

MINIMUM KAPSAMA AĞACI YÖNTEMİ İLE KAMPÜS ALANINDA AĞ PLANLAMASI

NETWORK PLANNING IN CAMPUS AREA WITH MINIMUM SPANNING TREE METHOD

Burcu ERBEN*
Bülent SEZEN**

Makale Bilgisi/Article Info

Geliş/Received: 08/01/2023; Düzeltme/Revised: 06/11/2024

Kabul/Accepted: 24.12.2024

Araştırma Makalesi / Research Article

Atıf/Cite as: Erben, B.& Sezen B. (2024). Minimum Kapsama Ağacı Yöntemi ile Kampüs Alanında Ağ Planlaması . DÜMAD (Dünya Multidisipliner Araştırmalar Dergisi), 7(2), 61-81.
<https://doi.org/10.58853/dumad.1231116>

Özet

Konumlandırma süreci daha yaygın hale geldikçe, çoğu sektörde planlama ihtiyacı artmaktadır. Bir planlama yöntemi olan Şebeke (Ağ) Analizi, Yöneylem Araştırmasında çok fazla uygulanan bir analiz türüdür. Gelişen platformlar çoğu araştırmacıların değer biçen bir fikir içerisinde olmalarına yol açmaktadır. Çoğu sektörde etkili planlama yapmak analiz yöntemlerine dayanmaktadır. Bu analiz yöntemleri; en kısa yol, Minimum Kapsama Ağacı, Minimum Maliyet Akışı ve Maksimum Akış Modelidir. Farklı özelliklere sahip olan kullanılan model analiz için uygundur. Her bir metodun çalışma mantığı farklıdır. Bu çalışmada sadece Minimum Kapsayan Ağaç Algoritması ele alınarak planlamaya dair bazı değerlendirmeler yapılmıştır. Bu analiz uygulaması için matematiksel programlardan biri olan GAMS (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi) programı kullanılmıştır. Gebze Teknik Üniversitesi içerisinde bulunan bölümlerin uzaklıkları değerlendirilerek Minimum Kapsama Ağacı (Minimum Spanning Tree) modeli programda uygulanabilir hale getirilmiştir. Uygulanacak bu analizde, düğümleri birleştiren toplam kenar sayısı, 5, 10 ve 15 olmak üzere üç farklı senaryo olarak belirlenmiştir. Sonrasında programdan elde edilen çıktı sonucunda, bu

* Dr. İstanbul Üniversitesi, (e-posta: burcum531@hotmail.com , ORCID ID: [0000-0002-3130-7852](https://orcid.org/0000-0002-3130-7852))

** Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, (e-posta: bsezen@gtu.edu.tr , ORCID ID: 0000-0001-7485-3194)

kenarlar birbirine bağlanarak bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Yapılan planlama, ağ analizinde graf teorisine dayanmaktadır. Açık ki bu teori, uzaklık değerlerinin nasıl analiz edileceğine yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Dahası, bu çalışma insanların kampüste planlama yapmalarına yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Ek olarak, bu çalışma farklı alanlar olsa bile uzaklık hesaplamalarının dahil olduğu durumlarda kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Graf Teorisi, Minimum Kapsama Ağacı, GAMS, Ağ Analizi.

Abstract

Network Analysis, which is a planning method, is a type of analysis applied in Operations Research. These analysis methods are Shortest Path, Minimum Spanning Tree, Minimum Cost Flow, and Maximum Flow Model. The logic of each method is different. In this study, some evaluations about planning have made by considering only the Minimum Spanning Tree Algorithm. GAMS (General Algebraic Modeling System) program, which is one of the mathematical programs, was used for this analysis application. Minimum Spanning Tree model has been made applicable in the program by evaluating the distances of the departments in Gebze Technical University. Determined the total number of edges, which are connecting nodes, in this analysis to apply are three different scenarios for 5, 10, and 15. Afterward, as a result of the output obtained from the program, a network structure was created by connecting these edges. Made planning is base on Graph Theory in network analysis. This study aims to help persons' make about planning on campus.

Key Words: Graph Theory, Minimum Spanning Tree, GAMS, Network Analysis.

Giriş

Günümüzde değişen koşullara uyum sağlamak amacıyla öngörülerde bulunmak ve sürekli güncel kararlar almak, önemli bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, planlama faaliyetlerinin önemi belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Planlama tekniklerinden biri olan Ağ (Şebeke) analizi, belirli bir alandaki en kısa yolların tespit edilmesi, bina inşaatı planlamaları, ulaşım sektöründe trafik akış noktalarının belirlenmesi ve rota oluşturma süreçlerinde Yöneylem Araştırması'nın bir bileşeni olarak önemli bir rol oynamaktadır (Finke, 2008). Uygulama aşamasında geniş bir alanı kapsamı ve etkili bir karar alma mekanizması sunması nedeniyle, bu analiz türü büyük bir öneme sahiptir (Xiao Qun Liao, Tong Su, & Ma, 2020).

Ağ analizinin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasının yanı sıra, uygulama aşamasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır:

- En Kısa Yol Modeli
- Minimum Kapsama Ağacı
- Maksimum Akış Modeli

- Minimum Maliyet Akışı Modeli

Ağ analizi, çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Çevresel, ulaşım ve taşımacılık gibi farklı sektörlerde oluşturulan güzergâhlar ile elektrik ve dağıtım sistemleri gibi alanlarda (Büke & Erturaç, 2016), riskli bölgelerdeki yapıların çıkış noktalarının tasarlanması ve etkili kararların alınmasında ağ analizinin kritik bir rolü bulunmaktadır (Erkal, 2013).

Bu çalışma, Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde ağ analizi planlamasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Uygulanacak yöntem, graf teorisine dayanan Minimum Kapsama Ağacı tekniğidir. Bu tekniğin tercih edilmesinin sebebi, ağ üzerindeki tüm alanları kapsayarak en kısa yolu belirleyebilme yeteneğidir. Hesaplamalar için GAMS yazılımı kullanılacaktır. Bu yazılım, Minimum Kapsama Ağacı modelini uygularken aynı zamanda dallanma sayısını isteğe bağlı olarak ayarlama imkanı sunmaktadır¹. Dallanma için farklı değerler atamak mümkündür. Dallanma yapısının analizi, üç farklı senaryo üzerinden değerlendirilmiş ve akış diyagramı oluşturulmuştur. Geniş ölçekli veriler için bile GAMS programının deneme sürümünün çözüm sağlama kapasitesi önemli bir avantaj sunmaktadır.

Wilson ve Myriam, minimum kapsama ağacı probleminde karmaşık altyapının daha anlaşılır hale getirilmesi amacıyla belirli senaryo durumları oluşturulmasının önemini vurgulamaktadır. Bu süreçte, optimum çözüme ulaşmak için bazı kısıtların eklenerek yapılan analizlerin stratejik bir adım olduğu ifade edilmektedir. Mesafelerin en aza indirilmesinde senaryo oluşturularak gerçekleştirilen işlemlerin önemi üzerinde durulmaktadır (Wilson Pavon, Myriam Torres, & Inga, 2023). Bu çerçevede, araştırmada kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış senaryo durumlarının eklenerek analiz yapılmasına karar verilmiştir.

Senaryo durumları aşağıdaki gibidir:

Senaryo 1: Dğümleri bağlayan toplam kenar sayısı=5

Senaryo 2: Dğümleri bağlayan toplam kenar sayısı=10

Senaryo 3: Dğümleri bağlayan toplam kenar sayısı=15

1. Literatür Taraması

Belirli bir alanda planlama yapmanın temel amacı, o bölgedeki yolların veya rotaların oluşturulması ve bu yolların belirli bir hedef doğrultusunda değerlendirilmesidir. Yol, düğüm noktalarının birbirine bağlanmasıyla meydana gelir. Düğüm ve kenar ile temsil edilen graflar, gerçekleştirilecek analizler açısından farklılık arz etmektedir (Needham & Hodler, 2019). Bu çalışmada, analiz için kullanılacak olan Minimum Kapsama Ağacı (MST) problemi, çeşitli alanlarda kullanılmakla birlikte bu konulara dair yapılan araştırmaların konuya birçok katkı sağladığı görülmektedir.

¹ https://www.gams.com/latest/gamslib_ml/libhtml/gamslib_mst.html

Aşağıda yer alan Tablo 1’de MST yönteminin kullanıldığı alanlar ve elde edilen sonuçlar ifade edilmektedir.

Tablo 1: Minimum Kapsama Ağacı Modeli Literatür Araştırması ve Çalışma Alanları

Yazar adı	Çalışma alanı	Çalışma sonucu
(Fang, Model, & Yiğın, 2008)	Kömür endüstrisi	İnsan hayatını tehdit eden acil durumlarda çıkış yollarının belirlenmesinde bu yöntem etkili sonuçlar vermiştir.
(YILDIZ, BATI, & ŞAHİN, 2017)	Savaş alanında	Milli mücadele dönemi savaşları arasındaki ilişkilerin incelenmesinde bu yöntem kullanılarak savaşların sıralaması analiz edilmiş ve bu sayede yararlı varsayımlar geliştirilmiştir.
(Allison et al., 2009)	Astronomi	Büyük yıldızlar ile rastgele dağılan yıldızların dağılımının karşılaştırılmasında bu yöntemden faydalanılmıştır.
(Dutta, Patra, Shankar, & Verma, 2014)	Havacılık	Coğrafi bilgi sistemlerinin geliştirilmesinde ise bu metod kullanılarak ülke genelinde bir hava yolu planlaması gerçekleştirilmiştir.
(Zakaria Hasanatu & Boah, 2024)	Enerji dağıtım optimizasyonu	Gana'nın Kuzey Bölgesi'nde yer alan Savelugu ve Mion ilçelerinin belirli alanlarında optimum elektrifikasyon rotalarının belirlenmesi ve mesafelerdeki değişimlerin bu rotaların uzunlukları üzerindeki etkisinin derinlemesine incelenmesi amacıyla minimum kapsama ağacı problemi çerçevesinde bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Enerji dağıtım optimizasyonu açısından karar alma süreçlerine önemli katkılarda bulunmaktadır.
(Dongxiao Liu & Zhao, 2021)	Orman alanları	Avustralya'da ortaya çıkan orman yangınlarının konumları belirli kriterlere göre sınıflandırılarak, dronların yangınları tespit etme ve izleme süreçlerinde etkili bir şekilde yapılandırılmasının sağlanması amaçlanarak model tasarımı için minimum kapsama ağacı algoritması ve doğrusal olmayan programlama teknikleri kullanılmıştır. Orman arazisi verileri dron konumlandırılması ile sistem entegrasyonu sağlanarak analiz yapılmıştır.
(Huong Luu & Chrobak, 2022)	Yazılım	Yayılan ağaç sıklığı sorununa yönelik karar versiyonu olan K-STC (Minimum Spanning Tree Congestion), belirli kısıtlar altında NP-tam olduğunu ortaya koyarak, bu problemin zorluklarını iyileştirmeye yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu çalışmaları ile kısıtlarla karmaşıklık sorununa kesin bir çözüm önerilmemekle birlikte, minimum kapsayan ağaç problemi için iyileştirici bir etki sağladığı ifade edilmektedir.
(Xiao Qun Liao et al., 2020)	Mantık	Neutrosifik mantığın belirsizlikleri ifade etme konusunda geleneksel bulanık

		mantıktan daha etkili bir yöntem sunduğu öne sürülmektedir. Ayrıca, MSTP için alternatif algoritmaların mevcut olduğu ve yeni yaklaşımların tedarik zinciri yönetimi ile telekomünikasyon gibi çeşitli alanlarda uygulanabilirliğini artırmayı amaçladığı vurgulanmaktadır.
(Jia Li et al., 2023)	Veri analizi	Farklı yoğunluk kümelerine sahip veri setlerinde aykırı değerlerin tespitinde ve yeni bir mesafe ölçüsü kullanarak minimum kapsayan ağaçlar (mini-MST'ler) oluşturan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, Mini-MST tabanlı Aykırı Değer Tespiti (MMOD) olarak adlandırılmaktadır. Önerilen yaklaşım, aykırı değerlerin sayısının belirtilmesini gerektirmemektedir. Özellikle tıbbi veri setleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda MMOD'un önemi ortaya çıkmaktadır.
(Younes Berouaga, Cherif El Msiyah, & Madkour, 2023)	Finans	Portföy optimizasyonu bağlamında MST yönteminin uygulanması, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında MST tabanlı portföylerin Minimum Varyans Portföyü ve Eşit Ağırlıklı Portföylerden daha üstün bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.
(Jing Deng, Zihan Xu, & Xing, 2023)	Yönetim	Minimum yayılan ağaç (MST) yöntemi, COVID-19'un iki piyasa arasındaki risk iletimini incelemek amacıyla kullanılmakta olup, bu süreçte elde edilen bulgular, politikacıların etkili risk yönetimi stratejileri geliştirmelerine ve yatırımcıların çeşitlendirme işlemlerini kolaylaştırmalarına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, iki piyasa arasındaki risk bağlantısının artırılması hedeflenmektedir.
(Sara Nasirian, Paola Pierleoni, Alberto Belli, Marco Mercuri, & Palma, 2023)	Enerji tüketimi	Pizza, enerji tüketimini azaltılması amacıyla minimum yayılan ağaçlarla kablosuz sensör ağının ömrünü uzatmayı amaçlayan yeni bir küme tabanlı yönlendirme yöntemidir. Bu yöntem, baz istasyonundan ters veri akışını ortadan kaldırmak ve minimum yayılan ağaç yapısını kullanarak verileri en yakın komşulara iletmek gibi yenilikler yoluyla enerjinin gereksiz yere kullanılmasını önlemektedir. Diğer kümeleme yöntemleriyle kıyaslandığında enerji tüketiminde dengeleyici ve iyileştirici bir görevi olduğunu ifade etmektedirler.
(Paz Carmi, M. J. Katz, & Mitchell, 2005)	Sensör	Sensör ağlarının kapsamını genişletmek ve ağ oluşturma süreçlerinde bağlantılı optimizasyon problemlerine yönelik sabit faktörlü yaklaşımlar geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır.
(N. Blomsma et al., 2022)	Sağlık	Sağlık alanında nörolojik durumlar için bozuklukların ilişkisi incelenerek elde edilen eğilimlerin minimum kapsama

		ağacı yöntemi ile analizini ifade etmişlerdir.
(Faruk Dayı & Ulusoy, 2018)	Havacılık	Havayolu şirketlerinde 19 havayolu için finansal durum değerlendirmeleri bu yöntem ile analiz edilmektedir. Elde edilen sonuç ile performans ilişkileri arasında iyileşme görülmektedir.
(Barış & Özceylan, 2019)	Ulaştırma	Kampüs ağı planlamasının belirlenmesinde bu yöntemi kullanarak modelleme sonrasında analiz yöntemi gerçekleştirilmiştir.
(Xiao Qun Liao et al., 2020)	Elektrik	Elektrik şebekelerinde genetik algoritmaya dayalı olarak bir yöntem ile kullanılmak üzere nötrosofik MST önerisinde bulunmuşlardır.
(Pirim H, Ekşioğlu B, & AD, 2015)	Biyoloji	MST yöntemi geliştirilerek bu yöntemi biyoloji alanında uygulanmaktadır. Yeni bir minimum yayılan ağaç tabanlı sezgisel B-MST önerisi yapılarak biyolojik verilerin kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.
(Şaar & Topcu, 2021)	Veri kümeleme	MST tabanlı yeni bir yöntem önerilerek iyi bir performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Minimum kapsama ağacı (MST) algoritması, ağ içindeki optimum yolları belirleme sürecini hızlandırmak için, potansiyel genel optimum çözüme katkıda bulunmayan belirli yolları eleme stratejisini kullanmaktadır. Bu algoritma, yol kalitesinden ödün vermeden işlevselliğini koruyarak, iletişimle ilişkili enerji maliyetlerini azaltmayı hedefler. MST algoritması, belirli bir alandaki çok sayıda düğüm arasında en kısa yolları tespit etme konusunda son derece etkilidir. Ayrıca, düğümler arasındaki en uygun yolları hızlı bir şekilde belirlemek ve en verimli yolun seçilmesini sağlamak amacıyla sensör ağları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Genel olarak, MST algoritması, optimum yolu belirlemek için gereken süreyi azaltırken, belirli yolları eleme yoluyla yol kalitesini koruma işlevini de yerine getirir; bu durum, enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, ağ içindeki veri iletim süreçlerini daha verimli hale getirmektedir. Ayrıca, bu çalışma çerçevesinde Minimum Kapsayan Ağaç problemi detaylı bir şekilde formüle edilmekte ve incelenmektedir (Paz Carmi et al., 2005).

Graf teorisi alanında, minimum kapsama ağacı probleminin çözümüne yönelik mevcut yöntemlerin kapsamlı bir analizi gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede, çeşitli yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri ele alınarak, her bir yaklaşımın belirli koşullar altında nasıl bir performans sergilediği üzerinde durulmaktadır. Özellikle, hangi yöntemin belirli senaryolar için daha etkili bir çözüm sunduğu konusunda derinlemesine incelemeler yapılmakta ve bu incelemelerin pratik uygulamalara etkileri çeşitli örneklerle açıklanmaktadır. Bu tür değerlendirmeler, çalışmanın derinliğini artırmakta ve alandaki mevcut literatüre önemli katkılarda bulunmaktadır. Ayrıca, ilgili modeller üzerinden

ayrıntılı örnekler sunularak, okuyucunun konuyu daha iyi anlaması sağlanmakta ve farklı çözümler konusunda karşılaştırılma yapılmasını kolaylaştırılmaktadır (Antos, 2015).

Minimum kapsama ağacı (MST) problemi, önceki algoritmalara göre daha az rastgele bit kullanan yeni rastgele algoritmaların tanıtıldığı önemli problemlerden biridir. Bu yeni algoritmalar, optimum beklenen çalışma sürelerini korurken, mevcut "açgözlü olmayan" MST algoritmalarına dair bütünsel bir bakış açısı da sunmaktadır. Önerilen yeni rastgele minimum kapsama ağacı algoritması, yalnızca çok logaritmik sayıda rastgele bit kullanarak beklenen doğrusal zamanda çalışan bir yapıdadır. Ayrıca, bu algoritmanın özellikleri incelenerek, çok logaritmik sayıda rastgele bit kullanıldığında, doğrusal iş yapma yeteneği ile çok logaritmik zamanda minimum yayılan ağaç ve bağlı bileşen problemlerinin çözümünde paralel olarak nasıl kullanılabileceği gösterilmektedir. Bu çalışmalar, MST probleminin çözümündeki gelişmeleri belgelemekte ve bu alandaki önemli ilerlemeleri ortaya koymaktadır. Özellikle, Seth Pettie ve Ramachandran (2008) tarafından gerçekleştirilen araştırmalar, algıların modern algoritmalara nasıl etkili bir şekilde entegre edilebileceğine dair değerli bilgiler sunmaktadır (Seth Pettie & Ramachandran, 2008).

Dağıtılmış minimum kapsama ağacı (MST) problemi, bir ağ yapısındaki her düğümün, minimum yayılım ağacını oluşturan kenarları belirlemesi gereken bir araştırma alanıdır. Bu problem, ağın veri iletim verimliliğini artırma hedefi doğrultusunda, düğümler arasında etkili ve doğru bağlantılar kurmaya odaklanmaktadır. MST oluşturma süreci, belirli algoritmalar aracılığıyla gerçekleştirilmekte olup, bu algoritmaların dağıtılmış bir ortamda etkin bir şekilde çalışabilmesi için belirli kriterlerin karşılanması gerekmektedir. Bu çerçevede, MST probleminin çözümüne yönelik dağıtılmış algoritmaların tasarımına dair yapılan araştırmalar kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Gopal Pandurangan, Peter Robinson ve Scquizzato'nun 2018 yılında gerçekleştirdiği çalışma, bu alandaki yenilikleri ve bu yeniliklerin pratik uygulamalarını ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır (Gopal Pandurangan, Peter Robinson, & Scquizzato, 2018).

Yaklaşık minimum kapsama ağacı (MST) algoritması, genel optimum çözüme katkı sağlamayan belirli yolları etkili bir şekilde eleme özelliğine sahiptir. Bu özellik, yol kalitesinden ödün vermeden bir ağ içindeki optimum yolu hızlı bir şekilde bulmayı mümkün kılar. Algoritma, uygulandığı alanlarda ilişkili maliyetleri önemli ölçüde azaltırken, belirli bir alandaki birden fazla düğüm arasındaki en kısa yolları tespit etme konusunda son derece faydalı bir araç olarak değerlendirilmektedir. Özellikle, yaklaşık MST algoritması, düğümler arasındaki en uygun yolları hızlı bir şekilde belirleyerek, en iyi yolun seçilmesini sağlamak amacıyla sensör ağlarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yazarlar, sensör ağlarındaki farklı hareketlilik modelleri için yaklaşık minimum yayılım ağaç algoritmalarının performans optimizasyonu üzerine kapsamlı bir tartışma gerçekleştirmektedir. Bu bağlamda, algoritmanın uygulanmasıyla elde edilen sonuçların çeşitli

senaryolar üzerindeki etkileri ve sistemin verimliliğini artırma konusundaki katkıları üzerinde durulmaktadır (Haripriya V & K, 2023).

MST (Minimum Spanning Tree) elde etmek için çeşitli algoritmaların kullanılması mümkündür. En yaygın olarak bilinen üç algoritma, Kruskal, Prim ve Dijkstra'dır. Bu algoritmaların her birinin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Bilgisayar bilimleri alanında, özellikle yapay sinir ağları bağlamında, Prim algoritması en küçük kapsama ağacını elde etmek için bir öncelik kuyruğu kullanmaktadır. Kenar ağırlıkları belirlenirken, düğümlerin başlangıç noktası rastgele seçilmektedir. Ancak, başlangıç noktası olarak 1 değerinin iyi bir performans sergilediği ifade edilmiştir. Öte yandan, Kruskal algoritmasında, ağırlıkların artırılması amacıyla iki komşu düğüme ekleme yapılarak ilerleme sağlanmaktadır. Uygulama açısından Prim ve Kruskal algoritmaları karşılaştırıldığında, Kruskal algoritmasının daha yüksek bir performans sergilediği gözlemlenmektedir (Osipov, Sanders, & Singler, 2009). Prim algoritması, her yinelemede komşu kenarlar arasından en küçük olanı seçerek bir kenar ekleme işlemi gerçekleştirdiği için açgözlü (greedy) bir algoritma olarak tanımlanmaktadır (Dutta et al., 2014). Dijkstra algoritması etkili olmasının yanısıra en iyi sonucu garanti etmemektedir. Yinelemeye dayalı bir algoritmadır. Kaynak tepe noktasından diğer tüm tepe noktalarına kadar olan minimum ağırlık yollarının artı sonsuz olduğu varsayılmaktadır. Ayrıca komşu tepelerin ağırlıklarına bakıldıktan sonra yinelemelere devam edilmektedir (Meghanathan, 2012).

MST'nin farklı çeşitleri vardır. Ağırlık kısıtlamalı Minimum Kapsama Ağacı (WMST) problemi için alt ve üst sınırların hesaplanmasında Lagrange tabanlı algoritmalarından yararlanılmaktadır. Ağırlık kısıtlamalı Minimum Kapsama Ağacına, sırt çantası kısıtlamalı bir MST problemi de denilmektedir (Requejo & Santos, 2018). CMST problemi kapasite kısıtlı yönsüz bir graf olan G'nin tüm köşelerine yayılan minimum maliyet ağacıdır. Özellikle telekomünikasyon ağı tasarımında, dağıtım, nakliye ve lojistikte kullanılmaktadır (Kritikos & Ioannou, 2017). Derece Kısıtlı Minimum Kapsama Ağacı (DCMST) problemi, köşelerdeki derece için minimum ağırlıktaki bir yayılma ağacı bulmakla ilgilidir. Bu problem de; telekomünikasyon, ulaşım, enerji ağlarının tasarımı ve sıhhi tesisat gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir (Wamiliana, 2004). Çok ölçütlü MST (mc-MST) probleminde, Pareto'nun optimum minimum ağırlık yayma ağaçlarının tamamını bulmak için MST probleminde skaler kenar ağırlıkları vektörlerle değiştirilmektedir (Knowles & Corne, 2002). Genelleştirilmiş Minimum Kapsama Ağacı (GMST) problemi için iki sezgisel arama yaklaşımı sunulmaktadır: yerel arama ve genetik algoritma. Bu yaklaşımlarla GMST probleminin daha iyi performans gösterdiği açıklanmaktadır. Minimum Kapsama Ağacı probleminde iki düğüm arasındaki bir kenarın maliyeti, iki düğüm arasındaki minimum maliyet kenarına eşittir (Golden, Raghavan, & Stanojevic, 2005).

Çalışmanın motivasyonu olarak elde edilen bulguların, başta işletme sektöründe yer alan bir takım firmalara, sağlık şirketlerine (N. Blomsma et al., 2022), havayolu şirketlerinde rota planlama

(Faruk Dayı & Ulusoy, 2018), teslimat işi gerektiren firmalarda, kampüs ağı planlamasının belirlenmesinde (Barış & Özceylan, 2019), elektrik şebekelerinde (Xiao Qun Liao et al., 2020), hesaplamalı biyolojide (Pirim H et al., 2015), veri kümelemede (Şaar & Topcu, 2021), öngörülebilirliği artırma bakımından devlet ve özel kurumlara faydalı olması potansiyeli taşımaktadır. Amaçlanan bu ifadeler doğrultusunda çalışmanın orijinalliyi ve kapsamı bakımından literatüre sağlayacağı katkılar açıktır.

Çalışma kampüs alanı gibi büyük alanlarda planlama yapılmasına imkan tanıyan bir yöntem olup, benzer durumlarda ne şekilde yol izlenmesi gerektiğini göstererek yol gösterici bir rol üstlenmektedir. Bu çalışmada alan olarak Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü seçilmiştir. Uygulanan yöntem Minimum Kapsama Ağacı tekniğidir. Bu teknik ile kampüs alanında ya da karmaşık yapılanmanın olduğu alanlarda hangi adımlarla yol izlenerek çözüm yolları araştırıldığı üzerine katkı sağlanarak, ortaya çıkan etkinin tespit ve analiz edilmesi çalışmanın temel amacıdır. Literatüre sağlayacağı katkı olarak ise yapılanmanın olduğu belirli alanlarda yeni kısıtlamalar ve belirli durumlara göre özelleştirme işlemi göz önünde bulundurularak oluşturulan esnek bir planlama yapısının araştırmacılara katkı sağlayarak yol gösterici olması hedeflenmektedir.

2. Metodoloji

Bu bölümde, çalışmamızda uygulanacak ampirik metodoloji ile ilgili veriler hakkında bilgi verilecektir. İlk olarak, çalışmada kullanılacak Minimum kapsama ağacı yönteminin temelini oluşturan graf teorisi hakkında bazı açıklamalar yapılacaktır. Daha sonra, graf teorisinin farklı türleri hakkında bilgi verilecektir. Ardından, Minimum kapsama ağacı modellerinin matematiksel formülasyonuna dair bilgilere yer verilecektir. Son olarak, ampirik uygulama aşamasına geçilerek, modelde kullanılacak düğüm ve kenar sayıları ile ilgili oluşturulan senaryo çerçevesinde kampüs alanında bir ağ yapısı gerçekleştirilecek ve bu ağ yapısı değerlendirilecektir.

2.1. Graf Teorisi

Ağ tasarımının temel disiplinleri arasında graf teorisi ve olasılık teorisi önemli bir yer tutmaktadır. Graf teorisi, bir graf içerisindeki iki köşenin birbirine bağlı olup olmadığını belirlemek için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır (Larsson & Safari Books Online (Firm), 2014). Graf teorisinde, bir ağaç, n köşesi ve $n-1$ kenarı olan bağlı bir graf olarak tanımlanmaktadır (Dutta et al., 2014). Bu teori, psikoloji, kimya, endüstri, elektrik mühendisliği, ulaşım planlaması, yönetim, pazarlama ve eğitim gibi birçok alanda karşılaşılan problemlerin çözümünde önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, graf teorisi çok çeşitli alanlara hitap eden bir temel disiplin olarak değerlendirilmektedir. Graf teorisi üzerine yazılan ilk makale, 1707-1783 yılları arasında İsviçreli matematikçi Leonhard Euler tarafından kaleme alınmıştır (Evans, Minieka, & Minieka, 1992).

2.2. Graf Çeşitleri

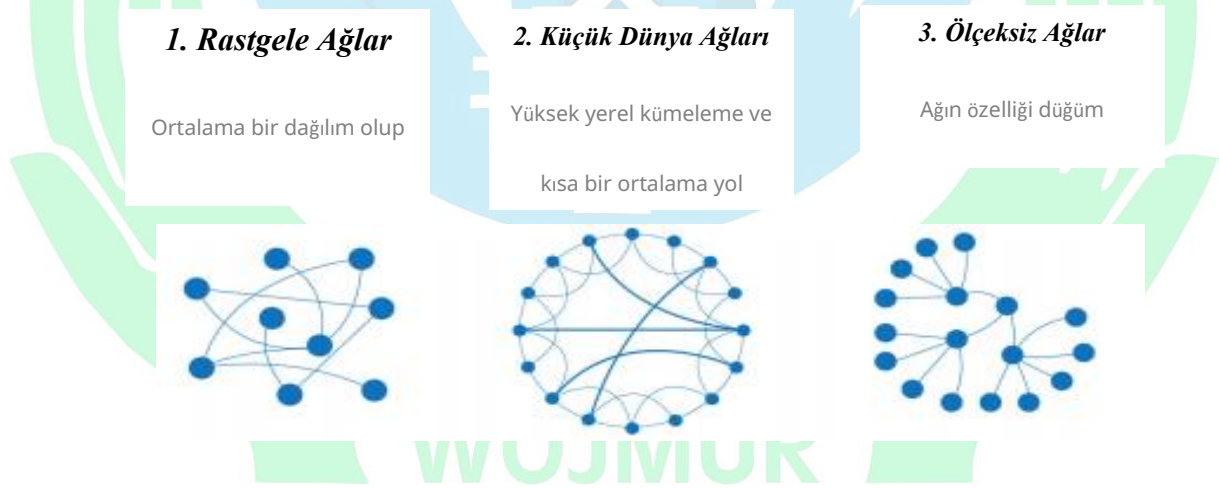
Graflar uygulanacak analiz için çeşit, tür ve özellik bakımından farklılık göstermektedir. Bu graflar Şekil 1'den Şekil 5'e kadar gösterilmiştir (Mark Needham & Hodler, 2019).

Şekil 1: Graf Çeşitleri



Şekil 1'de gösterilen Basit graf yapısında 2 düğümü birbirine bağlayan çizgi yönsüzdür. Çoklu graf yapısında ise çoklu ilişki, yani 2 düğüm arasındaki geçiş noktasında birden fazla yol varsa bu durumu ifade etmektedir. Sahte grafda yön belirtilmemektedir, aynı düğümlerde gidiş ve geri dönüş imkanı bulunmaktadır (Karas, 2023).

Şekil 2: Graf Türleri

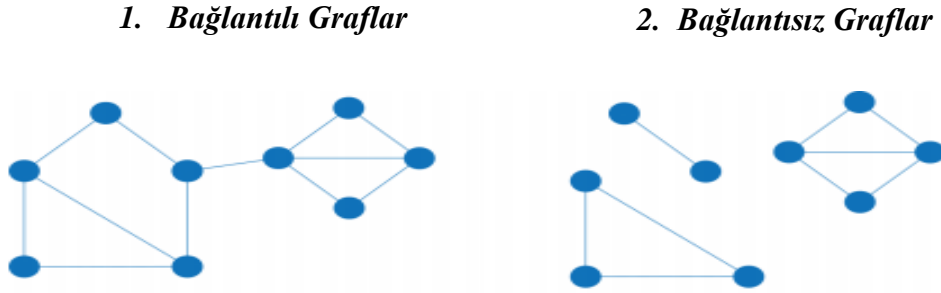


Şekil 2'de ifade edilen graf türlerinde Rastgele ağlar kısmında düğümler rastgele olacak şekilde birbirine bağlı olmaktadır. Ağ yapısı olarak yönsüz bir durum vardır ve kapsama uygulamaları geçerli olmaktadır (TESLIUC, 2017). Küçük dünya ağları kısmında ise bir zincir şeklinde gösterilen (Gros, 2013) ve köşeleri birbirine bağlayan yollar arasında kısa mesafeler vardır (Vasileios Karyotis & Khouzani, 2016). Ölçeksiz ağlar gerçek dünya ağları olarak görülmektedir (Lenaerts, 2011). Gerçek dünya ağlarının karmaşık yapısını indirgemek için kullanılmaktadır. Bir düğüm birden fazla düğümü taşıyacak şekilde yerleşime sahiptir (Tsiotas, 2020).

Grafların Özellikleri

1. Yollar (path) birbirleriyle bağlantılı ya da bağlantısız bir şekilde olabilir.

Şekil 3: Yolların Bağlantılı ve Bağlantısız Halinin Gösterimi

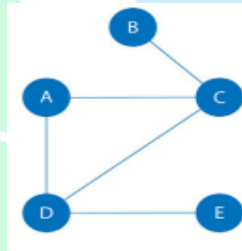


Şekil 3'te ifade edilen bağlantılı graflar kısmında 2 düğümün birleştiği noktada bir doğru bulunmaktadır. Bağlantılı durumun tersi ifadesi ise bağlantısız olarak ifade edilmektedir (ANA, 2021).

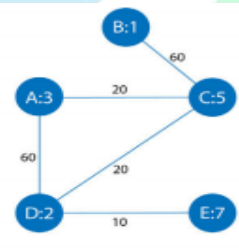
2. Graflara ağırlık eklenmiş olabilir. Ağırlıklı ve ağırlıksız grafikler, görünüm açısından benzerlik gösterse de, ağırlıkların varlığı durumunda bu ağırlıklar; maliyet, zaman, mesafe, kapasite gibi unsurların temsilini sağlayabilir.

Şekil 4: Grafların Ağırlıklı ya da Ağırlıksız Olma Durumu

1. Ağırlıksız

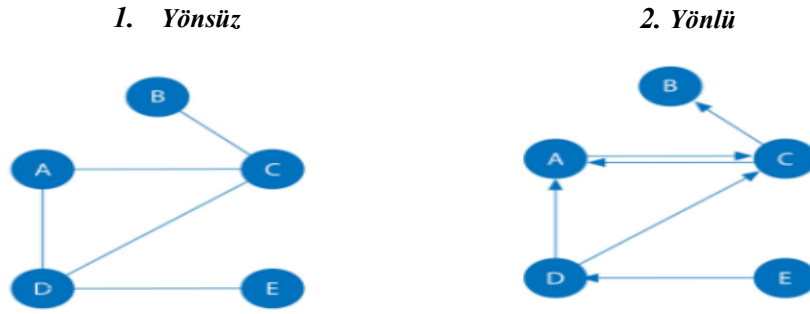


2. Ağırlıklı



Graf yapısında ağırlıklı durumda düğümleri birbirine bağlayan doğrular arasında değer verme durumu vardır. Ağırlıksız durumda ise bu değer yer almamaktadır (Karas, 2023).

3. Graf yapıları, yönlü veya yönsüz olma özelliği taşıyabilir. Bir graf yönsüz ise, aralarındaki ilişkiler çift yönlü olarak değerlendirilir; yönlü bir graf ise, ilişkilerin belirli bir yönü bulunmaktadır.

Şekil 5: Yönlü ve Yönsüz graflar

Şekil 5’te yönlü graf ifadesinde yönün nereden nereye gittiği belirtilir. Yönsüz graflarda ise bu durum belirtilmemektedir (Karas, 2023).

Kullanılacak Minimum Kapsama modeli, GAMS kütüphanesindeki mevcut modelden² faydalanılarak oluşturulmuştur. Ağ analizi, Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilecektir.

3.2. MST Modellerinin Matematiksel Formülasyonu

İki graf değişkeni olan G ve T ve skaler değişkenlerin vektörü W üzerinde belirtilen MST (G, T, W) olarak ele alınmaktadır. T , G 'nin minimum kapsama ağacını temsil etmektedir. MST modeli, bir ağ içerisindeki tüm düğümleri minimum maliyetle bağlayan bir ağaç bulmayı amaçlamaktadır. $n = |V|$ ve düğümler ve $m = |E|$ kenarlar ile $G = (V, E, W)$ ağırlıklı yönsüz bir graf ile bağlantılı olsun. $w_{ij} \in W$, $(i, j) \in E$ olan her kenarın, negatif olmayan bir gerçek sayı ile sınırlı olan ağırlığını veya maliyetini temsil etmektedir (Gen, Cheng, & Lin, 2008).

Endeksler

$i, j = 1, 2, \dots, n$ düğüm dizini

Parametreler

$n = |V|$: düğüm sayısı

$m = |E|$: kenar sayısı

$w_{ij} \in W$: $(i, j) \in E$ olan her kenarın ağırlığı

$c_{ij} \in C$: $(i, j) \in E$ olan her kenarın maliyeti

u_i : her i düğümünün ağırlık kapasitesi

$d_{ij} \in D$: $(i, j) \in E$ olan her kenarın gecikmesi

d_i : i düğümü üzerindeki derece kısıtı

Karar değişkenleri

x_{ij} : 0,1 karar değişkenidir.

² https://www.gams.com/latest/gamslib_ml/libhtml/gamslib_mst.html

kenar $(i, j) \in E$ seçilirse $x_{ij} = 1$, aksi takdirde 0'dır.

y_{ij} : (i, j) kenarı üzerindeki derece değeri

Minimum Kapsama Ağacı Modeli

A_S , S düğüm kümesi tarafından oluşturulan G altgrafındaki kenar kümesini belirtmektedir (yani A_S , her iki uç noktası S 'de bulunan E 'nin kenar kümesidir). MST probleminin tamsayı programlama formülasyonu aşağıdaki gibidir (Gen et al., 2008).

$$\min z = \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} = n - 1 \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \text{düğümün herhangi bir kümesi } S \text{ için} \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in E \quad (4)$$

Formüldeki 0-1 değişkeni x_{ij} 'nin belirlenen yayılma ağacının bir parçası olarak (i, j) kenarın seçilip seçilemeyeceğini ifade etmektedir.

(3) formülündeki $S=2$ için $x_{ij} \leq 1$ olarak temsil edilmektedir.

(2) formülü, $n - 1$ kenarın seçildiğini ortaya koymaktadır. (3) formülü ise, seçilen kenar kümesinin döngü barındırmadığını belirten bir kardinalite kısıtlamasıdır; eğer seçilen çözüm bir döngü içeriyorsa ve S , bu döngüdeki düğümlerin kümesi ise, çözüm bu kısıtlamayı göz ardı etmektedir.

4. Ampirik Uygulama ve Bulgular

Minimum Kapsama Ağacı uygulama alanı olarak Gebze Teknik Üniversitesi belirlenmiştir. Kampüs haritası Şekil 1'de gösterilmektedir. Uygulamada kullanılacak veriler, kampüs içindeki bölümler arasındaki mesafeleri içermekte olup, bu mesafeler (Sezen & Erben, 2019) çalışmasında yer alan ve Tablo 3'te sunulan verilere dayanmaktadır. Programda geliştirilen modelde, bölümlerin adları kısaltmalarla temsil edilmekte ve bu durum Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2: Minimum Kapsama Ağacı Modeli İçin Kullanılacak Bölüm ve Kısaltmalar

Düğüm noktası	Bölümler	Program İçin Kullanılan Kısaltmalar
1	Giriş	GI
2	Sosyal ve fen bilimleri enstitüsü	SB
3	Nanoteknoloji	NA
4	Kosgeb teknoloji geliştirme merkezi	KO
5	Sağlık kültür ve spor dairesi başkanlığı	SA
6	Yabancı diller	YAB
7	Malzeme mühendisliği	MA
8	Mimarlık dersliği	MI
9	Öğrenci yemekhanesi	YE
10	Jeodezi	JE
11	İşletme fakültesi	IS
12	Fizik	FI
13	Rektörlük binası	RE
14	Yapı işleri	YA
15	Öğrenci işleri	OG

16	Erasmus ofisi	ER
17	Teknoloji transfer ofisi	TE
18	Personel yemekhanesi	PE
19	Bilgisayar mühendisliği	BI
20	Elektronik mühendisliği	EL
21	Kütüphane	KU
22	Kimya mühendisliği	KI
23	Moleküler biyoloji ve genetic	MO
24	Çevre mühendisliği	CE



GAMS programında belirlenen senaryolar kodlanarak elde edilen raporlama kısmı Tablo 3'te GAMS raporlama sonuçları başlığı ile verilmiştir. Raporlama sonucu tablosunda kısaltmalar kullanılmıştır. Örneğin GI.SB ifadesi Tablo 2'de ifade edilen kısaltmalardan yola çıkılarak Giriş ile Sosyal ve fen bilimleri enstitüsü arasındaki uzaklığı ifade etmektedir. Buradaki sonuç tablosunda bu uzaklığın 1. sırada yer alacağını söylemek mümkündür.

Tablo 3: GAMS raporlama sonuçları

---- 228 PARAMETER mst minimum spanning trees starting from all nodes						
	GI	SB	NA	KO	SA	YAB
GI.SB	1					
SB.IS	2	6				
NA.KO			1			
KO.NA				1		
MI.MA	7	5	8	7	5	7
MI.YE		4	7		4	6
MI.RE	8			8		
YE.MI	6			6		
YE.JE			9		6	8
JE.YE	5			5		
JE.FI			10		7	9
IS.SB				4	9	
IS.FI	3	7				
FI.JE	4	8		3		
FI.IS				2	8	10

RE.MI		3	6		3	5	
RE.YA	9			9			
YA.RE		2	5		2	4	
YA.OG	10			10			
OG.YA		1	4		1	3	
OG.TE		9			10		
ER.TE			2				
TE.OG			3			2	
TE.ER		10				1	
	+	MA	MI	YE	JE	IS	FI
SB.IS			6				
MA.MI	3						
MI.MA		2	2	7	7	7	
MI.YE	4	1			6		
MI.RE	5	3	3	8		8	
YE.MI			1	6		6	
YE.JE		7					
JE.YE				5		5	
JE.FI		8		1			
IS.SB	8	10		4	8	4	
IS.FI	1		7		1		
FI.JE	2		8		2	2	
FI.IS		9		2		1	
RE.MI					5		
RE.YA	6	4	4	9		9	
YA.RE					4		
YA.OG	7	5	5	10		10	
OG.YA					3		
OG.TE	9		9		9		
ER.TE		6		3		3	
TE.ER	10		10		10		
	+	RE	YA	OG	ER	TE	PE
SB.IS				6			
MI.MA	4	5	5	7	7	5	
MI.YE	3	4	4	6		4	
MI.RE					8		
YE.MI					6		
YE.JE	5	7		8		6	
JE.YE					5		
JE.FI	6	8		9		7	
IS.SB	8	10			4	9	
IS.FI			7		1		
FI.JE			8		2		
FI.IS	7	9		10		8	
RE.MI	2	3	3	5		3	
RE.YA	1				9		
YA.RE		1	2	4		2	
YA.OG		2			10		
OG.YA			1	3		1	
OG.TE	9		9			10	
ER.TE		6		1			
TE.OG				2			
TE.ER	10		10			3	
	+	BI	EL	KU	KI	MO	CE
MI.MA	7	6	9	8	7	6	
MI.YE	6		8		6		

MI.RE	7		9		7
YE.MI	5		7		5
YE.JE	8	10		8	
JE.YE		4	6		4
JE.FI	9		3	9	
IS.SB		3	5		3
IS.FI	1				1
FI.JE	2				2
FI.IS	10		4	10	
RE.MI	5	7		5	
RE.YA		8	10		8
YA.RE	4		6	1	
YA.OG		9		4	9
OG.YA	3		5		
OG.TE		10			10
TE.OG	2		4		
TE.ER	1		3		
KU.KI		1			
KI.KU			1	3	
KI.MO		2	2		
MO.KI				2	

Tablo 4: Senaryo Durumlarına Minimum Kapsama Ağacı Modeli Sonuçları

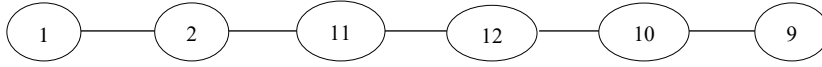
Program kısaltmaları	Senaryo 1 için sıralama	Senaryo 2 için sıralama	Senaryo 3 için sıralama	Mesafeler (m)
GL.SB	1	1	1	86
SB.IS	2	2	2	55
NA.SA			15	73
KO.NA			14	11
MI.MA		7	7	43
MI.RE		8	8	46
YE.MI		6	6	38
JE.YE	5	5	5	58
IS.FI	3	3	3	27
FI.JE	4	4	4	39
RE.YA		9	9	24
RE.KO			13	76
YA.OG		10	10	39
OG.TE			11	72
TE.ER			12	47

Sonuç ve Gelecek Çalışmalar için Öneriler

GAMS programında geliştirilen algoritmanın çıktıları doğrultusunda elde edilen Minimum Kapsama Ağacı modeli sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 3'te yer alan program çıktısında, örneğin GI.SB durumu Senaryo 1'de birinci sırada bulunmaktadır. Bu durum, Tablo 2'de belirtilen kısımdan da anlaşılacağı üzere, Giriş ile Sosyal ve Fen Bilimleri Enstitüsü arasında bir bağlantı yolu olması gerektiğini ortaya koymakta ve bu yolun öncelikli konumda olacağı anlaşılmaktadır. Diğer durumlar da benzer bir şekilde değerlendirilecektir. Son olarak, GAMS programında planlama amacıyla Minimum Kapsama Ağacı algoritması kullanılarak bir yol haritası oluşturulmuştur. Bu yol haritası, Senaryo 1, Senaryo 2 ve Senaryo 3 için Minimum Kapsama Ağacı olarak ilerleyen

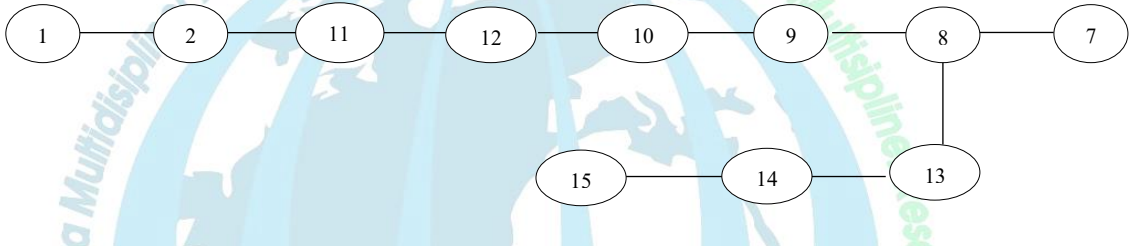
bölmelerde gösterilmiştir. Ayrıca, bu yol haritasında yer alan her bir rakam, Tablo 2'deki bölümleri temsil etmektedir.

Senaryo 1 için Minimum Kapsama Ağacı



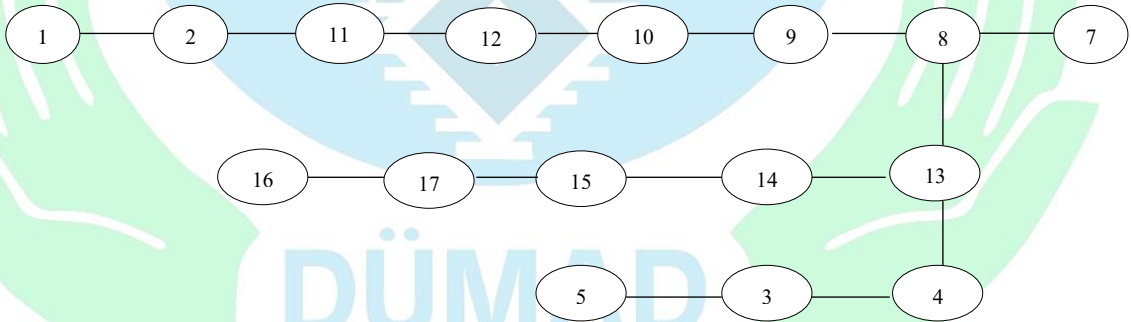
$$\text{Toplam uzunluk}=86+55+27+39+58=265 \text{ m}$$

Senaryo 2 için Minimum Kapsama Ağacı



$$\text{Toplam uzunluk}=86+55+27+39+58+38+43+46+24+39=455 \text{ m}$$

Senaryo 3 için Minimum Kapsama Ağacı



$$\text{Toplam uzunluk}=86+55+27+39+58+38+43+46+24+39+72+47+76+11+73=734 \text{ m}$$

Senaryo 1, 2 ve 3 durumlarında ifade edilen duruma göre yol haritalarında tek yönlü hesaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Senaryo 2 için belirtilen durumda 8'den 7 ye olan bağlantıda hesaplama tek yönlü olarak yapılmıştır. Aynı şekilde diğer senaryolarda da minimum kapsama ağacı yöntemi için uzaklıklar tek yönlü olarak hesaplanarak sonuç ifadesi yazılmıştır.

Bu bölümden hareketle, çalışmada üniversite kampüsünde bir rotalama sistemi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, analiz yöntemi oluşturularak değişken durumlara uyum sağlayacak bir senaryo tasarlanmasına karar verilmiştir. Söz konusu senaryoda, MST yönteminde ayarlanacak

düğümüleri birbirine bağlayan kenar sayısı dikkate alınarak bir yol akış diyagramı hazırlanmış ve kampüs alanındaki ihtiyaçlara göre bu koşulların değişimi mümkün hale getirilmiştir. Bu çalışma ile ayrıca deprem ya da benzeri kritik durumlarda acil toplanma noktası ya da bu bağlamda düşünülecek farklı fikirler için yol gösterici olması ve paydaşlara fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Ağ analizi, bir bölgedeki tüm alanların değerlendirilmesi açısından alınacak kararlarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen Minimum kapsama ağacı (MST) yönteminin uygulanmasının çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bu yöntem, telekomünikasyon ve ulaşım gibi trafik akışını içeren uygulamalarda çözüm sürecini kolaylaştırmakta ve ağ tasarımında yoğunluğun azaltılmasına olanak tanımaktadır. Böylece, kenar noktalarındaki yoğunluğun en aza indirilmesi sağlanmakta ve maliyetle ilgili olası ek durumların önüne geçilerek tasarruf imkanı sunulmaktadır. Ağ optimizasyonu, karmaşık durumlardan uzak durarak daha basit bir yapı ile gerçekleştirilmektedir. Graf teorisi temelinde geliştirilen bu yöntem, yeni kısıtların eklenmesine ve isteğe bağlı değişikliklerin yapılmasına imkan tanımaktadır. Ancak, MST yönteminin bazı dezavantajları da mevcuttur. Yeni düğüm ve kenar eklenmesi, iyileştirme sürecini zorlaştırabilir ve kenar ağırlıklarının belirsiz olduğu durumlarda etkili sonuçlar elde edilemeyebilir.

Ağ analizi için kullanılacak diğer yöntemler de önemli bir işlevsellik kazanmaktadır. MST yöntemine alternatif olarak çeşitli yöntemler mevcut olsa da, Dijkstra veya Bellman-Ford gibi en kısa yol algoritmalarında MST yönteminde yer alan tüm köşeler kullanılmamaktadır; yalnızca belirli iki köşe dikkate alınmaktadır. Maksimum kapsama ağacı yönteminde ise kenar toplamının minimizasyonu yerine maksimizasyonuna odaklanılmaktadır. Kruskal ve Prim yöntemlerinde farklı kriterler kullanılarak ekleme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, uzaklıkları minimize ederek düğümlerin gruplandırılmasını sağlayan grafik kümeleme analizi de uygulanabilir. Ağ akış analizi ise uzaklık yerine bağlantılara odaklanmaktadır. Yaklaşım algoritmaları ise karmaşık ağ sistemlerinde kullanılmaktadır. Bahsedilen yöntemlerle birlikte En Kısa Yol, Minimum Maliyet Akışı ve Maksimum Akış modelleri gibi yöntemler, bu analizde uygulanarak çeşitli sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca, yeni eklenen veya yer değiştiren bölümler için yeniden ölçüm yapılarak analizlerin tekrarlanması mümkündür.

Kaynaklar

https://www.gams.com/latest/gamslib_ml/libhtml/gamslib_mst.html

Allison, R. J., Goodwin, S. P., Parker, R. J., Portegies Zwart, S. F., de Grijs, R., & Kouwenhoven, M. B. N. (2009). Using the minimum spanning tree to trace mass segregation. In. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org.

Ana, U. (2021). *Yönlü Graflar*. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Retrieved from <https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/27d9dd09-4d19-4b03-94ed-d43e7d6c1a5e/content>

- Antos, K. (2015). Minimum spanning tree problem. In Barış, Ö., & Özceylan, E. (2019). Optimization of Minimum Spanning Tree and Traveling Salesman Problems Arising in a University Campus Network. *International Journal of Industrial Engineering and Operational Research*, 1(1), 1-10.
- Büke, C. O., & Erturaç, M. K. (2016). Ağ Analiz Yöntemiyle Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsünün İncelenmesi ve Web Tabanlı Sunumu. *Nature Sciences*, 11(4), 14-25.
- Dongxiao Liu, & Zhao, T. (2021). Application of Minimum Spanning Tree in the Solution of Forest Fire Intelligent Drone Deployment. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Dutta, S., Patra, D., Shankar, H., & Verma, P. A. (2014). Development of Gis Tool for the Solution of Minimum Spanning Tree Problem using Prim's Algorithm. In (Vol. XL, pp. 1105-1114). Göttingen: Copernicus GmbH.
- Erkal, T. (2013). Eskişehir’de acil durum yönetiminde ağ (network) analizlerinin kullanılması. *Türk Coğrafya Dergisi*(61), 11-20.
- Evans, J. R., Minieka, E., & Minieka, E. (1992). *Optimization algorithms for networks and graphs* (2nd ed.). New York: M. Dekker.
- Fang, K., Model, P., & Yiqin, X. (2008). *GIS network analysis in rescue of coal mine*. Paper presented at the 21st International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress.
- Faruk Dayı, & Ulusoy, T. (2018). Evaluating financial performance with minimum spanning tree approach: an application in airlines companies. *13(30)*, 89-103. doi:10.7827/TurkishStudies.14348
- Finke, G. (2008). *Operations Research and Networks*.
- Gen, M., Cheng, R., & Lin, L. (2008). *Network Models and Optimization Multiobjective Genetic Algorithm Approach*(pp. XIV, 692 p). doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7>
- Golden, B., Raghavan, S., & Stanojevic, D. (2005). Heuristic Search for the Generalized Minimum Spanning Tree Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 17(3), 290-304. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/200530855?accountid=15962>
- Gopal Pandurangan, Peter Robinson, & Squizzato, M. (2018). The Distributed Minimum Spanning Tree Problem. *Bull. EATCS*. Retrieved from <https://www.math.unipd.it/~scquizza/papers/PanduranganRS18b.pdf>
- Gros, C. (2013). Graph Theory and Small-World Networks. In *Complex and Adaptive Dynamical Systems* (pp. 1–40).
- Haripriya V, & K, S. H. (2023). *The Performance Optimization of Approximate Minimum Spanning Tree for The Different Mobility Model*. Paper presented at the 2023 International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE).
- Huong Luu, & Chrobak, M. (2022). Better Hardness Results for the Minimum Spanning Tree Congestion Problem. *Computer Science* doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.08219>
- Jia Li, Jiangwei Li, Chenxu Wang, Fons J Verbeek, Tanja Schultz, & Liu, H. (2023). Outlier detection using iterative adaptive mini-minimum spanning tree generation with applications on medical data. *Sec. Computational Physiology and Medicine*, 14. doi:<https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1233341>
- Jing Deng, Zihan Xu, & Xing, X. (2023). Dynamic spillovers between clean energy and non-ferrous metals markets in China: A network-based analysis during the COVID-19 pandemic. *Resources Policy*, 83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103575>
- Karas, İ. (2023). Graf Teorisi ve Algoritmaları Retrieved from https://web.karabuk.edu.tr/ismail.karas/759/Sunu1_esas.pdf
- Knowles, J. D., & Corne, D. W. (2002). Enumeration of Pareto optimal multi-criteria spanning trees - A proof of the incorrectness of Zhou and Gen's proposed algorithm. *European Journal of Operational Research*, 143(3), 543-547. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/204152474?accountid=15962>
- Kritikos, M., & Ioannou, G. (2017). A greedy heuristic for the capacitated minimum spanning tree problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 68(10), 1223-1235. doi:<http://dx.doi.org/10.1057/s41274-016-0146-7>

- Larsson, C., & Safari Books Online (Firm). (2014). *Design of modern communication networks : methods and applications*(1st ed., pp. 1 online resource (1 volume)). Retrieved from <https://go.oreilly.com/yale-university/library/view/-/9780124072381/?ar>
- Lenaerts, T. (2011). Scale Free Networks. *Encyclopedia of Astrobiology*, 1492–1493. doi:10.1007/978-3-642-11274-4_1405
- Mark Needham, & Hodler, A. E. (2019). *Graph Algorithms*: O'Reilly Media, Inc.
- Meghanathan, N. (2012). Graph Theory Algorithms for Mobile Ad Hoc Networks. *Informatica*, 36(2), 185-199. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/1346615761?accountid=15962>
- N. Blomsma, B. de Rooy, F. Gerritse, R. van der Spek, P. Tewarie, A. Hillebrand, . . . Dellen, E. v. (2022). Minimum spanning tree analysis of brain networks: A systematic review of network size effects, sensitivity for neuropsychiatric pathology, and disorder specificity *Network Neuroscience* 6(2), 301–319. doi:https://doi.org/10.1162/netn_a_00245
- Needham, M., & Hodler, A. E. (2019). *Graph algorithms : practical examples in Apache Spark and Neo4j*.
- Osipov, V., Sanders, P., & Singler, J. (2009). The Filter-Kruskal Minimum Spanning Tree Algorithm*. In (pp. 52-61). Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Paz Carmi, M. J. Katz, & Mitchell, J. S. B. (2005). The minimum area spanning tree problem. *European Workshop on Computational Geometry*.
- Pirim H, Ekşioğlu B, & AD, P. (2015). Clustering high throughput biological data with B-MST, a minimum spanning tree based heuristic. *Comput Biol Med.* , 62, 94-102. doi:10.1016/j.combiomed.2015.03.031.
- Requejo, C., & Santos, E. (2018). Efficient lower and upper bounds for the weight-constrained minimum spanning tree problem using simple Lagrangian based algorithms. *Operational Research*, 1-29. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s12351-018-0426-x>
- Sara Nasirian, Paola Pierleoni, Alberto Belli, Marco Mercuri, & Palma, L. (2023). Pizzza: A Joint Sector Shape and Minimum Spanning Tree-Based Clustering Scheme for Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 11. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291915>
- Seth Pettie, & Ramachandran, V. (2008). Randomized minimum spanning tree algorithms using exponentially fewer random bits. *TALG*, 4(1). doi:<https://doi.org/10.1145/1328911.1328916>
- Sezen, B., & Erben, B. (2019). Sürdürülebilir ulaşımında önemli bir yere sahip olan bisikletin Gams küme kapsama modeli ile konumlandırılması: Gebze Teknik Üniversitesi örneği. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 2(1), 42-56.
- Şaar, F., & Topcu, A. E. (2021). Minimum spanning tree-based cluster analysis: A new algorithm for determining inconsistent edges. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34. doi:<https://doi.org/10.1002/cpe.6717>
- TESLIUC, M. (2017). The University of Chicago Mathematics REU 2017. Retrieved from <https://math.uchicago.edu/~may/REU2017/>
- Tsiotas, D. (2020). Detecting differences in the topology of scale-free networks grown under time-dynamic topological fitness. *Scientific Reports*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-020-67156-6>
- Vasileios Karyotis, & Khouzani, M. H. R. (2016). Chapter 5 - Malware-propagative Markov random fields. In.
- Wamiliana, W. (2004). Solving the degree constrained minimum spanning tree problem using tabu and modified penalty search methods. *Jurnal Teknik Industri*, 6(1), 1-9. doi:<http://dx.doi.org/10.9744/jti.6.1.pp>.
- Wilson Pavon, Myriam Torres, & Inga, E. (2023). Integrating Minimum Spanning Tree and MILP in Urban Planning: A Novel Algorithmic Perspective. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings14010213>

- Xiao Qun Liao, Tong Su, & Ma, L. (2020). Application of neutrosophic minimum spanning tree in electrical power distribution network. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 5(2). doi:<https://doi.org/10.1049/trit.2019.0100>
- YILDIZ, M., BATI, M., & ŞAHİN, M. (2017). Milli Mücadele Dönemi Savaşlarının En Küçük Örten Ağaç Yöntemi İle İncelenmesi *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(3), 19-36. doi:<https://doi.org/10.18026/cbayarsos.340963>
- Younes Berouaga, Cherif El Msiyah, & Madkour, J. (2023). Portfolio Optimization Using Minimum Spanning Tree Model in the Moroccan Stock Exchange Market. *Int. J. Financial Stud.*, 11(2). doi:<https://doi.org/10.3390/ijfs11020053>
- Zakaria Hasanatu, & Boah, D. K. (2024). Rural Electrification of Selected Areas in the Northern Region of Ghana Viewed as a Minimum Spanning Tree Problem. *Earthline Journal of Mathematical Sciences*. doi:10.34198/ejms.14424.841871

