK DİZEYİ

Bağlantı temelli komşuluk dizeyi herhangi bir manipülatör topolojisinin bir dizey ile tanımlanabilmesi için kullanılmaktadır. Bir topolojiyi dizey ile tanımlamak, topolojiye nicelik kazandırarak bilgisayar ortamına aktarımını ve bir veri olarak işlenmesini oldukça kolaylaştırmaktadır. Bu sayede oluşturulan bir algoritma kullanılarak daha önce Alizade'nin yöntemi ile manuel çıkartılan kaba manipülatör topolojilerinin bilgisayar ile otomatik olarak çıkarılması, özellikle olası yüksek topoloji sayılarında tasarımcı eforunu ve hatalarını minimize etmektedir. Bu noktada, aşağıda bağlantı tabanlı komşuluk dizeyinin genel yapısı tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bağlantı temelli komşuluk dizeyi genel yapısı

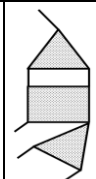
#	Z		P ₁		P ₂		...	P _n	
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>b</i>		<i>h</i>	<i>b</i>
Zemin (Z)	0	0	<i>h</i> ₀₁	<i>b</i> ₀₁	<i>h</i> ₀₂	<i>b</i> ₀₂	...	<i>h</i> _{0n}	<i>b</i> _{0n}
Platform 1 (P ₁)	<i>h</i> ₁₀	<i>b</i> ₁₀	0	0	<i>h</i> ₁₂	<i>b</i> ₁₂	...	<i>h</i> _{1n}	<i>b</i> _{1n}
Platform 2 (P ₂)	<i>h</i> ₂₀	<i>b</i> ₂₀	<i>h</i> ₂₁	<i>b</i> ₂₁	0	0	...	<i>h</i> _{2n}	<i>b</i> _{2n}
...
Platform n (P _n)	<i>h</i> _{n0}	<i>b</i> _{n0}	<i>h</i> _{n1}	<i>b</i> _{n1}	<i>h</i> _{n2}	<i>b</i> _{n2}	...	0	0

Bağlantı temelli komşuluk dizeyi *n* satır, ve *2n* sütundan oluşan bir dizeydir ve içindeki her değer iki platform arasındaki bir bağlantı sayısını ifade etmektedir. Zemin ve topolojiyi oluşturan her platform dizey içerisinde bir satır ve iki sütun ile gösterilmiştir. Zemin ve platformların iki sütun ile ifade edilmesinin sebebi menteşe tipi (*h-hinge*) ve zincir tipi (*b-branch*) bağlantıların ayrı olarak ifade

edilmesinden kaynaklanmaktadır. Zemin her zaman dizey içerisindeki ilk satır ve ilk iki sütun ile ifade edilmiştir. Bağlantı tabanlı komşuluk dizeyinin yapısından dolayı dizey içerisindeki *h_{ij}* ve *b_{ij}* elemanlarının değerleri *h_{ji}* ve *b_{ji}* elemanlarının değerleri ile aynıdır. Aynı platformu ifade eden satır ve sütunların kesiştiği dizey elemanlarının değeri 0 olarak verilmiştir. Bu elemanların değerlerinin 0'dan büyük olması o platformun kendi ile bağlantı yaptığını ifade etmektedir. Bu durum mekanizmanın topolojisi için anlamsız olduğundan dolayı o değerler 0 olarak dizey içerisinde sabitlemiştir.

Bir topolojideki, manipülatör platform sayısı (*B*), platform tipleri, bacak sayısı (*c_i*), toplam bağlantı sayısı (*c*) gibi birçok tasarım parametresi bağlantı temelli komşuluk dizeyinden kolayca çıkarılabilir. Bu sayede tasarım kısıtı olarak da istenilen parametreleri sağlayan bağlantı temelli komşuluk dizeyleri üretmek mümkündür. Tablo 2'de gösterildiği gibi bağlantı temelli komşuluk dizeyi içerisinde platformların yazılış sırası dizeyin elemanlarının değerlerini değiştirirse de dizeyin gösterdiği topoloji üzerinde bir değişikliğe sebep olmamaktadır ve her topolojiyi ifade eden birden fazla izomorf dizeyin varlığına işaret etmektedir. İzomorf dizeylerin varlığı, istenilen parametrelere göre bağlantı temelli komşuluk dizeyleri üretirken aynı topolojiyi birden fazla üretmemek adına bir izomorfizm kontrolü yapılması gereksimini ortaya çıkarmaktadır.

Tablo 2. İzomorf olan 2 adet bağlantı temelli komşuluk dizeyi ve kaba manipülatör topolojisi

İzomorf dizey 1	Topoloji	İzomorf dizey 2
$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$	 <p>B=3, <i>j_p</i>=10 <i>c</i>=3</p>	$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{vmatrix}$

[45]'te oluşturulan ve izomorfizm azaltma ve tespit yöntemleri içeren bağlantı tabanlı komşuluk dizeyi yaklaşımı ile verilen parametrelere göre (ileri Alizade yaklaşımı için manipülatör platform sayısı (*B*) ve platform tipleri, ya da ters Alizade yaklaşımı için

manipülör platform sayısı (B) ve bacak sayısı) bütün topolojik olasılıkların hesaplanması aşağıda belirtilen özet adımlar ile gerçekleştirilebilir,

- Platform sayısı (B) ve tipleri için mümkün olan bağlantı sayılarının (c) hesaplanması.

$$c_{\min} = B - 1, c_{\max} = (j_p - 2) / 2 \quad (2)$$

- Eğer ters Alizade yaklaşımı kullanılacaksa, platform sayısı (B) ve bacak sayısı (c_l) için gerekli olan platform tipleri ve bağlantı sayılarının (c) hesaplanması.

$$c_l = j_p - 2(c_b + c_h) \quad (3)$$

$$\frac{3B - c_l}{2} \leq c_b + c_h \leq \frac{6B - c_l}{2} \quad (4)$$

- Her mümkün platform tipi ve bağlantı sayısı (c) kombinasyonu için bütün, sadece zincir (branch) tipi bağlantı içeren mekanizma topolojilerin bulunması.
- Bulunan topolojilere iki ayrı platform arasında iki tane bulunmayacak şekilde zincir tipi bağlantılarının menteşe tipi (hinge) bağlantıya dönüştürülmesi.
- Her bulunan topolojinin izomorfizm tespitinin yapılması ve izomorf dizeylerin sonuçlardan çıkarılması.

Bu noktada yöntemin bir vaka çalışması ile açıklanabilmesi için tasarım hedefi olarak engebeli bir yüzeyde gidebilecek bir mobil robotun düzlemsel olarak planlanan hareket sisteminin tek tarafının tasarımı kararlaştırılmıştır. İlgili sistemde tekerlek ve arazi arasında kayma olmadığı varsayılırsa mobil robotun hareket sistemini oluşturan mekanizma tekerleklerin dönüşünü sağlayan eyleyiciler ile kontrol edilmektedir.

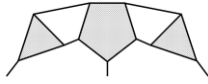
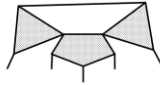
Tasarım kısıt parametreleri tablo 3'te verilmiş iki adet üçgen ve bir adet beşgen platform içeren bir mobil platform robot tasarımı için bağlantı tabanlı komşuluk dizeyi yaklaşımı uygulanarak, verilmiş parametrelerle 2, 3 ve 4 bağlantı sayıları (c) için (Denklem 2) sırasıyla 7, 18, 21, toplamda 46 farklı topolojik konfigürasyon bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bu topolojik konfigürasyonlar içinden iki adet topoloji seçilerek vaka çalışması devam ettirilecektir.

Tablo 3. Mekanizma topolojileri için kullanılacak parametreler

Hareket uzay boyutu (λ)	3
Manipülör serbestlik Derecesi	3 ve 5
Manipülör platform sayısı (B)	3
Platform tipleri	3, 3, 5 $j_p=11$
Mümkün bağlantı sayıları (c)	2, 3, 4

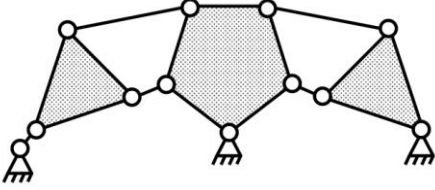
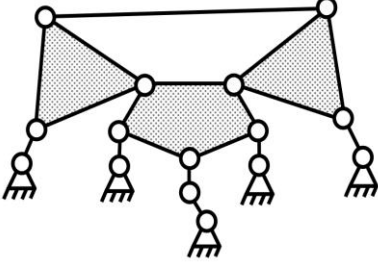
Bu noktada tasarımcı, istenen parametreler kapsamında bütün oluşan kaba manipülör topolojileri içinden kendisinin uygun gördüğü aday topolojileri seçerek ilgili yapısal grupları oluşturmalı daha sonra da serbestlik derecesine karar vermelidir. Tablo 4'te vaka çalışması için rastgele seçilen kaba manipülör topolojileri ve yapısal grup oluşturmak için gerekli toplam mafsallık serbestlik derecesi ($\sum f_i$) birlikte verilmiştir.

Tablo 4. Bütün mümkün topolojiler arasından seçilen topolojiler ve yapısal grup oluşturmak için gerekli olan toplam mafsallık serbestlik derecesi ($\sum f_i$)

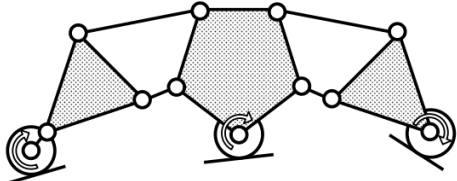
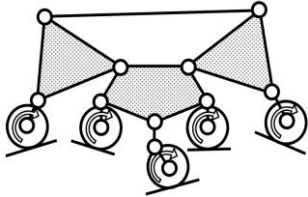
Seçilen topoloji	Bağlantı Temelli Komşuluk Dizeyi	$\sum f_i$
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	12
	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	15

Oluşturulan yeterli mafsalların homojen olarak dağıtılması ile oluşturulan yapısal gruplar tablo 5'te verilmiştir. Artık bu yapısal gruplara, hedeflenen serbestlik derecesi dikkate alarak ek mafsallar eklenmelidir. Bu kapsamda oluşturulan tasarımlar, yerleştirilen eyleyiciler ve toplam serbestlik dereceleri tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Oluşturulan yapısal gruplar (M=0)

Yapısal Gruplar
 <p style="text-align: center;">$B=3, j_p=11$ $c=4$</p>
 <p style="text-align: center;">$B=3, j_p=11$ $c=3$</p>

Tablo 6. Tekerlek ve eyleyicilerin yerleştirildiği tasarımlar ve toplam serbestlik dereceleri (M)

Tasarım	M
	3
	5

4. SONUÇ

Bu çalışmada, yazarların önerisini gerçekleştirdiği ve topolojiyi oluşturan elemanların komşuluk ilişkisine dayanan matematiksel bir yöntemin uygulama senaryosu detaylandırılmıştır. Sonrasında belirli bir tasarım kısıtı altında hedeflenen yapıların önerilen yapısal sentezlerinin gerçekleştirilmesi ve bu sürecin arka planı paylaşılmıştır. Olası topoloji sayısının yüksek olduğu ve manuel olarak çözümlemenin verimsiz olduğu senaryolarda bağlantı temelli

komşuluk dizey uygulamasının yapısal tasarım süreçlerinde etkinliği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Alizade, R., Bayram, Ç. (2004). Structural synthesis of parallel manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 39(8), 857-870. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.008.
- [2] Alizade, R. I. (1988). On degree of freedom of kinematic chain, *Azerbaijan Polytech: Automation Design of Mechanisms, Manipulators and Robots*, 3-14.
- [3] Alizade, R., Bayram, C., Gezgin, E. (2007). Structural synthesis of serial platform manipulators, *Mechanism and Machine Theory*, 42(5), 580-599. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2006.05.005.
- [4] Yan, H. S., Chiu, Y. T. (2015). On the number synthesis of kinematic chains, *Mechanism and Machine Theory*, 89, 128-144. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.012.
- [5] Crossley, F. E. (1964). A contribution to Gruebler's theory in the number synthesis of plane mechanisms, *J. Eng. Ind.* 86(1), 1-5. DOI 10.1115/1.3670442.
- [6] Davies, T. H., Crossley, F. E. (1966). Structural analysis of plane linkages by Franke's condensed notation, *Journal of Mechanisms*, 1(2), 171-183. DOI 10.1016/0022-2569(66)90021-8.
- [7] Soni, A. H. (1971). Structural analysis of two general constraint kinematic chains and their practical application, *J. Eng. Ind.*, 93(1), 231-238. DOI 10.1115/1.3427881.
- [8] Dobrjanskyj, L., Freudenstein, F. (1967). Some applications of graph theory to the structural analysis of mechanisms, *J. Eng. Ind.*, 89(1), 153-158. DOI 10.1115/1.3609988.
- [9] Mayourian, M., Freudenstein, F. (1984). The development of an atlas of the kinematic structures of mechanisms, *J. Mech., Trans., and Automation*, 106(4), 458-461. DOI 10.1115/1.3258594.
- [10] Manolescu, N. I. (1979). A unified method for the formation of all planar jointed kinematic chains and Baranov trusses, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 6(4), 447-454. DOI 10.1068/b060447.
- [11] Manolescu, N. I. (1979, July). The Unitary Method of Structural Synthesis of All the Planar Jointed Kinematic Chains (KCMJSL), In *Proceedings of the 5th World Congress on TMM* (Vol. 1, pp. 514-518).

- [12] Denavit, J., Hartenberg, R. S. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *J. Appl. Mech.*, 22(2), 215-221.
DOI 10.1115/1.4011045.
- [13] Raicu, A. (1974). Matrices associated with kinematic chains with from 3 to 5 members, *Mechanism and Machine Theory*, 9(1), 123-129.
DOI 10.1016/0094-114X(74)90013-5.
- [14] Tuttle, E. R., Peterson, S. W., Titus, J. E. (1989). Further applications of group theory to the enumeration and structural analysis of basic kinematic chains, *J. Mech., Trans., and Automation.*, 111(4), 494-497.
DOI 10.1115/1.3259027.
- [15] Tuttle, E. R., Peterson, S. W., Titus, J. E. (1989). Enumeration of basic kinematic chains using the theory of finite groups, *J. Mech., Trans., and Automation.*, 111(4), 498-503.
DOI 10.1115/1.3259028.
- [16] Yang, W., Ding, H., Kecskeméthy, A. (2022). Structural synthesis towards intelligent design of plane mechanisms: Current status and future research trend, *Mechanism and Machine Theory*, 171, 104715.
DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104715
- [17] Pucheta, M., Cardona, A. (2007). An automated method for type synthesis of planar linkages based on a constrained subgraph isomorphism detection. *Multibody System Dynamics*, 18, 233-258.
DOI 10.1007/s11044-007-9087-x.
- [18] Gezgin, E. (2019). Structural synthesis of parallel manipulators based on a different approach. *DEUFMD*, 21(61), 225-234.
DOI 10.21205/deufmd.2019216122.
- [19] Sozański, T. (1980). Enumeration of weak isomorphism classes of signed graphs, *Journal of Graph Theory*, 4(2), 127-144.
DOI 10.1002/jgt.3190040202.
- [20] Harary, F., Palmer, E. M., Robinson, R. W., Schwenk, A. J. (1977). Enumeration of graphs with signed points and lines, *Journal of Graph Theory*, 1(4), 295-308.
DOI 10.1002/jgt.3190010405.
- [21] Babai, L., Luks, E. M. (1983, December). Canonical Labeling of Graphs, In *Proceedings of the Fifteenth Annual ACM Symposium on Theory of Computing* (pp. 171-183).
DOI 10.1145/800061.808746.
- [22] Hou, A., Zhong, Q., Chen, Y., Hao, Z. (2014). A practical graph isomorphism algorithm with vertex canonical labeling, *J. Comput.*, 9(10), 2467-2474.
- [23] Stueckle, S. (1988). On natural isomorphisms of cycle permutation graphs, *Graphs and Combinatorics*, 4(1), 75-85.
DOI 10.1007/BF01864155.
- [24] Colbourn, C. J. (1981). On testing isomorphism of permutation graphs, *Networks*, 11(1), 13-21.
DOI 10.1002/net.3230110103.
- [25] Luks, E. M. (1986, October). Parallel Algorithms for Permutation Groups and Graph Isomorphism, In *27th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (sfcs 1986)* (pp. 292-302). IEEE.
DOI 10.1109/SFCS.1986.39.
- [26] Babai, L. (2016, June). Graph Isomorphism in Quasipolynomial Time, In *Proceedings of the forty-eighth annual ACM symposium on Theory of Computing* (pp. 684-697). DOI 10.1145/2897518.2897542.
- [27] Mustafa, J., Hasan, A., Khan, R. A. (2020). An application of modified path matrix approach for detection of isomorphism among epicyclic gear trains, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101, 463-472.
DOI 10.1007/s40032-020-00556-9.
- [28] Mowshowitz, A. (1972). The characteristic polynomial of a graph, *Journal of Combinatorial Theory*, Series B, 12(2), 177-193.
DOI 10.1016/0095-8956(72)90023-8.
- [29] Reddy, I. R., Reddy, C. V. K., Rao, Y. V. D., Shekar, A. C. (2020, December). Comparison of Tests for Isomorphism in Planetary Gear Trains. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 981, No. 4, p. 042023). IOP Publishing.
DOI 10.1088/1757-899X/981/4/042023.
- [30] Yadav, J. N., Pratap, C. R., & Agrawal, V. P. (1995). Detection of isomorphism among kinematic chains using the distance concept, *Journal of Mechanical Design*, 117(4). DOI 10.1115/1.2826728.
- [31] Sarkar, S. C., & Khare, A. K. (2004). Detecting the effect of uncertainty and isomorphism in 10 bar kinematic chains using all possible paths for motion transmission, *Mechanism and Machine Theory*, 39(8), 893-900.
DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2004.02.006.
- [32] Sun, W., Kong, J., Sun, L. (2017). The improved hamming number method to detect isomorphism for kinematic chain with multiple joints, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 11(5), JAMDSM0061-JAMDSM0061.

- DOI 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0061.
- [33] Rao, A. C. (1997). Hamming number technique — I. Further applications, *Mechanism and Machine Theory*, 32(4), 477-488. DOI 10.1016/S0094-114X(96)00064-X.
- [34] Shin, J. K., Krishnamurty, S. (1994). Development of a standard code for colored graphs and its application to kinematic chains, *Journal of Mechanical Design*, 116(1), 189-196. DOI 10.1115/1.2919345.
- [35] He, P. R., Zhang, W. J., Li, Q. (2002, January). Eigenvalue and Eigenvector Information of Graphs and Their Validity in Detection of Graph Isomorphism, In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 36533, pp. 421-428). American Society of Mechanical Engineers. DOI 10.1115/DETC2002/MECH-34247.
- [36] Cao, D., Yuan, H. (1993). Graphs characterized by the second eigenvalue, *Journal of Graph Theory*, 17(3), 325-331. DOI 10.1002/jgt.3190170307.
- [37] Kong, F. G., Li, Q., Zhang, W. J. (1999). An artificial neural network approach to mechanism kinematic chain isomorphism identification, *Mechanism and Machine Theory*, 34(2), 271-283. DOI 10.1016/S0094-114X(98)00035-4.
- [38] Bouritsas, G., Frasca, F., Zafeiriou, S., Bronstein, M. M. (2022). Improving graph neural network expressivity via subgraph isomorphism counting, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(1), 657-668. DOI 10.1109/TPAMI.2022.3154319.
- [39] Dargar, A., Khan, R. A., Hasan, A. (2010). Application of link adjacency values to detect isomorphism among kinematic chains, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 6, 157-162. DOI 10.1007/s10999-010-9119-1.
- [40] Cubillo, J. P., Wan, J. (2005). Comments on mechanism kinematic chain isomorphism identification using adjacent matrices, *Mechanism and Machine Theory*, 40(2), 131-139. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2004.07.004.
- [41] Rizvi, S. S. H., Hasan, A., Khan, R. A. (2016). A new method for distinct inversions and isomorphism detection in kinematic chains, *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, 3(1), 48-59. DOI 10.1504/IJMRS.2016.077039.
- [42] Dargar, A., Hasan, A., Khan, R. A. (2013). Some new codes for isomorphism identification among kinematic chains and their inversions, *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, 1(1), 49-67. DOI 10.1504/IJMRS.2013.051290.
- [43] Shukla, A., Sanyal, S. (2020). Gradient method for identification of isomorphism of planar kinematic chains, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 18(1), 45-62. DOI 10.1080/14484846.2017.1374815.
- [44] Yu, L., Wang, H., Zhou, S. (2022). Graph isomorphism identification based on link-assortment adjacency matrix, *Sādhanā*, 47(3), 151. DOI 10.1007/s12046-022-01918-y.
- [45] Yazıcı, M. V., Koçak, M., Uslu, T., Gezgin, E. (2025). Structural synthesis of platform type manipulators via connection-based adjacency matrix: topology generation, *Journal of Mechanical Design*, 147(1). DOI 10.1115/1.4065849.
- [46] Yazıcı, M. V., Koçak, M., Uslu, T., Gezgin, E. (2024, June). Methodological Joint Distribution for Platform Type Manipulator Topologies. In *IFTToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics* (pp. 33-42). Cham: Springer Nature Switzerland. DOI 10.1007/978-3-031-67383-2_4.
- [47] Gezgin, E., Ozdemir, S. (2011). Classification of manipulators of the same origin by virtue of compactness and complexity. *Mechanism and Machine Theory*, 46(10), 1425-1433. DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2011.05.009.