



## Ulaşım Ağlarında Graf Teori ile Dayanıklılık Analizi: İzmir İli Örneği

Hatice Şanlı Ağbaht<sup>1\*</sup> , Gülnaz Boruzanlı Ekinci<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Matematik Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Matematik Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye

\*İletişimden sorumlu yazar: haticesanli14@gmail.com

### Özet

Kent içi ulaşım ağları, verimli ve güvenilir ulaşımı sağlamada hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada, İzmir (Türkiye) kent içi ulaşım ağına graf teorisi yöntemlerini uygulayarak ağın bağlantıyı koruma ve kesintilere karşı direnme kapasitesi değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, kilit istasyonları güçlendirme ve zayıf bağlantı noktalarını tespit etme yoluyla ağın dayanıklılığını artırma potansiyeline sahiptir. Şehir plancıları ve karar vericiler, İzmir'in ulaşım ağlarının güvenilirliğini ve verimliliğini geliştirmek için bu graf tabanlı yöntemi kullanabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Çizge (graf) teorisi, ağ analizi, merkezilik analizleri

### Giriş

Günümüzde İzmir gibi hızla büyüyen metropoller, artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte giderek karmaşıklaşan ulaşım altyapılarıyla karşı karşıyadır. Raylı sistemler (metro, tramvay vb.), otobüs hatları ve diğer ulaşım seçeneklerinin entegrasyonu, bu karmaşıklıkta daha da artırmaktadır. Bu bağlamda, İzmir'in ulaşım ağının sürdürülebilirliği ve dayanıklılığını inceleyerek iyileştirme stratejileri geliştiren bu çalışma, kentsel ulaşımın gelecekteki ihtiyaçlara uygun hale getirilmesi için önemli bir adımdır.

Son yıllarda kent içi ulaşım ağlarının dayanıklılığının analizinde çizge teorisine dayalı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Kesik ve arkadaşları (2021), İstanbul'un Fatih ilçesinde afet senaryoları kapsamında sağlık hizmetlerine erişilebilirliği ağ analizi teknikleriyle incelemiş, kritik ulaşım noktalarını tespit ederek afet sonrası müdahalelerin etkinliğini artırmaya yönelik önemli bulgular elde etmiştir. Öztemiz ve Karıcı (2022) tarafından Malatya'da yapılan benzer bir araştırma, çeşitli merkezilik algoritmaları (Pagerank, özvektör, yakınlık ve aradalık merkeziliği) uygulanarak, ulaşım ağındaki kavşakları analiz etmiş ve trafik akışında kritik rol oynayan kesişim noktaları ortaya konmuştur. Diğer yandan, Demirtaş ve arkadaşları (2023), İzmir kent içi ulaşım ağı üzerinde sokak ve caddeler düzeyinde gerçekleştirdikleri çizge tabanlı analiz ile, şehrin ulaşım ağının yapısal özelliklerini, merkezilik ve bağlantısallık gibi parametreler üzerinden kapsamlı biçimde ortaya koymuştur. Bu özgün yaklaşım, yalnızca ana yolları değil, İzmir'in tüm sokak ve caddelerini kapsayan detaylı bir analiz sunarak; ulaşımında kritik öneme sahip noktaların belirlenmesi ve kentsel planlama süreçlerine veri temelli katkı sağlanması açısından literatüre önemli bir katkı yapmaktadır. Bu tür çalışmalar, graf tabanlı analizlerin farklı kentlerde çeşitli ulaşım ağlarına başarıyla uyarlanabildiğini ve karar vericilere kent içi ağların güçlendirilmesi konusunda rehberlik ettiğini göstermektedir. Mevcut çalışmada da İzmir ili özelinde kent içi ulaşım ağının graf teorisiyle analiz edilmesi, literatürdeki bu yaklaşımlarla paralellik göstermekte ve yeni bir uygulama örneği sunmaktadır.

Bu çalışma, İzmir'e ait geniş kapsamlı ulaşım verilerinin toplanması ve analiziyle başlamıştır. Toplanan veriler, Gephi platformu üzerinden oluşturulan graf modeliyle çeşitli algoritmalar ve parametreler kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz kapsamında dışmerkezlik (eccentricity), merkezilik (centrality), aradalık merkeziliği (betweenness centrality) ve özvektör merkeziliği (eigenvector centrality) gibi metrikler kullanılmış, ayrıca graf kümeleme(modularity) algoritmasıyla birbirine yakın istasyon gruplarını ve bu gruplar arasındaki geçişleri inceleyerek kritik istasyonlar belirlenmiştir. Bulgular, yüksek aradalık ve özvektör merkeziliği değerine sahip istasyonların ağın bütünlüğünü korumada önemli bir konumda olduğunu göstermektedir. Bu analizler, ulaşım ağının potansiyel kırılma noktalarını tespit etmenin yanı sıra, beklenmeyen durumlarda ağın işlevselliğini ve risklerini önceden belirlemeyi amaçlamaktadır.

Sonuç olarak çalışma, İzmir'in ulaşım ağına dair güvenlik, verimlilik ve sürdürülebilirlik konularında değerli bilgiler sunarak şehrin ulaşım ihtiyaçlarına daha etkili çözümler üretilmesine katkı sağlamıştır. Ayrıca, bu yaklaşım yalnızca İzmir'deki ulaşım sorunlarına çözüm geliştirmekle kalmayıp

aynı zamanda Türkiye'nin hatta uluslararası düzeyde diğer şehirlerin ulaşım altyapısının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

## Temel Tanımlar

### Graf Teorisi (Graph Theory)

Graf, elemanları tepe olarak adlandırılan sonlu, boş olmayan  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  tepeler kümesi ve elemanları ayrıt olarak adlandırılan sonlu  $E$  ayrıtlar kümesinden oluşan  $(V, E)$  ikili yapısına denir.  $G = (V, E)$  ya da kısaca  $G$  ile gösterilir (Gök, Kızılırmak & Eren, 2014). Bir graf, ayrıt ve tepeler arasındaki ilişkiyi gösterir. Çalışmada tepeler durakları temsil ederken ayrıtlar ise bu duraklardan geçen ulaşım araçları hatlarını temsil etmektedir.

### Dışmerkezlik (Eccentricity)

Bağlı bir  $G$  grafını ele alalım ve  $d(u, v)$ ,  $u$  ile  $v$  tepe noktalarının arasındaki mesafeyi gösterebilir.  $u$  tepesinin dışmerkezliği (eccentricity),  $u$ 'dan en uzak tepenin ağda ne kadar uzakta konumlandığını gösterir ve  $e(u) = \max\{d(u, v) \mid v \in V(G)\}$  şeklinde tanımlanır. Ağın yarıçapı (radius), tüm dışmerkezlik değerlerinin en küçüğü olarak tanımlanır ve  $rad(G) = \min\{e(u) \mid u \in V(G)\}$  değerine eşittir ve ağdaki tepe noktalarının gerçekte ne kadar birbirinden uzak olduğunu gösteren bir ölçüttür. Son olarak, bir ağın çapı (diameter), ağdaki en uzun mesafeyi ifade eder ve  $diam(G) = \max\{d(u, v) \mid u, v \in V(G)\}$  biçiminde gösterilir (Van Steen, 2010).

### Aradalık Merkezliği (Betweenness Centrality)

Aradalık merkezliği, bir tepenin, ağdaki diğer tepeler arasındaki en kısa yollar üzerinde ne sıklıkla yer aldığını ölçen bir merkezlik ölçütüdür.  $G$  basit, bağlı bir graf olsun.  $S(x, y)$ ,  $x, y \in V(G)$  arasındaki en kısa yollar kümesi olsun ve  $S(x, u, y) \subset S(x, y)$ ,  $u \in V(G)$  tepesinden geçen yolları temsil etsin.  $u$  tepesinin aradalık merkezliği  $c_B(u)$  olarak tanımlanır (Van Steen, 2010).

$$c_B(u) = \sum_{x \neq y} \frac{|S(x, u, y)|}{|S(x, y)|}$$

### Özvektör Merkezliği (Eigenvector Centrality)

Özvektör merkezliği sadece doğrudan ilişkili tepeleri değil, dolaylı bağlantıları da ölçer. Bir ağdaki  $A$  tepesi merkezi bir  $B$  tepesiyle yakından bağlantılıysa, birçok ortamda  $A$  tepesi de merkezi olacaktır. Bu ilişki "bir bitişiklik matrisinin en büyük öz değerinin öz vektörü" ölçülerek elde edilir.

Girdileri  $a_{ij}$  olan bitişiklik matrisi  $A$  olsun. Bitişiklik matrislerinde  $i$  ve  $j$  tepeleri komşu ise  $a_{ij} = 1$ , değilse  $a_{ij} = 0$  olarak alınır.  $x_j$  bitişiklik matrisinin  $x$  özvektörünün elemanı ve  $\lambda$  ise  $x$  özvektörünün öz değeri olmak üzere, özvektör merkezliği,

$$C_E(v) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n a_{ij} x_j$$

ile tanımlanır (Bonacich, 1972).

### Modülerlik (Modularity)

Modülerlik, bir ağın kümeler veya topluluklara bölünmesinin gücünü ölçer. Modülerliği yüksek ağlar, modüller içindeki tepeler arasında yoğun bağlantılara, farklı modüllerdeki tepeler ile ise seyrek bağlantılara sahiptir. Biçimsel olarak, modülerlik, belirli gruplara giren ayrıtların kesrinden, ayrıtların rastgele dağıtılması durumunda beklenen bu kesrin çıkarılmasıyla elde edilir. Bu ölçümde kullanılan bazı temel semboller şunlardır:  $A_{vw}$  grafın tepe-kenar bağlantı matrisinin  $v$  ve  $w$  tepeleri arasındaki elemanı;  $k_v$  ve  $k_w$  sırasıyla  $v$  ve  $w$  tepelerinin bağlantı (derece) sayısını;  $m$ , toplam ayrıt sayısını;  $c_v$ ,  $v$  tepesinin ait olduğu topluluğu;  $\delta(c_v, c_w)$  ise  $v$  ve  $w$  tepeleri aynı topluluğa aitse 1, değilse 0 dönen Kronecker delta fonksiyonunu ifade eder. Bu tanımlara göre modülerlik şu şekilde hesaplanır:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{v,w} (A_{vw} - \frac{k_v k_w}{2m}) \delta_{c_v, c_w}$$

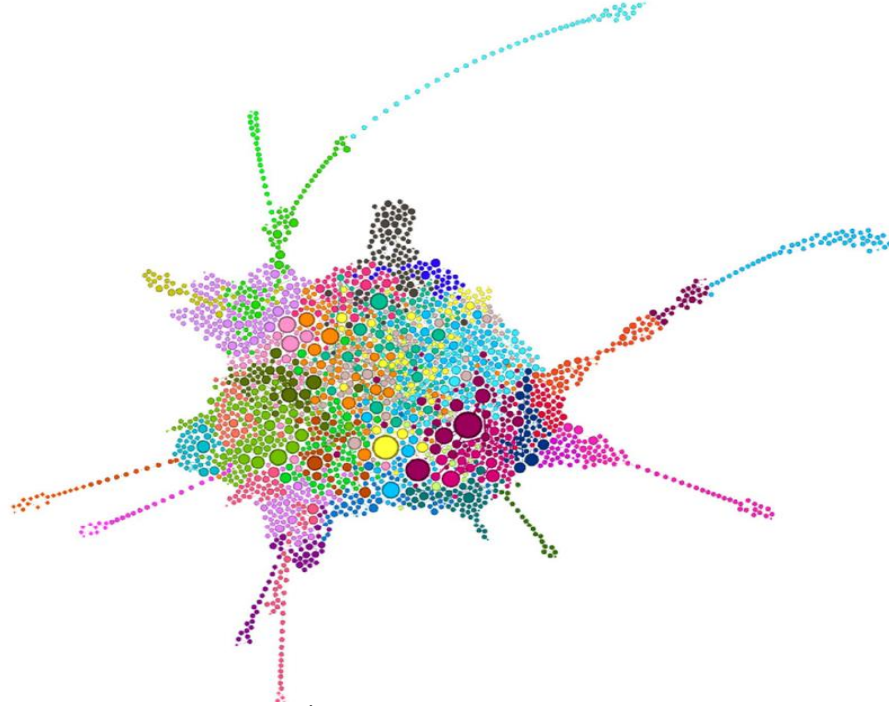
Modülerlik, bir ağın modüllere (ayrıca gruplar, kümeler veya topluluklar olarak da adlandırılır) bölünmesinin gücünü ölçmek için tasarlanmıştır (Hussian, Muhammad & Yakubu, 2018).

### Raylı Sistemlere Bağlı Otobüs Hatları

Çalışmada İzmir'in raylı ulaşım araçları (metro, izban ve iki ayrı tramvay hattı) ve İzmir metroya bağlı bütün Eshot otobüs hatları ele alınarak bir ağ oluşturulmuştur. Aynı zamanda birbirine beş

dakikalık yürüme mesafesi ya da daha kısa uzaklıkta olan duraklar birleştirilmiş (unify) ve bu duraklar tek bir durak adı altında toplanmıştır. Bu birleştirme işlemi, hem kullanıcıların daha kolay bir şekilde yön bulmalarını sağlamak hem de ağ modelini sadeleştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada ilk olarak İzmir'deki metro, izban, tramvay1, tramvay2 ve otobüs hatlarından oluşan ulaşım ağı veri setleri toplanmıştır. Bu veriler İzmir Büyükşehir Belediyesi ESHOT Genel Müdürlüğü resmî web sayfasından temin edilmiştir. Gephi platformu üzerinden oluşturulan ulaşım ağı graf modelinde tepeler durak ve istasyonları temsil ederken ayrıntılar bu duraklar arasındaki hatlar, yollar ve güzergahları temsil etmektedir. Oluşturulan bu ulaşım ağı graf modeli üzerinde graf algoritmaları ve aradalık merkeziliği, dışmerkezlik, özvektör merkeziliği, modülerlik parametreleri kullanılarak çeşitli analizler yapılmıştır. Bu analizler ile ağın dayanıklılığı, potansiyel kırılma noktaları ve risk unsurları belirlenmiştir.



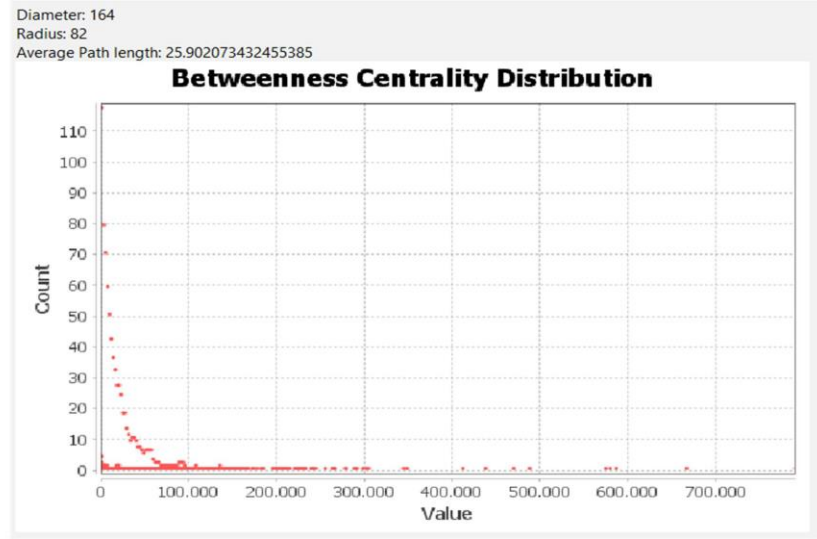
Şekil 1. İzmir ulaşım ağı modeli

Hat	Hat Adı	Hattın Bağlandığı Raylı Araç	Mesafe-Süre
17,8,82,167,305,321,671,675,684,690,873,883,909,969,971,975,981,982,983,984,985,987	Fahrettin Altay Aktarma Merkezi-51921-51918-51923-51915-51930-51934-51916-51933-51925-51938-51937-51914-51929,51939-51951-51922-51940	Fahrettin Altay-Metro	
5,6,7,8,82,321,551,909,950,975,981,982,983,984,985,987	Şehitlik -50042	100.Yıl Cumhuriyet Şehitlik- Metro	190m-2dk
5,6,7,8,82,305,321,551,909,950,971,975,981,982,983,984,985,987	İzsu -50026	Güzel Sanatlar-Metro	240m-3dk
5,6,7,8,82,305,321,551,909,950,971,975,981,982,983,984,985,987	Dokuz Eylül -50022	Dokuz Eylül Üniversitesi Hastanesi-Metro	350m-4dk
5,6,7,8,82,305,311,321,551,909,950,971,975,981,982,983,984,985,987	Çağdaş İstasyon- 50016	Çağdaş-Metro	80m-1dk

Şekil 2. Örnek birleştirme (unify) tablosu

## Yapılan Analizler

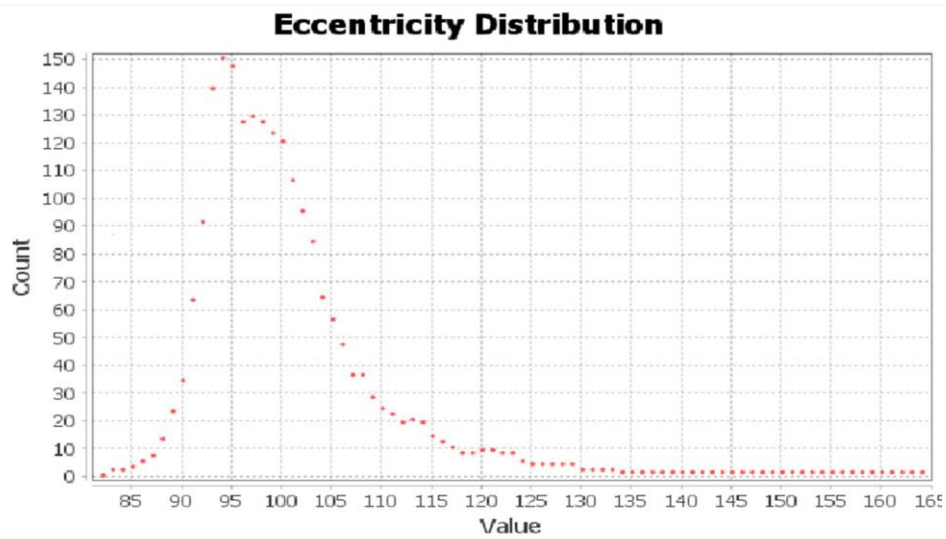
### Aradalık Merkeziliği Dağılımı (Betweenness Centrality Distribution)



Şekil 3. Aradalık merkeziliği dağılımı grafiği

Grafikte aradalık merkeziliği dağılımı üzerinden yapılan analiz bulunmaktadır. Grafikte X eksen aradalık merkeziliği değerlerini gösterirken Y eksen ise bu değerlere sahip tepeler sayılarını temsil etmektedir. Çap (Diameter) 164, yarıçap (Radius) 82 ve ortalama yol uzunluğu 25.9 olan bu ağ, geniş bir ulaşım ağına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak aradalık merkeziliği değerlerinin büyük bir kısmı 0 ile 100.000 arasında yoğunlaşmıştır. Bu da tepelerin çoğunun düşük merkezilik değerlerine sahip olduğunu, dolayısıyla ağın iç bölgelerinde bulunup köprü işlevi görme eğilimlerinin zayıf olduğunu gösterir. 400.000 üzerindeki yüksek merkezilik değerlerine sahip tepeler oldukça azdır ve bu tepeler ağda kritik köprü noktalarını oluşturur. Özellikle 600.000 veya 700.000'e yaklaşan değerlerdeki tepeler, stratejik ve kritik bağlantılar olarak öne çıkmaktadır. Bu tepelerin devre dışı kalması, ulaşım ağının verimliliğini ciddi şekilde etkileyebilir. Genel olarak, ulaşım ağı büyük ölçüde düşük merkezilik değerlerine sahip tepelerden oluşurken, birkaç kritik tepe ana trafik yükünü taşımaktadır.

### Dışmerkezlik Raporu (Eccentricity Distribution)

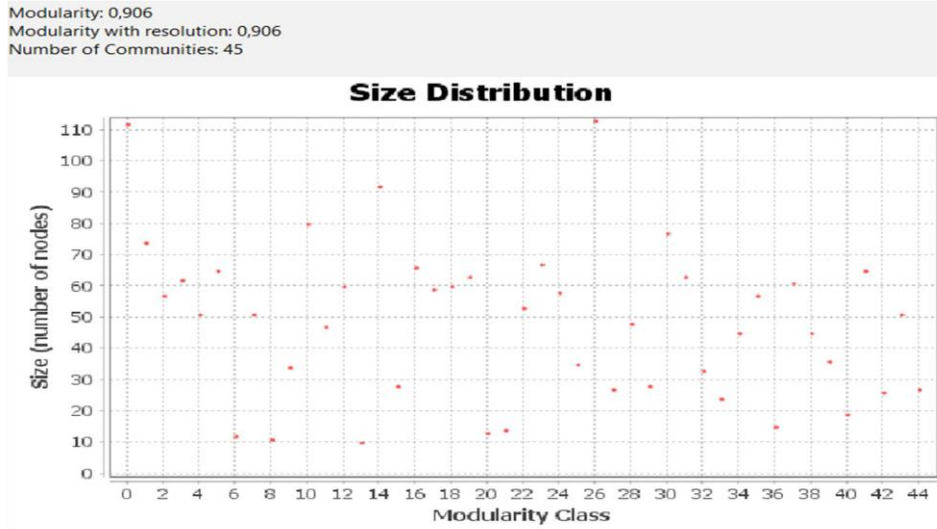


Şekil 4. Dışmerkezlik dağılımı grafiği

Grafikte dışmerkezlik dağılımı üzerinden yapılan analiz bulunmaktadır. Dışmerkezlik, bir tepenin diğer tüm tepelere olan en uzak mesafesini ifade etmekteydi ve genellikle tepenin ağın merkezine göre ne kadar "uçta" olduğunu anlamak için kullanılır. X eksen dışmerkezlik değerlerini, Y eksen ise bu

değerlere sahip tepelerin sayısını göstermektedir. Grafikte dışmerkezlik değerleri 85 ile 165 arasında değişmekte olup, en sık rastlanan değerler 95-105 aralığındadır. Bu aralıkta tepe sayısı yaklaşık 140-150 civarındadır ve bu durum, tepelerin çoğunun benzer mesafe profiline sahip olduğunu göstermektedir. Dağılım sağa çarpık bir yapı sergilemektedir, bu da az sayıda tepenin daha yüksek dışmerkezlik değerlerine sahip olduğunu ve bu tepelerin ağın kenar bölgelerinde yer aldığını gösterir. 120'den sonra tepe sayısı hızla azalırken, 160 üzerindeki dışmerkezlik değerlerinde neredeyse sıfıra ulaşmaktadır. Bu dağılım, ağdaki tepelerin (durakların) çoğunun merkezi bir yapıda toplandığını, ancak bazı tepelerin daha uzak konumlarda olduğunu ortaya koymaktadır.

### Modülerlik Dağılımı (Modularity Distributions)



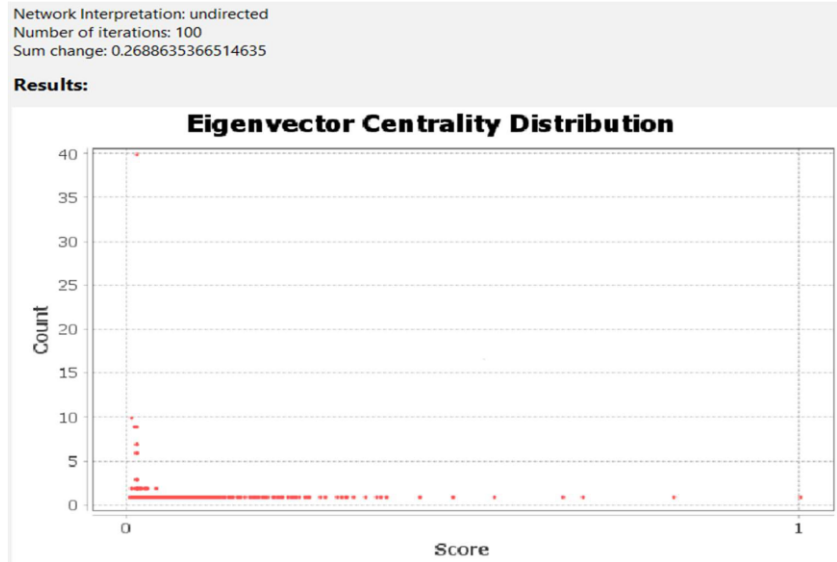
Şekil 5. Modülerlik dağılımı grafiği

Grafikte modülerlik dağılımı üzerinden yapılan analiz bulunmaktadır. Grafikte, X eksen (Modularity Class), topluluk numaralarını (0'dan 44'e kadar) gösterirken, Y eksen (Size) ise her topluluğun büyüklüğünü, yani o topluluktaki tepe sayısını belirtmektedir. Ağın modülerite değeri 0,906'dır. Bu değer, ağın oldukça modüler olduğunu, yani belirli bölgelerde yoğunlaşmış tepelerin olduğunu gösterir. Modülerite değeri 1'e ne kadar yakınsa, ağ o kadar net ve güçlü topluluklara ayrılmış olur. İzmir ulaşım ağına baktığımızda, bu durum, otobüs durakları veya istasyonlar gibi tepelerin belirli bölgelerde yoğunlaştığını ifade eder. Algoritma, 45 topluluk tespit etmiştir. Bu da elde edilen ağın 45 ayrı bölüme ayrılarak incelenebileceğini ifade eder.

### Özvektör Merkeziliği Dağılımı (Eigenvector Centrality Distributions)

Grafikte özvektör merkeziliği dağılımı üzerinden yapılan analiz bulunmaktadır. Özvektör merkeziliği, bir tepenin merkeziliğini belirlerken sadece doğrudan bağlantılarını değil, aynı zamanda bu bağlantıların merkeziliğini de dikkate almaktadır. Bu nedenle yüksek merkezilik skoru olan tepeler, önemli tepelere bağlı olan merkezi noktalar olarak kabul edilir. Grafikte, merkezilik değerlerinin çoğu 0 ile 0.2 arasında yoğunlaşmış ve bu durum, ağdaki tepelerin büyük çoğunluğunun düşük merkezilikli olduğunu ve merkezi noktalara doğrudan bağlanmadığını gösteriyor. Ancak, sağ uçta birkaç yüksek merkezilik skoru sahip tepe bulunmaktadır. Bunlar, ağın merkezi noktaları ya da kritik geçiş noktaları olabilir. Bu yapı, ağda bazı merkezilerin çok daha kritik bir rol oynadığını ve diğer tepelerin bu merkezlere bağlı olduğunu ortaya koyuyor. Özellikle ulaşım ağı için bu merkezler, ana istasyonlardır.

İzmir ili ulaşım ağı üzerinde yapılan bu analizlerde Aradalık merkeziliği, özvektör merkeziliği, ve dışmerkezlik parametreleri üzerinde yoğunlaşmış ve bu parametrelere göre veriler ayrı ayrı sıralanmış ve dışmerkezliği en düşük olan ilk 40 durak, Aradalık merkeziliği en yüksek olan ilk 40 durak ve özvektör merkeziliği en yüksek olan ilk 40 durak ele alınarak bu üç ölçüt üzerinden detaylı analiz yapılmıştır.



Şekil 6. Özvektör merkeziliği dağılımı grafiği

**Aradalık Merkeziliği (Betweenness Centrality) (En Yüksek İlk 40 Durak)**

ID	Label	Degree	Modularity Class	Eccentricity	Betweenness Centrality	Eigenvector Centrality
221	* Moda - 14500	11	2	89.0	78.951.773.308	0.811771
46	Bayraklı	8	10	92.0	665.324.913.469	0.286927
47	Turan	5	14	93.0	585.244.483.333	0.135994
17	*Fahrettin Altay	13	2	88.0	578.165.614.588	1.0
108	*Fahrettin Altay Meydan 9 - 50004	7	2	87.0	573.451.859.511	0.545139
7	Halkapınar	8	10	90.0	487.105.314.857	0.336315
704	Piyale - 30956	5	29	91.0	468.792.414.716	0.230613
8	Hilal	4	10	89.0	436.581.283.516	0.325932
1212	Kampüs Çıkışı - 41333	4	26	90.0	410.812.629.455	0.267156
823	Ege Üniversitesi Hastanesi - 30255	6	26	91.0	347.179.187.628	0.255698
38	Eşbaşı	8	18	90.0	343.289.107.505	0.353899
627	*Çeşme Otoban Kavşağı - 50385	5	2	88.0	303.388.575.126	0.201523
3	Bornova	8	26	92.0	300.585.285.353	0.238763
595	Naldöken - 20062	3	14	94.0	297.022.333.333	0.052539
140	Benzin İstasyonu - 50386	3	0	85.0	290.442.933.333	0.123887
43	Kemer	8	15	92.0	290.371.308.587	0.27083
139	Çiçek Mezarı - 50388	3	0	85.0	287.597.683.333	0.045968
1354	Karaoğlu - 50390	3	36	84.0	278326.05	0.030951
42	Şirinyer	8	5	93.0	276.890.358.244	0.249628
4	Bölge	6	26	91.0	265.450.095.051	0.22872
1353	Çardak Kahve - 50394	2	36	83.0	264320.0	0.022019
467	Otogar Benzinlik - 31556	7	7	92.0	262.996.077.038	0.205326
1352	Necdet Tokatlıoğlu - 50378	3	36	82.0	262731.0	0.024915
593	Soğukkuyu Trafik - 20066	4	14	96.0	254.333.583.333	0.047922
1995	Yelki - 50396	2	36	83.0	243215.0	0.018626
1994	Market - 50398	2	36	84.0	241262.0	0.019159
1993	Kent Koleji - 50400	3	36	85.0	239865.0	0.027319
594	Öztürk - 20064	2	14	95.0	238.302.333.333	0.031789
48	Naldöken	2	14	94.0	231.547.066.667	0.04096
1341	Yelki Villakent - 50402	3	36	85.0	231408.0	0.027316
49	Alaybey	2	14	95.0	229606.4	0.01924
55	Çiğli	4	32	101.0	228.566.166.667	0.049176
50	Karşıyaka	2	14	95.0	227.673.066.667	0.01501
51	Nergiz	2	14	97.0	225.744.733.333	0.0145
52	Demirköprü	2	14	98.0	223825.9	0.015396
1272	Atölye - 30338	3	7	93.0	223.620.463.023	0.077369
1340	Mermerci - 51941	2	36	87.0	223202.0	0.01913
54	Mavişehir	3	14	100.0	223.027.816.667	0.033259
542	Türkan Özilhan Devlet Hastanesi - 31457	5	13	95.0	222.870.759.925	0.059168
53	Semikler	2	14	99.0	221.921.233.333	0.019601

Şekil 7. Aradalık merkeziliği en yüksek ilk 40 durak

Aradalık merkeziliği analizi, ağ trafiğini yönlendiren kritik durakları ortaya koymaktadır. **Moda**, düşük bağlantı (degree) (11) değerine rağmen en yüksek aradalık merkeziliği ile kritik bir merkez konumundadır. **Fahrettin Altay**, yüksek degree (13) ve merkezilik değeriyle önemli bir konumdadır. **Turan** ise az bağlantıya rağmen yüksek aradalık merkeziliği ile ağ içinde kritik bir rol üstlenmektedir.

Modülerite (Modularity Class) analizi, yüksek aradalık merkeziliğine sahip durakların yalnızca kendi toplulukları içinde değil, aynı zamanda topluluklar arasında da köprü görevi üstlendiğini göstermektedir. **Moda** ve **Fahrettin Altay** kendi gruplarının merkezindeyken, **Esbaş** ve **Halkapınar** topluluklar arası geçişi sağlamaktadır. Dışmerkezlik analizi, merkezi durakların genellikle düşük dışmerkezlik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda, **Moda** ve **Fahrettin Altay**, ağın merkezine daha yakın konumlanmıştır. Özvektör merkeziliği analizi, durakların ağ üzerindeki çevresel etkisini ölçmektedir. **Fahrettin Altay**, maksimum değer (1.0) ile en etkili durak olarak öne çıkarken, **Moda** 0.81 değeriyle onu takip etmektedir. Ancak **Bayraklı** ve **Turan**, yüksek aradalık merkeziliğine sahip olsalar da sınırlı çevresel bağlantıları nedeniyle daha düşük özvektör merkeziliği değerleri sergilemektedir.

### Dışmerkezlik (Eccentricity) (En Düşük İlk 40 Durak)

ID	Label	Degree	Modularity Class	Eccentricity	Betweenness Centrality	Eigenvector Centrality
1352	Necdet Tokatlıoğlu - 50378	3	36	82.0	262731.0	0.024915
1353	Çardak Kahve - 50394	2	36	83.0	264320.0	0.022019
1995	Yelki - 50396	2	36	83.0	243215.0	0.018626
1351	Yelki Üçyol - 50468	2	36	83.0	15735.0	0.017696
1354	Karaoğlu - 50390	3	36	84.0	278326.05	0.030951
1994	Market - 50398	2	36	84.0	241262.0	0.019159
1350	Köşe - 50470	2	36	84.0	13562.0	0.015194
139	Çiçek Mezrası - 50388	3	0	85.0	287.597.683.333	0.045968
1993	Kent Koleji - 50400	3	36	85.0	239865.0	0.027319
1355	Basket Sahası - 50756	2	11	85.0	12.587.216.667	0.018872
1349	Tokatlıoğlu - 50472	2	36	85.0	11391.0	0.015169
140	Benzin İstasyonu - 50386	3	0	86.0	290.442.933.333	0.123887
1341	Yelki Villakent - 50402	3	36	86.0	231408.0	0.027316
1356	Göksu - 50754	2	11	86.0	10.442.716.667	0.015242
1348	Yelki Belediye - 50474	2	36	86.0	9330.0	0.017486
138	Uğur Koleji - 52037	2	11	86.0	8.811.466.667	0.021253
2191	Barış Sitesi - 50484	2	36	86.0	5625.0	0.018338
108	*Fahrettin Altay Meydan 9 - 50004	7	2	87.0	573.451.859.511	0.545139
1340	Mermerci - 51941	2	36	87.0	223202.0	0.01913
1357	Yamaçevler - 50742	2	11	87.0	8.305.916.667	0.014401
1347	Yelki Sağlık Ocağı - 50476	3	36	87.0	7393.0	0.023685
137	Ata - 52035	2	11	87.0	6.650.466.667	0.015572
1342	Yelki Kavşak - 50486	2	36	87.0	4806.0	0.018338
141	Otoban Kavşağı - 50384	2	0	87.0	3.522.066.667	0.048908
2192	İnci - 50482	2	36	87.0	3448.0	0.015194
17	*Fahrettin Altay	13	2	88.0	578.165.614.588	1.0
627	*Çeşme Otoban Kavşağı - 50385	5	2	88.0	303.388.575.126	0.201523
1339	Çamlı Villaları - 50404	2	36	88.0	221222.0	0.018419
64	Üçkuyular	6	2	88.0	125.651.536.256	0.646875
107	Beyaz - 50008	4	2	88.0	114.508.456.411	0.385155
142	Konutlar - 50382	4	0	88.0	58.014.201.317	0.08808
1245	Mehmetçik - 10503	4	2	88.0	26.423.075.216	0.311775
980	İkiztepe - 50138	4	2	88.0	20.021.271.362	0.370407
1358	Teras Evler - 50744	2	11	88.0	6.182.366.667	0.014394
136	Güzeltepe - 52033	2	11	88.0	4.503.466.667	0.014418
1343	Güzelbahçe Kolej - 52055	2	36	88.0	2630.0	0.015194
1346	Şehit Abdullah Tayyip Ölçök Anadolu İmam Hatip Lisesi - 52014	2	36	88.0	2312.0	0.017467
2193	Yelki Pazar Yeri - 50480	2	36	88.0	1273.0	0.014522
2195	Yelki Yeldeğirmeni - 52145	2	36	88.0	1061.0	0.017467
221	*Moda - 14500	11	2	89.0	78.951.773.308	0.811771

Şekil 8. Dışmerkezliği en düşük ilk 40 durak

Dışmerkezlik analizinde, en düşük dışmerkezlik değeri 82 olup, bu durum ilgili durakların İzmir ulaşım ağı içinde erişim açısından merkezi konumda olduğunu göstermektedir; düşük dışmerkezlik,

diğer tepelere hızlı erişimi ifade eder. Öne çıkan duraklar arasında **Fahrettin Altay** ve **Moda** yer almakta olup, her ikisi de yüksek özvektör merkeziliği ve merkezi konumlarıyla dikkat çekmektedir. Özellikle **Fahrettin Altay**, 1.0 değeriyle ağın en etkili ve bağlantılı durağıdır. **Çeşme Otoban Kavşağı** ve **Üçkuyular** gibi duraklar ise yüksek aradalık merkeziliği değerleriyle trafiğin yoğun geçtiği kritik noktalar. Modularity sınıfları, ağın alt topluluklarını ifade ederken, bazı önemli durakların aynı sınıfta (örneğin 2 veya 36) yer alması, bu durakların aynı bölgedeki hatları ve yolcu akışını birbirine bağladığını göstermektedir. Düşük dışmerkezliğe sahip duraklardan **Fahrettin Altay** ve **Moda**, Yüksek Aradalık ve özvektör merkeziliği değerleriyle ağdaki bilgi ve yolcu akışında kritik roller üstlenmektedir.

Orta düzeyde özvektör ve Aradalık merkeziliği değerlerine sahip **Mehmetçik** ve **İkiztepe** durakları da düşük dışmerkezlik ile ağın merkezi bağlantı noktalarından biridir.

### Özvektör Merkeziliği (Eigenvector Centrality) (En Yüksek İlk 40 Durak)

ID	Label	Degree	Modularity Class	Eccentricity	Betweenness Centrality	Eigenvector Centrality
17	*Fahrettin Altay	13	22	88.0	578.165.614.588	1.0
221	*Moda - 14500	11	2	89.0	78.951.773.308	0.811771
65	AASSM	8	2	89.0	14.941.382.427	0.676838
64	Üçkuyular	6	2	88.0	125.651.536.256	0.646875
108	*Fahrettin Altay Meydan 9 - 50004	7	2	87.0	573.451.859.511	0.545139
296	Fahrettin Altay t1	5	2	89.0	177.517.718	0.483991
12	Üçyol	12	4	92.0	41.284.046.184	0.434894
107	Beyaz - 50008	4	2	88.0	114.508.456.411	0.385155
222	Hava Hastanesi - 10177	3	2	89.0	39.131.349	0.376814
980	İkiztepe - 50138	4	2	88.0	20.021.271.362	0.370407
38	Esbay	8	18	90.0	343.289.107.505	0.353899
7	Halkapınar	8	10	90.0	487.105.314.857	0.336315
8	Hilal	4	10	89.0	436.581.283.516	0.325932
18	Balgova	4	2	89.0	51.610.694.672	0.324657
1081	Fahrettin Altay Meydan 8 - 10502	3	2	89.0	10.586.924.784	0.318543
245	Mehmetçik - 10503	4	2	88.0	26.423.075.216	0.311775
298	Konak t1	6	15	90.0	139.645.281.035	0.294406
46	Bayraklı	8	10	92.0	665.324.913.469	0.286927
43	Kemer	8	15	92.0	290.371.308.587	0.27083
212	Kampüs Çıkış - 41333	4	26	90.0	410.812.629.455	0.267156
11	Konak	6	5	91.0	122.671.084.233	0.263594
823	Ege Üniversitesi Hastanesi - 30255	6	26	91.0	347.179.187.628	0.255698
44	Alsancak Gar	6	15	93.0	166.410.049.788	0.249687
42	Şirinyer	8	5	93.0	276.890.358.244	0.249628
1060	Altıncı Sanayi Kavşağı - 10659	3	18	90.0	194.123.642.744	0.249318
841	Liman - 10424	7	15	93.0	183.555.925.122	0.24506
294	Meşale - 10562	5	2	90.0	79.666.597.721	0.244388
3	Bornova	8	26	92.0	300.585.285.353	0.238763
16	Poligon	4	2	89.0	56.484.160.105	0.238294
297	Halkapınar t1	7	29	91.0	92.475.023.838	0.230727
704	Piyale - 30956	5	29	91.0	468.792.414.716	0.230613
4	Bölge	6	26	91.0	265.450.095.051	0.22872
220	Kavacık Yolu - 50712	4	2	90.0	34.591.748.196	0.225268
258	Asmalı - 12234	5	21	90.0	123.334.480.719	0.223258
6	Stadyum	7	29	91.0	177.074.731.187	0.218382
20	Dokuz Eylül Üniversitesi Hastanesi	8	1	91.0	103.453.617.413	0.216409
19	Çağdaş	5	1	90.0	98.631.780.097	0.208237
467	Otogar Benzinlik - 31556	7	7	92.0	262.996.077.038	0.205326
72	Gazi Bulvarı	6	15	91.0	29.453.702.624	0.202046
627	*Çeşme Otoban Kavşağı - 50385	5	2	88.0	303.388.575.126	0.201523

Şekil 9. Özvektör merkeziliği en yüksek ilk 40 durak

Özvektör Merkeziliği, bir durağın yalnızca doğrudan bağlı olduğu noktalarla değil, aynı zamanda bu durakların ağdaki önem derecesiyle ilişkilidir. Bu bağlamda, **Fahrettin Altay**, **Moda** ve **Üçkuyular** gibi duraklar yüksek özvektör merkeziliği değerleriyle ağın merkezi yapısında kritik roller üstlenmektedir. Ayrıca, bu durakların yüksek aradalık merkeziliği değerlerine sahip olması, onların ağ

üzerindeki yolculuklarda önemli geçiş noktaları olduğunu göstermektedir. Düşük dışmerkezlilik değerleri ise, bu durakların diğer duraklara ortalama olarak daha yakın konumlandığını ve merkezi yerleşim bölgelerinde bulunduğunu ifade etmektedir. Modularite sınıfı verileri, farklı alt ağlara (bölgelere) ait olan durakların da ağın genelinde önemli roller üstlendiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, **Fahrettin Altay** (Modularity Class: 2) ve **Alsancak Gar** (Modularity Class: 6) gibi duraklar, farklı alt ağları temsil etseler de yüksek özvektör merkeziliği değerleriyle bu bölgeler arasındaki bağlantıyı güçlendirmektedir. Bu özellik, durakların hem yerel hem de genel ağ yapısında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

### Sonuçlar

Sonuç olarak, üç merkezilik ölçütünün birleşik analizine göre Moda ve Fahrettin Altay durakları, yüksek aradalık ve özvektör merkeziliği ile ağın omurgasını oluşturmakta; düşük dışmerkezlilik değerleriyle de merkezi konumlarını ortaya koymaktadır. Çeşme Otoban Kavşağı, Fahrettin Altay Meydan 9, Üçkuyular, Halkapınar ve Esbaş duraklarının yüksek aradalık merkeziliği değerleri, bu noktaların topluluklar arası geçişte köprü görevi üstlendiğini göstermektedir. Bu durakların işlevselliğini kaybetmesi, ağın bütünlüğünü ve sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle söz konusu duraklarda altyapı güçlendirme çalışmaları yapılması gerekmektedir.

Öte yandan, Bayraklı ve Turan gibi duraklar yüksek aradalık merkeziliğine sahip olmalarına karşın, düşük özvektör merkeziliği değerleri, bu durakların çevresel bağlantılarının sınırlı olduğunu ve potansiyellerinin tam olarak kullanılmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, Fahrettin Altay, Çeşme Otoban Kavşağı, Fahrettin Altay Meydan 9 ve Moda gibi stratejik duraklarda altyapının güçlendirilmesi, ayrıca bu durakların engelli bireyler için erişilebilirliğini artıracak uygulamaların hayata geçirilmesi önerilmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Bonacich, P. (1972). *Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification*. *Journal of Mathematical Sociology*, 2(1), 113–120.
- [2] Gök, G. K., Kızılırmak, G. Ö., & Eren, S. (2014). *Graf teoriye giriş*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- [3] Hussain, S., Muhammad, L. J., & Yakubu, A. (2018). Mining social media and DBpedia data using Gephi and R. *Journal of Applied Computer Science & Mathematics*, 12(1), 14–20.
- [4] Kesik, O. A., Aydınoglu, A. Ç., & Taştan, B. (2015). Ağ analizi tekniklerini kullanarak afetlerle başa çıkabilmede erişebilirlik: İstanbul Fatih ilçesi örneği. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 36, 79–91.
- [5] Demirtaş, S., Hasırcı, V., & Şahin, H. (2023). Çizge teorisi ile İzmir kent içi karayolu ulaşım ağının analizi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(1), 279-294.
- [6] Öztemiz, F., & Karcı, A. (2022). Malatya ili ulaşım ağı kavşak noktalarının merkezlilik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(1), 511–528.
- [7] Van Steen, M. (2010). *Graph theory and complex networks*. Amsterdam, Netherlands.