



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Elektrik dağıtım sistemlerinde ideal transformatör sayısının belirlenmesi

The determination of the convenient number of transformers on electricity distribution systems

Yazar(lar) (Author(s)): Pınar ATAK¹, Ersan GÜRAY², Sırrı Sunay GÜRLEYÜK³

ORCID¹: 0000-0001-6661-8856

ORCID²: 0000-0001-5349-6511

ORCID³: 0000-0003-4375-6767

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz(To cite to this article): Atak P., Güray E. ve Gürleyük S.S., “Elektrik dağıtım sistemlerinde ideal transformatör sayısının belirlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 321-329, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.746615

Elektrik Dağıtım Sistemlerinde İdeal Transformator Sayısının Belirlenmesi

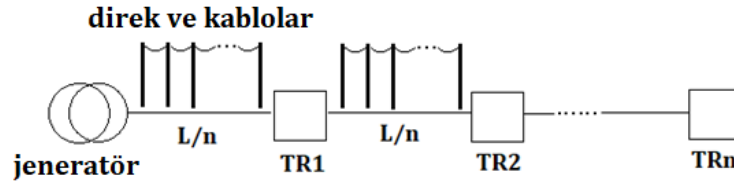
The Determination of the Convenient Number of Transformers on Electricity Distribution Systems

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Maliyetlerini etkileyen en büyük unsur transformatorlerin kendisidir / Transformers themselves are the biggest factor affecting their costs.
- ❖ Kalın çaplı kabloların kullanımı, hem gerilim düşümünün hem de güç kaybının azalmasını sağlar. / The use of large diameter cables ensures that both voltage drop and power loss are reduced.
- ❖ Belli bir ekonomik kullanım ömrü için, sistemin getirisinin maksimum olması ve amortisman süresinin en kısa olması ideal transformator sayısını belirlemede kullanılabilir. / For a certain economic lifetime, the system's return is maximum and the depreciation period is the shortest, which can be used to determine the ideal transformer number.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bir enerji dağıtım sisteminin, başlangıçtaki yatırım giderleri, güç kayıpları, bakım-onarım giderleri ve maddi getirisi göz önüne alınarak çeşitli kapasitede güç gereksinimi ve şebeke uzunlukları için kaç adet özdeş transformator gerektiği hesaplanmıştır./ Considering the initial investment costs, power losses, maintenance-repair costs and financial returns of an energy distribution system, it has been calculated how many identical transformers are required for various capacity power requirements and network lengths.



Şekil. Yüksek gerilim şebekesinin modeli / **Figure.** The model of the high voltage line

Amaç (Aim)

Amaç bir enerji dağıtım sisteminde, maliyet analizlerine dayalı olarak uzun vadede en yüksek kazancı elde etmek üzere ideal sayıda özdeş transformatorü sayıca hesaplamaktır. / The aim is to calculate the ideal number of identical transformers in an energy distribution system to obtain the highest gain in the long run based on cost analysis.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çeşitli hat uzunlukları ve enerji talepleri için testler yapıldı, sonuçlara varıldı. / Tests were made for various line lengths and energy demands, and conclusions were drawn.

Özgünlük (Originality)

Ulusal literatürde çeşitli optimizasyon yöntemlerini irdelemeden önce yapılmış bir önçalışmadır. / This is a preliminary study conducted before examining various optimization methods in the national literature.

Bulgular (Findings)

Transformatorler maliyeti yükseltir. Uygun büyüklükte ve aralıkta olmaları gerekir. Kalın çaplı kabloların kullanımı önem teşkil eder. Sistemin getiri ve amortisman süresi tasarım için kullanılabilir. / Transformers increase the cost. They should be of the proper size and range. The use of large diameter cables is important. The system's yield and depreciation period can be used for design.

Sonuç (Conclusion)

Enerji dağıtım sistemi uygun bir tasarımla en karlı noktaya getirilebilir. / Energy distribution system can be brought to the most profitable point with a suitable design..

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Elektrik Dağıtım Sistemlerinde İdeal Transformator Sayısının Belirlenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Pınar Atak¹, Ersan GÜRAY^{2*}, Sırrı Sunay GÜRLEYÜK¹

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.06.2020 ; Kabul/Accepted : 02.04.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 05.05.2021)

ÖZ

Bu çalışmada, bir enerji dağıtım sisteminin, başlangıçtaki yatırım giderlerinin, güç kayıplarının, zaman içerisinde olacak bakım-onarım giderlerinin ve sistemin maddi getirisinin dahil edildiği, çeşitli kapasitede güç gereksinimi ve şebeke uzunlukları için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Kazancın en yüksek durumda olabilmesi için yeterli sayıda ve gereklilikte özdeş transformatorün sayıca miktarı incelenmiştir. Bunun için, en yüksek kazanç ve en kısa amortisman süresi dikkate alınmıştır. Küçük kesitli kablo olarak Swallow, büyük kesitli kablo olarak Hawk türü kablolar kullanılmıştır. Kalın kesitli kabloların enerji kaybını önlemek için etkili olduğu, ancak gerçekte çok büyük maliyetin transformatorün kapasitesine bağlı olarak kendisinin neden olduğu gösterilmiştir. İdeal sayıda transformatorün tespiti için tek başına en yüksek kazancı ya da en kısa amortisman süresini almak yerine bu ikisinin birbirine en yüksek oranının ele alınmasıyla çok amaçlı bir optimizasyon problemi çözülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Transformator, optimizasyon, maliyet analizi, elektrik dağıtım sistemleri, çok amaçlı optimizasyon.

The Determination of the Convenient Number of Transformers on Electricity Distribution Systems

ABSTRACT

In this study, a cost analysis was performed for an energy distribution system including the initial investment costs, power loss, maintenance-repairment expenses in time and the benefit of the system for various power demands and lengths of power line. Enough and necessary number of the identical transformers was investigated to reach the maximum profit. Hence, the maximum benefit and the shortest depreciation time were taken into account. Swallow type cables are used as small cross section cables and Hawk type cables with large cross sections. That thick section cables are effective for energy loss, but in reality the enormous cost is caused by the transformer itself, depending on its capacity. A multi-objective optimization problem was solved by means of the maximum value of the ratio of the maximum benefit or the shortest depreciation time instead of taking them solely.

Keywords: Transformers, optimization, cost analysis, electricity distribution systems, multi-objective optimization.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik şebekesi insanlara, konutlara, işyerlerine ve ofislere elektrik sağlayan bir şebekedir. Sistem jeneratörlerden, elektriğin yüksek gerilimle (YG) iletildiği transformator şebekesinden ve alçak gerilim (AG) ile her bir transformatorün çevresindeki yerel dağıtımdan oluşur. Başlangıçta, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren jeneratörlerden bir dizi yüksek voltaj tesisine, sonrasında bu tesislerden tüketicilere iletilir. Gücü jeneratörlerden istenilen bölgelere verimli bir şekilde aktarmak için, gerilim, bir şebeke üzerinde bulunan ve uzak aralıklı transformatorler vasıtasıyla düşürülür. Hızlı kentleşme altındaki şehirlerde ve kasabalarda yaşayan insanların artan yaşam standartları nedeniyle enerji talebi oldukça artmaktadır.

Yeni fabrikalar, seri üretim ve yüksek teknoloji, enerji üretimi ve dağıtımını gerektirir. Galvanin, Volta, Oersted, Ohm, Amper, Tesla ve Edison gibi isimlerin keşifleri

elektrik mühendisliğinde doğrudan gerilim/voltaj ile ilgilidir. 1882'de ilk elektrik enerjisi iletimi Thomas A.Edison tarafından 100 V voltajla New York'un Pearl Caddesi'nde 1,6 km mesafede gerçekleştirildi. Tüm bunlara rağmen, enerji iletimi alanındaki hızlı gelişmelere alternatif gerilim ile ulaşılmış, sonraki yıllarda transformatorlerde asenkron motorların kullanımı ile gerçekleşmiştir [1]. Öyle ki, 1920'lerde, 100 kV kadar küçük bir gerilim farkı ile 50 MW güç 50 km'ye iletili. 1930 ve 1950 döneminde, 300 kV voltaj farkı ile 400 Km'ye 250 MW güç sağlandı. 1954 yılında, 1000 MW enerji 380 kV ile taşındı. 90'larda 10000 MW enerji 1000 kV ile iletili ve 1600 kV kullanılması planlanıyordu [2]. Günümüzde elektrik, ekstra yüksek gerilim şebekelerinden yüksek gerilimlerle taşınmaktadır. Daha az voltaj düşümü ve daha az güç kaybı sebebiyle değişken akım tercih edilmiş ve transformatorler ve asenkron motorlar kullanılmıştır.

Elektrik hatlarında enerji talebindeki artışa karşılık mesafelerin uzaması ve daha fazla gücün iletimi gerekmektedir. Bunun için orta ve uzun vadede voltaj

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ersan.guray@mu.edu.tr

düşümünü ve güç kaybını azaltmak sistemin verimliliği açısından çok gereklidir. Bir elektrik dağıtım şebekesinin tasarımında, sisteme yüksek güç taşıyan ana merkezlerin gerekli noktalara yerleştirilmesi ve aralıklı transformatörler aracılığıyla elektriğin taşınması gerçekleştirilir. Bu noktada, transformatörlerin sayısı oldukça önemlidir. Böyle bir yüksek gerilim hattında az sayıda güçlü, yahut çok sayıda düşük kapasiteli transformatörler kullanılabilir. Böyle bir sistemin optimum tasarımı, transformatörlerin kapasitesinin ve sayısının belirlenmesini gerektirir. Bu çalışmada temel olarak, hem amortisman süresi hem de ekonomik ömrün net getirisi aynı anda analiz edilmektedir. Bu birden çok amaç fonksiyonunun ele alınmasıdır ve nihai net kazancın amortisman süresine oranı izlenmektedir. Bu oranın maksimum değeri ya da değerleri, ideal sayıda transformatörü vermektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (PREVIOUS STUDIES)

Bir elektrik enerjisi dağıtım sistemi büyük ölçekli, karmaşıktır ve ayrıca bazı kısıtlamalar içermektedir. Güvenilirliği arttırmak ve başlangıç maliyetini azaltmak için gelişmiş optimizasyon algoritmaları gerekebilir. Düşük voltajlı sistemlerin optimum tasarımı için bazı verimlilik çalışmaları yapılmıştır. Bir çalışmada [3], alçak gerilim hattı yüksek gerilim hattına radyal olarak yerleştirilmekte ve model doğrusal programlamayla analiz edilip optimum sonuçlara erişilmektedir. Sistemin başlangıç maliyeti, güvenilirliği kadar önemlidir [4]. Yatırım veya başlangıç maliyetini azaltmak için, transformatörlerin yeri ve boyutu tasarım sırasında çok önemlidir. Transformatörler toplam maliyetin en büyük alanını içermekte bu da maliyeti düşürmek için transformatör sayısına odaklanmayı gerektirmektedir [5].

Bir mühendislik tasarımı, çok kriterli ancak tek bir sonuca varma durumunu içermektedir [6]. Nihai tasarım performansı artırmayı amaçlamaktadır ve bu durumda maliyeti her zaman en aza indirmektedir. Sistemdeki yük, transformatör ve kablo kayıpları, yük büyümesi veya yerleşimin nüfus artışına bağlı talep miktarı gibi bazı hususlar dikkate alınmalıdır.

Literatürde, böyle bir hattın optimal genişleme planlaması, transformatörlerin optimum boyutlandırılması ve transformatör merkezlerinin yerleşimi ve senkronizasyonu ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda problem bir optimizasyon sorununa indirgenmiş ve uygun çözümler elde edilmiştir. Örneğin, “empyralist rekabetçi algoritma” kullanılarak genişleme planlamaları ve transformatör merkezlerinin konumlandırılması, haritalardaki bölgesel tasarımlar gerçekleştirilmiştir [7,8]. Bölge modellerinde, harita sektörüne ayrılmıştır ve her sektör bir alt bölüme beslenmektedir. Bir başka çalışmada [9], karma tamsayı doğrusal programlama ile transformatörlerin konumlandırılması, boyutlandırılması ve zamanlanmasının planlanması için elektrik dağıtım sisteminin maliyeti en aza indirilmiştir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde, optimum tasarım doğrusal olmayan formüller içermektedir, bu durum stokastik yaklaşımları gerektirmektedir. Yapay sinir ağı yöntemleri ile oldukça verimli çalışmalar yapılmıştır [10, 11]. Genetik algoritmalar [12], stokastik arama kabiliyetlerinden dolayı ekipman maliyeti, kablolar ve güç kaybı da dahil olmak üzere transformatörlerin optimum yerlerini ve boyutlarını belirlemek için çok değerli yöntemlerdir. Elektrik dağıtım sistemleri için optimizasyon çalışmalarında, tek bir amaç fonksiyonu veya bir dizi amaç ile çalışılmaktadır. Çok amaçlı bir problem üzerinde çalışmak için, yatırım maliyeti ve güç kaybı aynı anda en aza indirilir. Çok amaçlı arama ile güç dağıtım planlaması için pareto-optimal arama tabanlı bir algoritma kullanılabilir [13]. Güvenilirlik, operasyon ve bakım maliyetlerinin tümü soruna kısıtlamalar olarak dahil edilmiştir. Optimum çözüm için hesaplamada, yük veya güç talebi sabit veya değişken olabilir.

Bu çalışmada, güç talebinin sabit olduğu kabul edilmektedir. Gerçekte ya da gerçek uygulamalarda, tasarım, gelecek yıllar için ya da en azından belirli bir ekonomik hizmet ömrünün sonuna kadar gerekli güç miktarı için planlanır. Örneğin bir çalışmada [14], değişen güç yükünde transformatör merkezi genişlemesini planlamak için “öğrenme otomata” tabanlı bir arama algoritması uygulanmıştır. Gerilim düşmeleri, termal sınırlamalar, güç akışı ve radyal akış gibi çeşitli elektriksel kısıtlamalar bu çalışmaya dahil edilmiştir. Transformatör şebekesinin 5 yıl süreyle genişletilmesi planlanmıştır. Elektrik dağıtım sisteminin optimizasyonu ve planlanması konusunda, sistem planlamasında uygulanacak yöntemlerin bir listesinin bulunabileceği ayrıntılı bir inceleme çalışması bulunmaktadır [15].

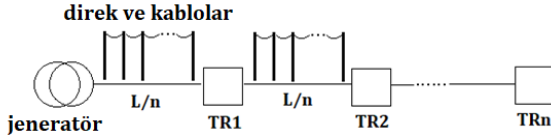
Bu çalışmada, elektrik dağıtımını bir hat şebekesi olarak alınmış, çeşitli şebeke uzunlukları ve bölgenin güç talebi için ideal sayıda transformatör için çalışılmıştır. Burada, transformatör sayısının zaman içinde karlılığı araştırma konusu edilmiştir. Problem, zamana bağlı olan bir maliyet fonksiyonu ile tanımlanır. İlk maliyet, bakım maliyeti ve güç kaybı, çeşitli uzunluk ve güç için gerekli transformatör miktarını belirlemek için probleme dahil edilmiştir.

3. YG HATTININ FİZİBİLİTE HESAPLAMALARI (FEASIBILITY CALCULATIONS OF A HV LINE)

Elektrik, bir YG şebekesi üzerinde bir jeneratörden AG şebekelerine iletilir. Bir YG şebekesinin ana hattının ve transformatörlerin Şekil 1'deki gibi eşit mesafelerde konumlandırıldığı bir hat üzerinde olduğu düşünülür. Çeşitli güç kapasitelerinde ve sayıda transformatör içerebilir. Şebeke hattının toplam uzunluğu L (km) ve transformatörler arasındaki mesafe L/n 'dir, burada n , transformatör sayısıdır. N_T , her bir özdeş transformatörün kW cinsinden kapasitesidir. Bölgenin toplam güç talebi N olarak tanımlanmıştır;

$$N = \sum_{i=1}^n N_T = n N_T \quad (1)$$

Transformatörler, eşit olarak yerleştirilmiş bir dizi direk ve kablolarla birbirine bağlanır. Kablonun uzunluğu, şebeke hat uzunluğuna eşit, L olarak alınır.



Şekil 1. Yüksek gerilim şebekesinin modeli (The model of the high voltage line)

Havadan iletilen kablolar bakır veya alüminyumdur. Bakır alüminyumdan daha pahalı olduğundan, havadan iletilen YG hatlarının çoğu Türkiye'de, alüminyum olarak seçilmektedir. Sonuç olarak, şebeke bu çalışmada 3 fazlı alüminyum kablo hattı ile yapılandırılmıştır. Elektrik direkleri, her bir kablo segmenti sarkmasının kritik bir sayıdan daha az olması gerektiği şekilde, eşit mesafelerle yerleştirilir. Hattın ikincil tipte bir buz yük bölgesinde yapıldığı ve ortak AG hatları ile de kullanıldığı varsayıldığı için, iki keyfi kutup arasındaki mesafe minimum 40 m olarak kabul edilir [16].

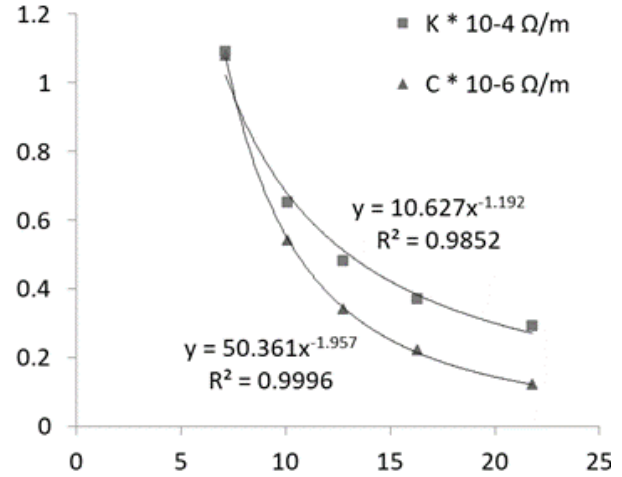
Kablonun çapı hat boyunca eşittir. YG kablosunun tipine bağlıdır; bunlar saha uygulamaları için standartlaştırılmıştır. Türkiye'de uygulamalarda kullanılan çaplarda 7,14 mm'den 21,77 mm'ye kadar 5 farklı kablo tipi vardır, bunlara sırasıyla Swallow, Raven, Pigeon, Partridge ve Hawk denir.

Mühendislik tasarımının maliyetini, risklerini değerlendirmek veya tanımlamak için sistemin verimliliği etüt edilmelidir. Karar verme sürecinde, bir mühendis ilk sistemin maliyetini, belirli bir süre içinde sistemin net kazancını, sistemdeki kayıpları, örneğin, güç kaybını veya tesislerin bakım maliyetini hesap etmektedir. Bu bölümde sırasıyla voltaj düşümü ve güç kaybı, ilk aşamadaki maliyet, bakım masrafları ve sistemin net kârı açıklanacaktır.

3.1. Şebekede Gerilim ve Güç Kaybı (Voltage Drop and the Loss of Power in the Line)

Gerilim düşümleri ve güç kayıpları, herhangi bir elektrik devresinin direncinden kaynaklanan doğal olgulardır. Burada, YG hatlarında, transformatörlerin gücü, şebeke üzerindeki gerilim farkı ile karşılaştırıldığında, gerilim düşümleri ve güç kayıpları önemli hale gelecek şekilde çok yüksektir. Bu düşüm ve kayıplar, kablo malzemesinin elektrik direncine, transformatörlerin arasındaki uzunluğa ve kablonun kesit alanına bağlı olarak sistemin direncinden kaynaklanır. Uzunluktan bağımsız olarak, 31.5 kV gerilim ve alüminyum kablo için Çizelge 1'de verilen iletken katsayıları (K ve C)

kullanılır [17]. Bu veriler, Herhangi bir kablo boyutu için K ve C değerleri enterpolasyonla elde edilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Alüminyum kabloların çapa(D) karşılık voltaj düşümü(K) ve güç kaybı(C) katsayıları (Diameter(D) vs voltage drop(K) and power loss(C) coefficients of aluminum cables)

Çizelge 1. Alüminyum kablolar, sırasıyla ikinci sütundan son sütuna kadar 31.5 kV için çap, voltaj kaybı ve güç kaybı katsayıları [17] (Aluminum cables, diameter, voltage drop and loss of power coefficients for 31.5 kV from second column to last column, respectively [17])

YG Kablo tipleri	Çap, D (mm)	Voltaj düşümü katsayısı, K(Ω/m)	Güç kaybı katsayısı, C(Ω/m)
3xSw Swallow	7.14	1.09*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻⁶
3x1/0 Raven	10.11	0.65*10 ⁻⁴	0.54*10 ⁻⁶
3x3/0 Pigeon	12.75	0.48*10 ⁻⁴	0.34*10 ⁻⁶
3x266.8 Partridge	16.28	0.37*10 ⁻⁴	0.22*10 ⁻⁶
3x477 Hawk	21.77	0.29*10 ⁻⁴	0.12*10 ⁻⁶

Şebekenin gerilim düşümü aşağıdaki formülle belirlenir:

$$e \% = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n K \cdot \left(\frac{L}{n}\right) \cdot G_i \quad (2)$$

Karşılık gelen güç kaybı ise:

$$p \% = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n 100 \cdot c \cdot \left(\frac{L}{n}\right) \cdot G_i^2 / N \quad (3)$$

Çizelge 2. Çeşitlilik faktörleri [18] (Factor of variations [18])

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥ 10
d _i	1.0	0.96	0.91	0.87	0.83	0.80	0.77	0.74	0.72	0.70

Elektrik üç ayrı kablodan iletişildiğinden, hem gerilim düşümü hem de güç kaybı 1/3 faktör ile çarpılır. c, enerjinin TL/kW-saat cinsinden finansal değeridir. L / n,

en yakın iki özdeş transformatör arasındaki mesafedir ve G_i transformatörün gücünün % 70 oranında kullanılması durumunda, şebeke gücüdür:

$$G_i = 0.7 \cdot d_i \cdot i \cdot N_T \quad (4)$$

d_i transformatörlerin eşzamanlı aktivite çeşitlilik faktörüdür. Transformatörün sıra numarasına bağlıdır ve $n \geq 10$ için 0.7 olur (Çizelge 2). Güç kaybı maliyeti yıl bazında, şu şekilde belirlenir:

$$f_{gk}(y) = (24 \cdot 365) \frac{p}{100} N c \quad (5)$$

3.2 Şebekenin Başlangıç Maliyeti (Initial Cost of the Line)

Sistemin maliyeti temel olarak transformatörlerin gücüne, kabloların boyutuna ve kulelerin uzunluğuna bağlıdır. Transformatörler için başlangıç maliyeti, $f_{i,tr}$, belirlenirken, birim uzunluk için alüminyum kablo maliyeti, $f_{i,k}$ ve uzunluk başına hat direklerinin maliyeti, $f_{i,d}$ 2018 yılı fiyat listesinden alınmıştır [19-21]. Transformatörün güce bağlı maliyeti doğrusal regresyona uygundur ve direk maliyeti sabit alınmaktadır. Transformatörün güç kapasitesi, maliyetini belirleyen ana faktördür (Şekil 3). Gücü 400 kW veya daha az olduğunda bir direğe kolayca kurulur, ayrıca bir yapı gerektirmediğinden daha ucuzdur. Tüm transformatörler eşit güç kapasitesine sahip olduğundan, transformatör maliyeti Eşitlik 6'da gösterildiği gibidir:

$$f_{i,tr}(N) = 6.7909N + 11414 \quad (6)$$

Birim uzunluk başına kablo maliyeti ($f_{i,k}$), \$ / km cinsinden kablunun kalınlığının bir fonksiyonu olarak 2. dereceden bir polinom için uygundur (Şekil 4):

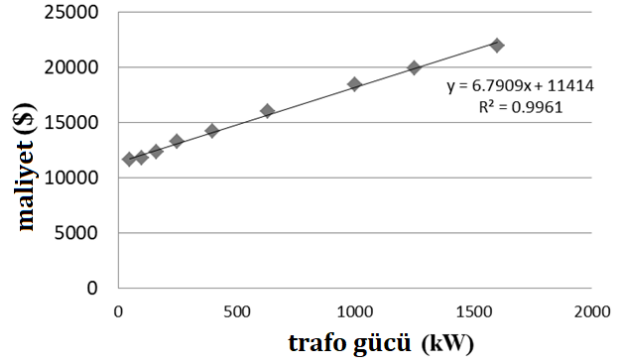
$$f_{i,k}(D) = 4.7855D^2 - 9.4162D + 249.12 \quad (7)$$

Burada D, alüminyum kablunun mm olarak çapıdır. Her bir direğin maliyeti 400 \$ olarak sabit alınmıştır. Burada, direklerin hat üzerinde 40 m mesafeyle bulunduğu varsayılmaktadır:

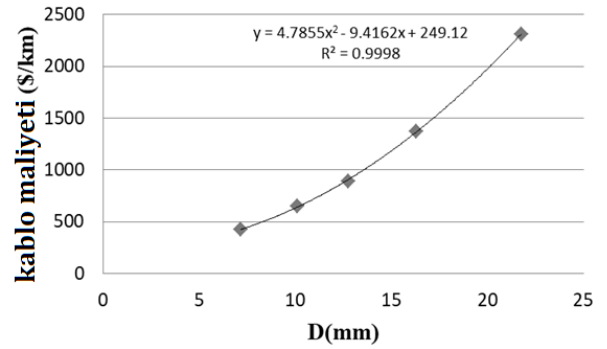
$$f_{i,d}(L) = 10000L \quad (8)$$

Hattın başlangıç maliyeti, f_i tüm bu ilk masrafların toplamı olarak formüle edilebilir:

$$f_i = n f_{i,tr}(N) + 3L f_{i,k}(D) + f_{i,d}(L) \quad (9)$$



Şekil 3. Bir transformatörün gücü (N) ile başlangıç maliyeti, ($f_{i,tr}$) (Initial cost of a transformer according to its power(N), ($f_{i,tr}$))

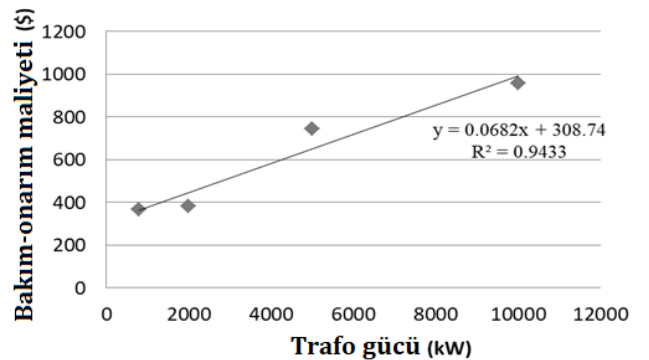


Şekil 4. Çap (D) ve kablo maliyeti-($f_{i,k}$) (Diameter (D) vs. cost of the cable-($f_{i,k}$))

3.3 Bakım-Onarım Maliyetleri (Maintenance Costs)

Transformatörlerin periyodik bakım maliyeti, tüm şebekenin bakım maliyetinin ana parçasıdır. Transformatör başına olan giderler Şekil 5'de verilmiştir [22]. Transformatörlerinkine göre kabloların ve direklerin bakım-onarım giderlerinin çok düşük olması nedeniyle, bu tutarlar göz ardı edilmiştir. Herhangi bir yıldaki bakım-onarım maliyeti şu şekilde belirlenir:

$$f_b(y) = (0.0682N + 308.74) \quad (10)$$



Şekil 5. Transformatörün gücüne göre bakım-onarım maliyeti- f_b (Maintenance cost of the transformer according to its power capacity- f_b)

3.4 Net Kazanç ve Amortisman Süresi (Net Benefit and the Depreciation Period)

Sistemin kazancı, satılan enerji miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Yerli bir bölgede, sakinlerin elektrik talebi belirli bir süre için belirlenebilir veya tahmin edilebilir. Transformatörlerin güç kapasitesi, belirlenen veya öngörülen bu talebe uygun olmalıdır. Başka bir deyişle, tüm transformatörlerin güç kapasitesinin toplamı, bölgenin toplam güç talebine eşit olmalıdır. Güç talebinin sayısal modeli, sabit ya da doğrusal artan bir nüfus modeli ile öngörülmektedir:

$$N' = \left\{ \begin{array}{l} (N - N_0)/y_s + N_0 \\ N \end{array} \right. \quad (11)$$

N_0 bölgenin ilk güç talebidir ve y_s sistemin servis ömrüdür. Bu durumda hattın getirisi:

$$f_{hg}(y) = 0.7(24 \cdot 365) \frac{r}{100} N' c y \quad (12)$$

Sistemin net kazancı, tüm giderler; güç kaybı (Eşitlik 5), başlangıç maliyeti (Eşitlik 9) ve bakım maliyetinin (Eşitlik 10), hattın getirisinden (Eşitlik 11) çıkarılarak elde edilir, öyle ki:

$$f_{net}(y) = f_{hg}(y) - (f_i + f_{gk}(y) + f_b(y)) \quad (13)$$

Hattın amortisman süresi, y_{as} , Eşitlik 13'ün kökleri aracılığıyla belirlenir.

$$f_{net}(y_{as}) = 0 \quad (14)$$

Eşitliğin kökleri yaklaşık olarak Newton-Raphson prosedürü ile belirlenmektedir:

$$y^{k+1} = y^k - \frac{df_{net}^k}{dy} / f_{net}^k \quad (15)$$

f_{net}^k , sistemin y^k 'deki net faydasıdır. $\frac{df_{net}^k}{dy}$ türevi ise forward-Euler yaklaşımıyla hesaplanır:

$$\frac{df_{net}^k}{dy} \approx \frac{f_{net}(y_k + \delta) - f_{net}(y_k)}{\delta} \quad (16)$$

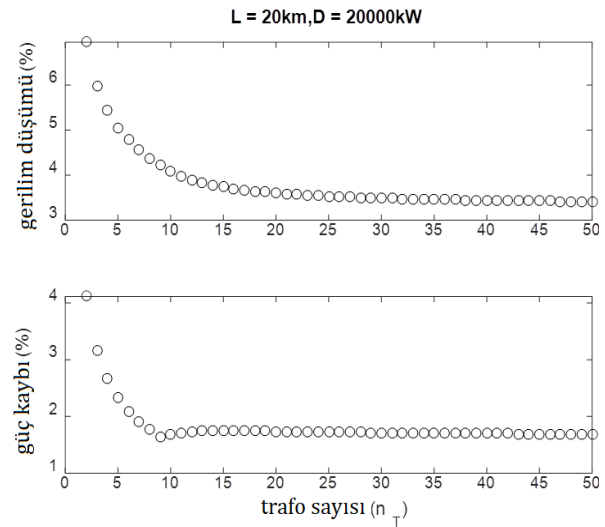
δ türev hesaplaması için gerekli zaman adıdır ve yeterince küçük seçilir.

4. SAYISAL ÇALIŞMALAR (NUMERICAL STUDIES)

Çalışmanın bu bölümünde, bazı L ve N değer aralıkları için analizler yapılmıştır. L, 1 km ile 40 km arasında, 1 km aralıklarla, hattın toplam güç talebi, 400 kW ila 48400 kW arasında, 1400 kW ile aralıklı bir dizidir. Kablo alüminyum olarak alınmıştır. İlk testte, kablunun çapı, küçük kesitli kabloları temsilen, swallow tipine karşılık gelen 7.14 mm'dir. Sonraki aşamada, çap, büyük kesitli kabloları örnek oluşturmak üzere, Hawk tipine karşılık gelen 21.77 mm olarak değiştirilmiştir. Bu çalışmada, nüfusun hattın ekonomik ömrünün başından sonuna kadar doğrusal olarak arttığı varsayılmaktadır ve

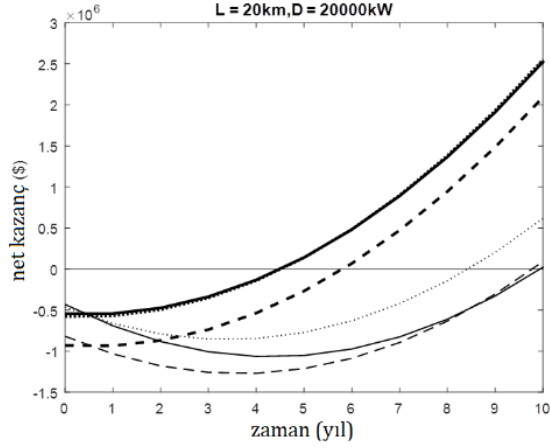
başlangıçta nüfusun 200 olduğu kabul edilmektedir ve her birey saatte 2 kW talep etmektedir.

Transformatör sayısını artırılarak gerilim düşümü ve güç kaybı azalır. Özel olarak açıklamak gerekirse, 20 km'lik bir şebeke mesafesi ve 20 MW'lık bir güç talebi seçilir (Şekil 6). Verimli bir elektrik dağıtım sisteminde, resmi standartlar gereğiyle de hem gerilim düşümü, hem de güç kaybı % 5'ten az olmalıdır. Sadece transformatörlerin sayısı değil, aynı zamanda kablunun boyutu da bu ikisi üzerine etkilidir (Eşitlik 2 ve 3). İnce kabloların kullanılması daha büyük kayıplara neden olur. Gerilim düşüşü % 3,5'e ulaşır ve swallow kablo için güç kaybı yaklaşık % 2'dir (Şekil 6). Hawk kablosu durumunda, gerilim düşümü ve güç kaybı sırasıyla % 1 ve % 0,2'ye yakındırlar.

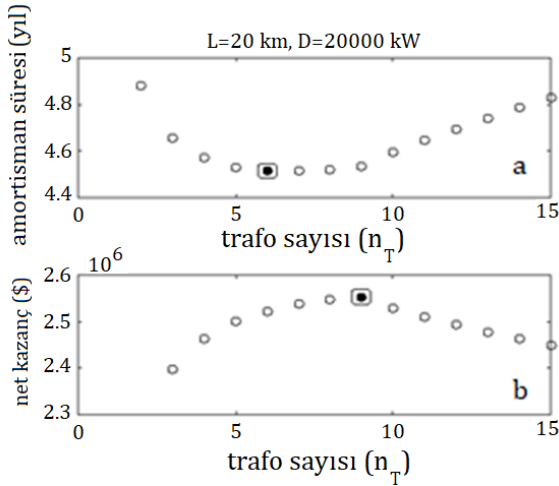


Şekil 6. Swallow kablo için transformatör sayısına göre gerilim düşümü ve güç kaybı (Voltage drop and power loss for swallow cable according the number of the transformers)

Daha önce (Eşitlik 13) ile açıklandığı gibi, net kazanç eğrisi başlangıç maliyetinden ötürü negatif bir seviyeden başlar ve sistem karlı ise yıllar içinde artış eğilimi gösterebilir (Şekil 7). 6 veya 9 transformatör durumunda, sistemin başlangıç maliyeti, 40 adet transformatör durumuna göre açıkça daha ekonomiktir. Hawk kablo kullanımı da yine başlangıçtaki maliyeti oldukça arttırmaktadır. Swallow kablo başlangıçta düşük maliyetli olsa da, karşılık gelen ince eğrilerden de görüldüğü üzere, 10 yıl sonunda, neredeyse hiç kazanç getirmez. Aksine, Hawk kullanmak sistemi faydalı kılar. Özellikle 9 transformatör kullanmak maksimum kar elde edecektir. Hawk kablosu ile başlangıçmaliyeti kolayca telafi edilebilmektedir, bir başka deyişle amortisman süresi kısadır. Bu süre 6 veya 9 transformatörün kullanılması durumunda 5 yıldan azdır, yaklaşık 4,5 yıldır (Şekil 8a). Nihai net kazanç, 9 transformatör için maksimum 2.55 milyon \$'dır (Şekil 8b).



Şekil 7. Yıl bazında net kazanç eğrileri, Swallow kablo (ince çizgiler) ve Hawk kablo (kalın çizgiler), düz, noktalı ve kesik çizgiler sırasıyla 6, 9 ve 40 transformatör için (Net benefit curves in years for swallow cable (thin lines) and Hawk cable (thick lines), straight, dot and dashed for 6,9 and 40 transformers, respectively)

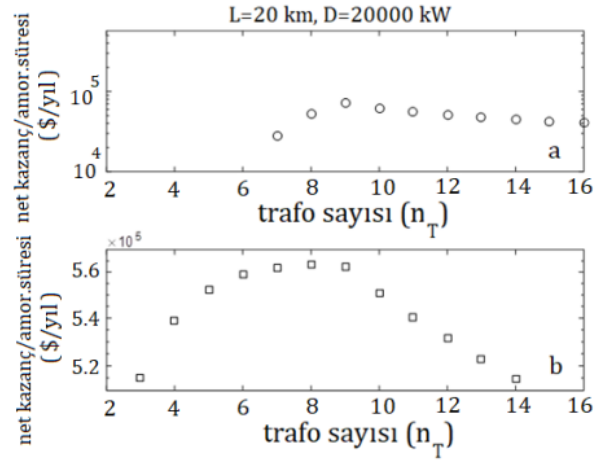


Şekil 8. Hawk kablosu için amortisman süresi (a), nihai net kazanç (b) (Depreciation period (a), final net benefit(b) for Hawk cable)

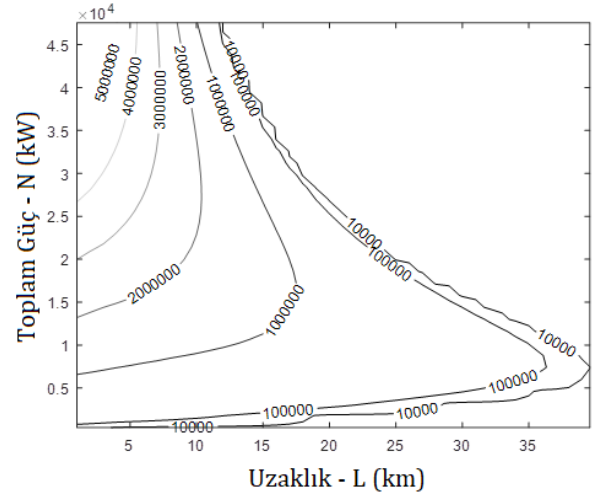
Bu çalışmanın ana hedefi, hem amortisman süresini hem de nihai net kazancı aynı anda analiz etmektir. Bunu yapmak için, nihai net kazancın amortisman süresine oranı analiz edilebilir (Şekil 9). Bu oranın maksimum değeri, belirli bir kablo tipi için optimum transformatör sayısına karşılık gelir. Bu oranlar Swallow ve Hawk kabloları için sırasıyla yaklaşık olarak 10^5 \$/yıl (Şekil 9a) ve 5.7×10^5 \$/yıl'dır (Şekil 9b). Grafikler incelendiğinde bu oranlar için Swallow kablo 9 transformatör, Hawk kablo 8 transformatör gerekmektedir.

Şekil 10 ve Şekil 11'deki eş-kontur çizgileri, optimum sayıda transformatör için maksimum net faydayı

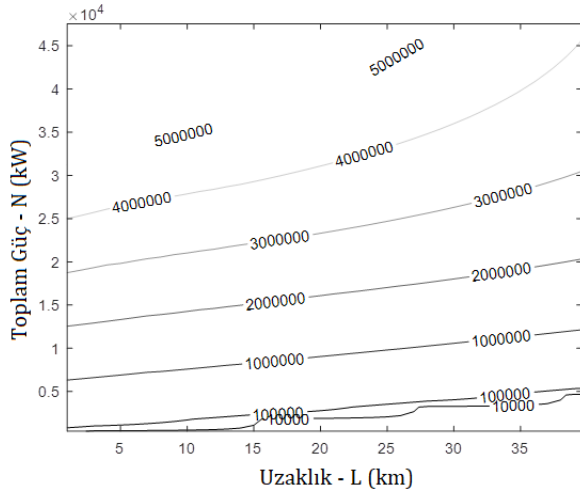
göstermektedir. Swallow kablonun, bazı uzunluk ve güç talepleri oldukça getiriz hatta zararlıdır. Şekil 10'da net kazancın 10000'den az olduğu bölgedir. Ancak, Hawk kablosu durumunda tüm uzunluk ve güç talebi çiftleri için her zaman bir kazanç vardır (Şekil 11). Sistemin her daim kazançlı olduğu Şekil 12'de de görülmektedir, 5000 kW ve daha üstü güç talebi için tüm mesafeler de 10 yıldan azdır. İdeal transformatör sayıları net kazanç amortisman süresi oranıyla incelendiğinde transformatör sayısının top güç talebi ile arttığı görülmektedir (Şekil 13). Grafiğin sol üst kısmındaki büyük boşluk 9 transformatörün en karlı olduğunu gösteren bölgedir.



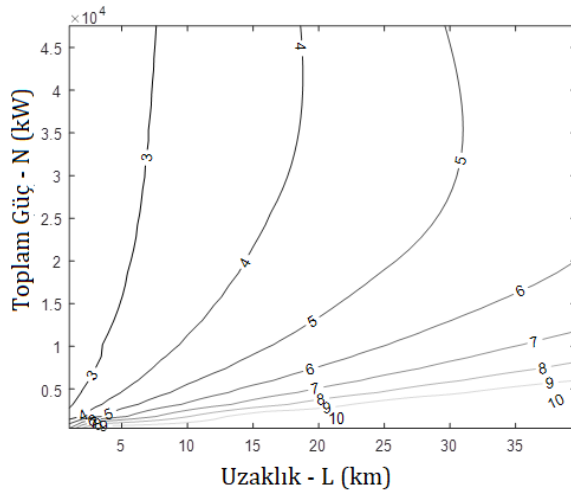
Şekil 9. Swallow kablo (a) ve Hawk kablo (b) için nihai net kazanç ve amortisman süresi oranı (Final net benefit to depreciation period ratio for Swallow cable (a) and Hawk cable(b))



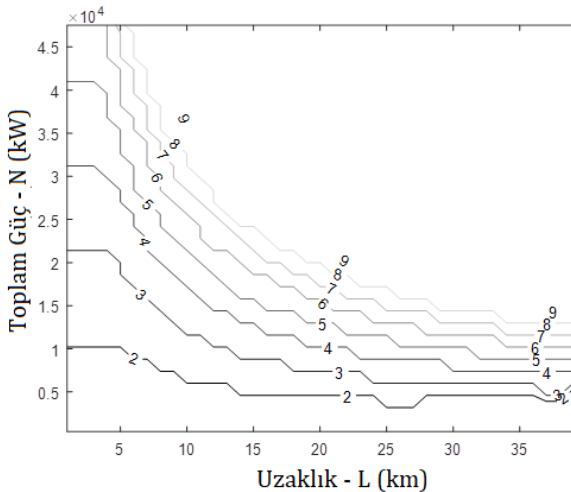
Şekil 10. Swallow kablo için net kazanç çizgileri (Net benefit curves for swallow cable)



Şekil 11. Hawk kablo için net kazanç çizgileri (Net benefit curves for Hawk cable)



Şekil 12. Hawk kablo için amortisman süreleri (Depreciation periods for Hawk cable)



Şekil 13. Net kazanç amortisman süresi oranının maksimum olduğu durumlarda Hawk kablosu için ideal transformatör sayıları (Ideal number of the transformers corresponding to maximum value of the final net benefit to depreciation period ratio)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapının ilk maliyeti büyük ölçüde transformatör sayısına ve bu transformatörlerin kapasitesine bağlıdır. İlk maliyet haricinde yıllık bakım-onarım masrafları düşünüldüğünde, transformatörlerin sayısı ayrıca önem arz etmektedir. Sadece sayıları değil, aynı zamanda güç kapasiteleri de bakım maliyetini etkiler. Transformatör sayısının sınırlandırılması, bu başlangıç ve bakım maliyetini azaltmaya yardımcı olacaktır, ancak bu durumda, çok aralıklı konumlandırılmış transformatörler, sistemin fizibilitesi üzerinde olumsuz etkisi olan aşırı enerji kaybına neden olabilir. Öte yandan, gereksiz yere çok sayıda transformatör ilk yatırım maliyetini ve yıllık bakım maliyetini artıracaktır. Aslında, transformatörlerin sayısına problemi ana hatlarıyla içeren bir matematik modelleme ile karar verilmelidir, böylece tüm maliyetler azaltılır ve sistemin toplam net kazancı maksimuma çıkarılır. Bu çalışmada gösterilen net kazanç değerlerini çeşitli değişkenlerde elde etmemize yarayacak fonksiyonun tanımlanması (Eşitlik 13), gerilim düşümü, güç kaybı gibi sınırlandırma fonksiyonlarının (Eşitlik 2 ve 3) ortaya konmasıdır. Bu tanımlanmış fonksiyonlarla belli aralıklarla tanımlanmış olası sistemler incelenmiş ve ideal sayıda transformatörün ne olması gerektiğine kanaat getirilmiştir. Herhangi spesifik uzaklık (L) ve güç talebi (N) için gereken ideal transformatör sayısı gradyan tabanlı ya da sezgisel bir optimizasyon algoritmasıyla elde edilebilir. Bu da bir başka çalışmanın konusudur. Yine böyle bir çalışmada da, elektrik enerjisi dağıtım sistemi, başlangıç veya diğer bir deyişle yatırım maliyetleri, işletme giderleri ve dönemsel faydaya bağlı olarak tasarlanabilir. Net kazancın en yüksek olduğu ve/veya amortisman süresinin en aza indirildiği sistem/sistemler araştırılabilir ve ideal/optimum sayıda transformatör sayısına erişilebilir.

Bu çalışmada, maksimum net kazancın ya da en kısa amortisman süresinin veya her ikisinin incelendiği durumlara karşılık olarak bazı sonuçlara erişilmiştir. Bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- İnce kablolar elektrik dağıtım sisteminde başlangıç maliyetlerinin azalması için iyidir ancak bu etki tüm maliyetler içinde çok düşüktür. Başlangıç maliyetlerini etkileyen en büyük unsur transformatörlerin kendisidir.
- Başlangıçta maliyetleri arttırmasına karşılık kalın çaplı (örneğin bu çalışmada Hawk) kablolar, hem gerilim düşümünün hem de güç kaybının azalmasına böylece sistemin genel olarak kazançlı olmasına sebep olmaktadır.
- İdeal sayıda transformatörün belirlenebilmesi için izlenmesi gereken temel kriterler belli bir zaman zarfında ki bu çalışmada ekonomik kullanım süresinde, sistemin getirisinin maksimum olması ve bu sistemin kendi kendini geri ödeme süresi olan amortisman süresinin en kısa olması şeklindedir.
- Tek başına net kazanca bakarak ya da tek başına en kısa amortisman süresini ele alarak en ideal sonuca

ulaşılabilir, bu yerine bu çalışma da bu ikisinin birbirlerine olan oranının maksimum değerlerde verdiği transformatör sayısının ideal transformatör sayısı olduğu gösterilmektedir.

6. SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

YG	: Yüksek gerilim
AG	: Alçak gerilim
L	: Şebeke hattı uzunluğu
n	: Hattaki transformatör sayısı
N	: Bölgenin toplam güç talebi
N_T	: Özdeş transformatörün kapasitesi
K	: Voltaj düşümü katsayısı
C	: Güç kaybı katsayısı
D	: Kablo kesit çapı
e	: Gerilim düşümü yüzdesi
p	: Güç kaybı yüzdesi
G_i	: i no'lu transformatörün kapasitesi
d_i	: i no'lu transformatörün eşzamanlı çalışma çeşitlilik faktörü
c	: Enerjinin finansal değeri
$f_{gk}(y)$: Yıllık güç kaybı maliyeti
$f_{i,tr}(N)$: Bir transformatörün gücüne dayalı yapım maliyeti
$f_{i,k}(D)$: 1 km için çapına bağlı olarak kablo maliyeti
$f_{i,d}(L)$: 1 km için gerekli enerji hattı direği maliyeti
$f_b(y)$: Transformatörün gücüne dayalı yıllık bakım-onarım gideri
N'	: Bölgenin güç talebi
N_0	: Bölgenin başlangıçtaki güç talebi
y_s	: Enerji dağıtım sistemi ekonomik servis ömrü
$f_{hg}(y)$: Enerji dağıtım sisteminin yıl bazında kazancı
$f_{net}(y)$: Enerji dağıtım sisteminin yıl bazında net kazancı
y_{as}	: Hattın amortisman süresi
δ	: Zaman adımı parametresi

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Pınar ATAĞ: Tez çalışmasını yürütmüş, literatür taraması ve yazın kısmında büyük katkılarda bulunmuştur.

Ersan GÜRAY: Nümerik hesaplamalarda, formüllerin oluşturulmasında katkılarda bulunmuş, analiz etmiştir.

Sırrı Sunay GÜRLEYÜK : Tez çalışmasının fikrinsel oluşumlarına destek vermiştir.

Bu çalışma Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği öğrencisi Pınar Atak Aktaş'ın tez çalışmasının sonuçlarını içermektedir. Diğer yazarlar öğrencinin tez danışmanları olarak çalışmaya katkıda bulunmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kimbark E.W., "Direct Current Transmission", Vol.1, *John-Wiley+Sons*, New Jersey, (1971).
- [2] Padiyar K.R., "HVDC Power Transmissions Systems", *John Wiley+Sons*, New Jersey, (1990).
- [3] Majeed I.B., Edful G. ve Normanyo E., "Determination of Optimum Number of Unit Transformers for High Voltage Distribution System", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(5): 607-609, (2015).
- [4] Daut I., Ahmad D.M. M, Zakaria S., Uthman S. and Taib S., "Comparison of Losses and Flux Distribution in Three-Phase, 100kVA Distribution Transformer Assembled from Various Types of T Joint Geometry", *American Journal of Applied Sciences*, 3: 1990 – 1992, (2006).
- [5] Hui L., Li H., Bei H., Shunchang Y., "Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers," in *Proceeding of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS 2001*, Shenyang, 1: 242-245, (2001).
- [6] Scott M. J. and Antonsson E. K., "Compensation and Weights for Trade-offs in Engineering Design: Beyond the Weighted Sum", *Journal of Mechanical Design*, 127(6): 1045 – 1055, (2005).
- [7] Levitin G, Mazal Tov S., Elmakis D., "Optimal insulation in radial distribution networks", *Elect. Pow. Sys. Res.*, 37: 97-103, (1996).
- [8] Ravadenegh S.N., Roshanagh R.G., "A heuristic algorithm for optimal multistage sizing, siting and timing of MV distribution substations", *Elect. Pow. Sys. Res.*, 105: 134-141, (2013).
- [9] El-Fouly T.H.M. et al, "A new optimization model for distribution substation siting, sizing and timing", *Elec. Pow. and En. Sys.*, 30: 308-315, (2008).
- [10] Geromel L. H., Souza C. R., "The applications of intelligent systems in power transformer design," *Canadian Conference Electrical and Computer Engineering IEEE CCECE 2002*, 1: 285-290, (2002).
- [11] Geromel L. H., Souza C. R., "Designing the power transformer via the application of intelligent systems," in

- Proc. 10th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED2002)*, Lisbon, July, (2002).
- [12] Haghifam M.R., Shahabi M, “Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm”, *Elect. Pow. Sys. Res.* , 63: 37-50, (2002).
- [13] Georgilakis, “A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research”, *Elect. Pow. Sys. Res.*, 121: 89-100, (2015).
- [14] Mazhari S.M., Monsef H., “Dynamic sub-transmission substation expansion planning using learning automata”, *Elect. Pow. Sys. Res.*, 96: 255-266, (2013).
- [15] Jordehi A.R., “Optimization of electric distribution systems: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 51: 1088-1100, (2015).
- [16] Yunusoğlu A., “Köy Elektrifikasyonu Proje Rehberi”, *TEK*, Ankara, (1974).
- [17] Yılmaz B., “Şehir Elektrik Dağıtım Şebekeleri Projeleri”, *Bizim Büro Basımevi*, Ankara, (2011).
- [18] Yunusoğlu A., “34.5 kV Enerji Nakil Hatları (cilt-2)”, *Korza Yayıncılık*, Ankara, (2014).
- [19] www.oznurkablo.com.tr/urunler/aluminyum-havai-hat-iletkenleri/orgulu-aluminyum-celik-ozlu-iletkenler-acsr, “Örgülü alüminyum Çelik Özlü İletkenler”, (2019).
- [20] turkish.aluminiumalloyconductors.com, “Guangzhou Xinyuan Hengye Power Transmission Device Co., Ltd”, (2019).
- [21] TEDAŞ, Elektrik Proje ve Tesis Birim Fiyat Kitabı, Ankara, (2018).
- [22] www.torekselectric.com, “Toreks Elektromekanik Servis Hizmetleri Ltd. Şti.”, (2019).