

İstanbul Toplu Taşıma Ağrı Analizi

Ahmet Emre Aladag¹

¹Boğaziçi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul
emre.aladag at boun.edu.tr

Özet: Trafik sıkışıklığı, günümüz metropollerinin en büyük sorunlarından birisidir. Dünyada her gün milyonlarca saat trafik sebebiyle boş gitmekte, çalışanların ve öğrencilerin verimi düşmektedir. Trafığı azaltmak için trafiğe katkıda bulunan etkenlerin tespit edilip çözüm yoluna gidilmesi elzemdir. Çözüme yönelik olarak sorunun asıl kaynağı iyice tespit edilmelidir. Hatalı tasarlanan ulaşım altyapıları yahut plansız kentleşme bu kaynakların en önemlilerindendir. Bu çalışma, İstanbul'daki toplu taşıma ağının analiz edilerek şehirdeki yapısal darboğazların tespit edilmesini amaçlamaktadır. Otobüs güzergahlarının konumsal ağ şeklinde kurgulanıp analiz edilmesiyle trafik yoğunluğunun oluşabileceği noktalar tespit edilmiştir ve tespitler gerçek hayat deneyimleriyle uyumludur.

Anahtar Kelimeler: veri görselleştirme, ağ bilimi, çizge, toplu taşıma, ulaşım ağı

Istanbul Public Transportation Network Analysis

Abstract: Traffic congestion is one of the major problems of metropolitan cities. Each day millions of hours are wasted due to traffic congestion in the world, causing reduction in productivity among workers and students. In order to reduce traffic congestion, it is required to figure out major factors contributing to the congestion. The faults in the design of the transportation infrastructures or unplanned urbanization are some among the most important factors. This study aims to detect bottlenecks in the transportation network of Istanbul via network analysis. We detected potential traffic congestion points using bus line route information represented as a spatial transportation network. Our detections are complying with our real life experience.

Keywords: visualization, network science, spatial graph, transportation network

1 Giriş

Son yıllarda şehirleşmenin ve araç sayısının artmasıyla birlikte büyük şehirlerde trafik sıkışıklığı sorunu baş göstermiştir. Trafik sıkışıklığının en önemli sebepleri arasında plansız kentleşme ve kontrollsüz göç yer almaktadır. Her geçen gün artan ve 2016 itibarıyle 14 milyonu geçen nüfusıyla İstanbul, trafik sıkışıklığının en yoğun olarak görüldüğü dünya şehirlerinden biridir. Bu çalışmadaki araştırma sorumuz ”Otomobil güzergahlarını inceleyerek İstanbul şehrindeki yapısal darboğazları (trafiğin sıkıştığı noktaları) tespit edebilir miyiz?” olacaktır. Analizlerimiz ağ tabanlı yapısal bir analizin gerçekte trafik yoğunluğu yaşanan noktaları tespit edebilmekte olduğunu göstermektedir. Çalışmamız için gerekli verileri İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin sunduğu Açık Veri platformu olan CitySDK sağlamaktadır.

yürütmüştür.

Toplu taşıma sistemlerinin çoklu ajan modellemesini yapan ve olası sorunları simüle etmeye yönelik çalışmalar da [5, 6, 7, 8] mevcuttur. Toplu taşıma sistemlerinde sorun yaşanabilecek zayıf noktaları tespit etmeye yönelik başlıca çalışmalar Scott ve ark. tarafından yürütülmüştür [9]. Şehirlerin büyümesiyle birlikte ulaşım ağlarının gelişimini inceleyen [10], trafik akışını, ulaşım planlamasını ve ağ gelişiminin ekonomisini ele almıştır. Trafik konusuna eğilen [11], yol genişliği, araç hızı gibi mikroskopik özellikleri kullanarak bir akış modeli üzerinden trafik dinamiklerini incelemiştir. LeBlanc ve ark. çalışmasında trafik akışının dengelenmesi üzerine çalışmalar [12] yürütülmüştür.

Pattnaik ve ark. genetik algoritma kullanarak transit güzergah tasarımları üzerinde çalışmalar [13] yürütürken, Baaj ve ark. transit ağ tasarımında bulusal algoritmaların kullanımını [14] önermiştir. Bununla birlikte Jian ve ark. en az sayıda duraksama yaparak en ekonomik seyahat edilebilecek bir ulaşım sistemi tasarlayan algoritma [15] geliştirmiştir. Goczylla ve ark. bir ulaşım ağında en optimal güzergahın tespiti için yönelik bulusal bir algoritma [16] geliştirmiştir. Mandl ve ark. de toplu taşıma sistemlerinin eniyileştirilmesi ve değerlendirilmesine yönelik çalışmalar [17] bulunmuştur. Sheffil ve ark. ise, olası bir afet durumunda şehrin boşaltılmasının en kısa ve güvenli sürede yapılabilmesi için bir çerçeveye [18] çizmiştir. Bununla birlikte İstanbul büyülüüğünde bir şehrin otobüs altyapısını ağ bazlı inceleyerek olası darboğazları tespit edecek uygulamaya yönelik bir çalışma bildiğimiz kadarıyla yoktur.

2 Literatür Araştırması

Ulaşım ağ analizi konusundaki çalışmalar [1, 2] çok eskiye dayansa da ağ biliminin ve simülasyon altyapılarının gelişmesi ve veri miktarının artmasıyla birlikte son yıllarda canlanmış, ağ temelli yapısal analizler, ulaşım altyapı planlamaları, tarife tablolarının belirlenmesi, trafiğin modellenmesi gibi çalışmalar görülmüştür.

Soh ve ark. Singapur tren taşıma ağının ve şehirleşme yapısının analizini yapmıştır [3] ancak hedefinde trafik sıkışıklığı yoktur. Derrible ve ark. metro ağlarının dayanıklılığını [4] incelemiştir. Lam ve ark. ise en verimli transit sistemini kurma amaçlı çalışmalar [1]

3 Yöntem

3.1 Veri Kaynağı

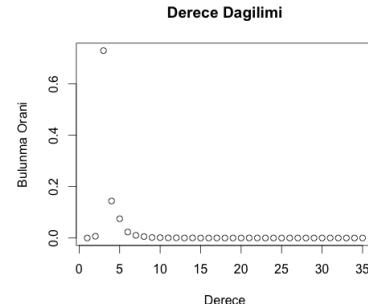
Bu çalışmada veri kaynağı olarak kullandığımız CitySDK, toplu taşıma sistemlerine dair açık veri sunulmasını amaçlayan AB tarafından desteklenen bir projedir. Proje, dünya çapında 8 şehirde denenmiştir, bunlardan birisi de İstanbul'dur. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, toplu taşıma bilgilerine ücretsiz erişim sağlayan bir API sunmaktadır. Bu API, İstanbul'daki otobüs hatlarının listesini ve bu hatların sırayla hangi duraklardan geçtiğini koordinatlarıyla birlikte sorgulama imkanı sunmaktadır. Biz de *Python* programlama dili ile yazılmış olan *Scrapy* sürüngen kütüphanesi ile hat listesini ve her güzergahta yer alan durakları koordinatlarıyla çektiğiz. Elde ettiğimiz verileri de *R* programlama dili ve *igraph*, *ggmap* gibi kütüphanelerini kullanarak işleyip görselleştirdik. Görselleştirdiğimiz veriler 07.07.2015 tarihinde güzergah bilgilerini baz almaktadır.

3.2 Veri Yapıları

API'dan aldığımız veriler genel olarak liste veri yapısındadır: hat listesi ve bir otobüsün takip ettiği güzergahtaki durakların listesi. İkinci listedeki her bir öğe, güzergah durakları sıralı verildiği için, ardışık olduğu öğelerle ilişkilidir. Biz de bu ilişkiyi kullanarak bir ağ (network/graph) oluşturduk. Bu ağda düğümleri otobüs durakları, kenarları ise iki durak arasındaki güzergah varlığı olarak tanımladık. Örneğin 59R hattı önce *Nispetiye*, sonra *Boğaziçi Üniversite* duraklarından (düğümlerinden) geçiyorsa $u = \text{Nispetiye}$, $v = \text{Boğaziçi Üniversite}$ olmak üzere iki düğüm arasında yönlü $e = (u, v)$ kenarı oluşturup $59R$ hat koduyla etiketledik.

Ağ görselleştirirken her bir düğüme API'dan elde ettiğimiz koordinatları görsel koordinat olarak atadık. Bu sayede düğüm konumları sabit kalarken kenarlar düğümler arasında görselleşmiş oldu. Bu görselleştirmede bir varsayımızın veri yetersizliği sebebiyle otobüslerin iki durak arasında kuş uçuşu doğrusal olarak gittikleri varsayımlı oldu. İleriki çalışmalarda coğrafi veri sistemlerinden alınacak yol koordinatları ile (kenar ara noktaları olarak belirlenerek) çok daha doğru ve yumuşak geçişli görseller elde edilebilir.

Durakları incelediğimizde aynı konumda farklı istikamette bulunan durakların ayrı duraklar olarak belirlendiğini gördük, bu durakları birleştirme gereği görmedik. Bu da hazırlayacağımız ağ yönlü hale getirdi. Bununla birlikte Kadıköy gibi çok sayıda durağın merkezi noktada bulunduğu ancak farklı kodlarla kodlandığı noktaların varlığını da keşfettik. Sonraki çalışmalarda yakın durakların tek durak varsayılmaması gibi bir yaklaşım benimsenebilir.



Şekil 1: Ağırlıklı Ulaşım Ağının Derece Dağılımı

4 Analiz

4.1 Çoklu Çizge

Öncelikle oluşturduğumuz yönlü ağı çoklu çizge (multigraph) şeklinde görselleştirdik. Bu çizge türünde iki düğüm arasında birden fazla kenar olabilmektedir. Bu durum kenarların üst üste binmesine sebep oldu ama yine de büyük resmi görme açısından Şekil 2a gibi açıklayıcı bir görsel üretti. Görselde düğümler siyah noktalarla temsil ediliyorken kenarlar sarı renkle temsil edildi. Ana arterlerde üst üste binen kenarlar sebebiyle kalınlaşmalar ve doğrusal kenar varsayımlımız sebebiyle birtakım kestirme kenarlar görülebilmiyor.

4.2 Ağırıklı Ulaşım Ağı

Şekil 2a'daki gibi bir veri yapısı ve görselleştirmesinde çok sayıda kenarın üst üste binmesi sebebiyle çok değerli bir bilgiyi kaybediyoruz: iki düğüm arasındaki kenar sayısı. Bu sebeple iki düğüm arasında geçen x adet kenar, ağırlığı $w(u, v) = x$ olan tek bir $e = (u, v)$ kenarına dönüştürdü. Bu sayede çoklu çizgeyi (Multigraph), tekil çizgeye (Regular graph) çevirmiştir. Ardından Şekil 2b görselinde kenar ağırlıklarını renk tonu ile temsil ettik: koyu kenarlar en çok hattın geçtiği, en yoğun kenarları temsil etmektedir.

Derece dağılımı (Şekil 1) incelendiğinde ise çoğu durağın 2-3 derecesinin olduğunu, yani ara durak olduğunu görüyoruz. En yüksek dereceli düğüm 34 (31 giden ve 3 gelen) bağlantı ile Kadıköy'deki Hamza Yerlikaya durağı olmuştur. Bunda Kadıköy merkez durağında yer alan her bir durağın farklı sayılmasının ve bu noktalardan kalkan otobüslerin Hamza Yerlikaya durağından geçmesinin etkisi vardır. Bu gürültünün kaldırılması için Kadıköy sahildeki tüm durakların tek bir durak sayılması faydalı olacaktır.

4.3 Kenar Arasındalığı Analizi

İki durak arasından geçen hat sayısı trafik hacmini tahmin etmede güzel bir ölçüt olabilir. Bununla birlikte darboğazların daha iyi görülebilmesi için daha farklı ölçütleri kullanmamız gereklidir. Bunlardan başlıcası tüm ağda ikili her düğüm arasında en kısa rotalar hesaplandığında belirli bir kenar üzerinden geçen en kısa rota sayısını temsil eden Kenar Arasındalığı (Edge Betweenness) ölçütüdür.

- AĞDA HERHANGI s DÜĞÜMÜNDEN HERHANGI t DÜĞÜMÜNE GİDEN EN KISA PATİKALARIN LISTESİ λ_{st} , SAYISI σ_{st} OLSUN.
- λ_{st} İÇİNDEKİ EN KISA PATİKALAR DAN $e = (u, v)$ KENARI ÜZERİNDEN GEÇENLERİN SAYISI DA $\sigma_{st}(u, v)$ OLSUN.

Bu bilgiler ışığında $e = (u, v)$ kenarının arasındalığı $g(u, v)$, Formül 1 ile hesaplanabilir:

$$g(u, v) = \sum_{s \neq u \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(u, v)}{\sigma_{st}} \quad (1)$$

Ağımızdaki her kenar için kenar arasındalığı değerlerini hesaplayıp çok iraksak değerler ürettiği için değerlerin logaritmasını aldık. Ardından kenar kalabalığını gidermek, sadece en yüksek değere sahip kenarları görselleştirmek için $\log(ka(e)) < 3$ olan her e kenarını ağımızdan silerek sadece [3, 5] aralığındaki log kenar arasındalığına sahip olan kenarları görselleştirdik. Şekil 2c'e baktığımızda İstanbul'un en büyük darboğazları olan *Boğaziçi, Fatih Sultan Mehmet ve Haliç köprüleri, E-5, üç köprüyü birbirine bağlayan yollar (Haliç-Zincirlikuyu, Zincirlikuyu-Levent), Kozyatağı-Kavacık bağlantısı* görülebilmektedir. Bu güzergahlar üzerinde yaşanabilecek trafik kazaları trafigi felç noktasında getirebilmektedir. Sadece otobüs rotalarına bakarak oluşturduğumuz görselleştirmemizin sonucu bireysel tecrübelerimizle uyusmaktadır. Bu da İstanbul'daki trafik sorununun altında yatan en önemli etkenlerden birisinin ulaşım altyapısı olduğuna işaret etmektedir.

4.4 Düğüm Arasındalığı Analizi

Bir sonraki aşamada farklı bir açıdan bakıp ağdaki en kısa rotaların hangi düğümlerden geçmek zorunda olduğunu baz alan Düğüm Arasındalığı (Node Betweenness) değerlerini hesapladık.

- AĞDA s DÜĞÜMÜNDEN t DÜĞÜMÜNE GİDEN EN KISA PATİKALARIN LISTESİ λ_{st} , SAYISI σ_{st} OLSUN.
- λ_{st} İÇİNDEKİ EN KISA PATİKALAR DAN v ÜZERİNDEN GEÇENLERİN SAYISI DA $\sigma_{st}(v)$ OLSUN.

Bu bilgiler ışığında v düğümünün arasındalığı $g(v)$, Formül 2 ile hesaplanabilir:

$$g(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

Düğüm Arasındalığı değerlerini dikkate alarak bir görselleştirme yaptığımızda farklı darboğazlarla karşılaştık. Şekil 2d'de görülebileceği üzere ana arterlerden ziyade sahil yolu gibi trafige girildiğinde çıkışının zor olduğu, alternatif istikametin olmadığı konumları keşfettik. Düğüm Arasındalığı en yüksek olan düğümleri listelediğimizde Tablo 1'deki sıralamayı elde ettik. Tabloda dikkatimizi çeken duraklardan bazıları sunlardır:

Sabiha Gökçen Havalimanı, Kavacık Köprüsü, Taksim, Eminönü İskelesi, Yenikapı Sahil, Kumkapı, Sarayburnu, Dolmabahçe Sarayı, 4. Levent

Dikkat edilirse Sabiha Gökçen Havalimanı listede yer alırken Atatürk Havalimanının yer almama sebebi muhtemelen Atatürk Havalimanının ana ulaşım yönteminin verilerimize dahil etmediğimiz metro olmasıdır. Sabiha Gökçen'e ise ancak otobüsle gidilebilmektedir.

5 Sonuç ve Öneriler

Sadece otobüs güzergahlarını kullanarak gerçekleştirdiğimiz bu analizle İstanbul'daki potansiyel trafik sıkışıklıklarının hangi noktalarda olabileceği gösterdik. Potansiyel trafik sıkışıklıklarının bu tür ağ analizi yöntemleriyle tespit edilmesi sayesinde sıkışıklığın ulaşım altyapısının yapısal özelliklerinden kaynaklanıp kaynaklanmadığı görülebilir. Analizimiz trafik etkenlerinden birisinin de İstanbul'da yapısal sorunlar olduğunu işaret etmektedir. Bu tür analizlerin artması için *Açık Veri* sistemleri çok büyük önem arzetmektedir ve yaygınlaşması desteklenmelidir.

Bu metodoloji, trafik sıkışıklığının üstesinden gelebilme için hangi noktalara yeni yollar yapılması ve hangi güzergahlarda yeni hatlar açılmasının makul olabileceği konusunda fikir vermektedir. Çalışmanın bölgesel nüfus yoğunluğu verileriyle entegre olması ve sistemin akış (flow) şeklinde modellenmesi doğruluk oranını çok daha artıracaktır.

Yolcuların sabah ve akşam saatlerindeki biniş-inis nokta ve saatlerinin analiz edilmesi ve bu sisteme entegre edilmesiyle birlikte hangi güzergahlarda ekspress (doğrudan) hat açılmasının trafigi hafifleteceğine yönelik öngörüler elde edilebilecektir.

Sonraki çalışma olarak aynı yerde farklı istikamette duran duraklar tek durak varsayılarak yönlü çizgenin yönüz hale getirilebilir. Kenarlar destelenerek ve eğriler halinde çizilerek kuş bakışı varsayılm sebebiyle oluşan dağınık görüntü düzenlenebilir. Coğrafi veri kaynakları kullanılarak görsellerin doğruluğu iyileştirilebilir.

Çalışmamızda kullandığımız kaynak kodlara <https://github.com/aladagemre/istanbul-transportation-network> adresinden erişilebilir.

Teşekkürler

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurulu (TÜBİTAK) tarafından BİDEB 2211-A Programı ile desteklenmiştir.

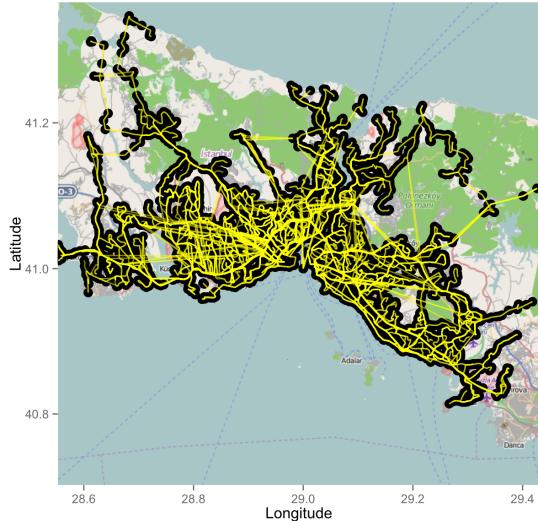
Kaynaklar

- [1] Tenny N Lam and Harry J Schuler. Connectivity index for systemwide transit route and schedule performance. *Transportation Research Record*, (854), 1982.

- [2] Michael GH Bell and Yasunori Iida. *Transportation network analysis*. 1997.
- [3] Harold Soh, Sonja Lim, Tianyou Zhang, Xiuju Fu, Gary Kee Khoon Lee, Terence Gih Guang Hung, Pan Di, Silvester Prakasam, and Limsoon Wong. Weighted complex network analysis of travel routes on the singapore public transportation system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(24):5852–5863, 2010.
- [4] Sybil Derrible and Christopher Kennedy. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(17):3678–3691, 2010.
- [5] Flavien Balbo and Suzanne Pinson. Toward a multi-agent modelling approach for urban public transportation systems. In *Engineering societies in the agents world II*, pages 160–174. Springer, 2001.
- [6] C Von Ferber, T Holovatch, Yu Holovatch, and V Palchykov. Network harness: Metropolis public transport. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380:585–591, 2007.
- [7] C Von Ferber, T Holovatch, Yu Holovatch, and V Palchykov. Public transport networks: empirical analysis and modeling. *The European Physical Journal B*, 68(2):261–275, 2009.
- [8] David Levinson and Bhanu Yerra. Self-organization of surface transportation networks. *Transportation Science*, 40(2):179–188, 2006.
- [9] Darren M Scott, David C Novak, Lisa Aultman-Hall, and Feng Guo. Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14(3):215–227, 2006.
- [10] Feng Xie and David Levinson. Modeling the growth of transportation networks: a comprehensive review. *Networks and Spatial Economics*, 9(3):291–307, 2009.
- [11] HJ Sun, JJ Wu, and ZY Gao. Dynamics of traffic networks: from microscopic and macroscopic perspectives. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(7):1648–1654, 2008.
- [12] Larry J LeBlanc, Edward K Morlok, and William P Pierskalla. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. *Transportation Research*, 9(5):309–318, 1975.
- [13] SB Pattnaik, S Mohan, and VM Tom. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 124(4):368–375, 1998.
- [14] M Hadi Baaj and Hani S Mahmassani. Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(1):31–50, 1995.
- [15] WANG Jian-lin. The public transportation optimum route algorithm based on the least transfer [j]. *Economic Geography*, 5:673–676, 2005.
- [16] Krzysztof Goczylla and Janusz Cielatkowski. Optimal routing in a transportation network. *European Journal of Operational Research*, 87(2):214–222, 1995.
- [17] Christoph E Mandl. Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5(6):396–404, 1980.
- [18] Yosef Sheffi, Hani Mahmassani, and Warren B Powell. A transportation network evacuation model. *Transportation Research Part A: General*, 16(3):209–218, 1982.

Tablo 1: Düğüm Arasındaki en yüksek olan duraklar tablosu

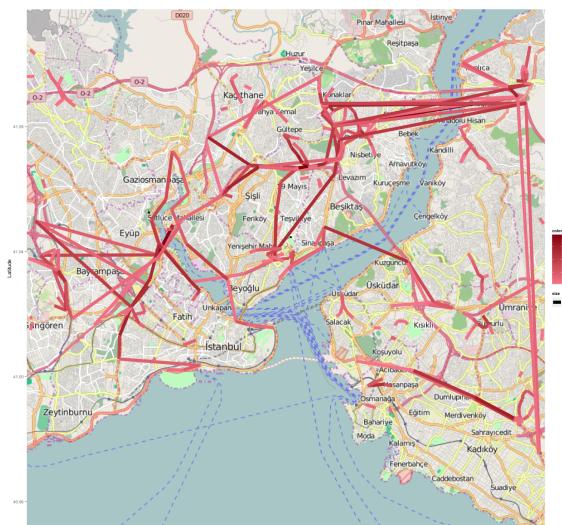
Durak Adı	$\log(g(v))$
SABIHA GÖKÇEN İ.D.H.	17.16
KAVACIK KÖPRÜSÜ	17.11
TAKSİM	17.07
SABIHA GÖKÇEN NİZ.	16.66
EMİNÖNÜ İSKELE	16.58
YENİKAPI SAHİL	16.58
KUMKAPI	16.58
ÇATLADIKAPI	16.58
AKBIYIK	16.58
SARAYBURNU	16.58
SALİPAZARI	16.56
TEKNİK ÜNİVERSİTE	16.54
MEVLANAKAPI	16.53
SİLİVRİKAPI	16.53
DOLMABAHÇE SARAYI	16.53
MİNİATÜRK	16.50
HALİÇ KONGRE MERKEZİ	16.50
KAVACIK KÖPRÜSÜ	16.49
4.LEVEND	16.45
TOPKAPI ALT GEÇİT	16.44
İNÖNÜ STADI	16.43
FABRİKALAR	16.34
LEVENT	16.33
Z.KUYU-METROBÜS 2	16.33
GÜMÜŞSUYU	16.29
SÜTLÜCE	16.25
HALİCİOĞLU 9	16.24
HALİCİOĞLU 7	16.24
AYVANSARAY	16.24
MECİDİYEKÖY-VİYADÜK	16.13



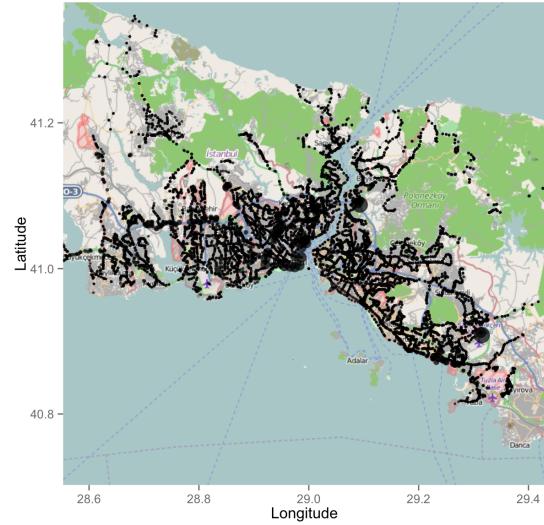
(a) **Çoklu Çizge:** Otobüs güzergahlarının çoklu çizge halinde görselleştirilmesi.



(b) **Ağırıklı Ulaşım Ağı:** aynı kenardan geçen hatların birleştirilmesi ile oluşan ağırlıklı ağı. Koyu renkli ve kalın kenarlardan daha fazla hat geçmektedir.



(c) **Logaritmik Kenar Arasındalıkı Haritası.** Koyu renkteki kenarların kenar arasındalık değeri daha yüksektir.



(d) **Logaritmik Düğüm Arasındalıkı Haritası.** Büyüük ve koyu renkteki düğümlerin düğüm arasındalık değeri daha yüksektir.

Şekil 2: İstanbul toplu taşıma ağı görselleri