

Yerel Elektrik Santral Büyüklüğünün ve Konumunun Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi

Examining The Impact of Distributed Generation Size and Location on The Distribution Network

Tuba GÖZEL 

Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ), Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili alınan kararlar ve teşvikler dağıtım sistemindeki yerel elektrik santralleri (YES) artırmaktadır. Artan YES'lerden daha çok faydalanmak için enerji depolama sistemlerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Ancak enerji depolama sistemlerinin kurulumu yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle gecikmektedir. Dağıtım sistemi planlayıcıları, dağıtım sisteminin olumsuz etkilerinin olmaması için dağıtım sistemine sınırlı oranda YES yerleştirirler. Bu da dağıtım sisteminde YES barındırma oranını kısıtlamaktadır.

Bu çalışmada; enerji depolama sistemi olmadan, dağıtım sisteminin mevcut durumunu koruyarak veya iyileştirerek ne kadar YES yerleştirilebileceği araştırılmaktadır. Dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını koruyan ve aktif güç kaybını en aza indiren iki farklı amaç için YES büyüklüğü elde edilir. Bunlarla birlikte dağıtım sisteminin mevcut gerilim profilini koruyan ve gerilim profilini iyileştiren iki farklı amaç için daha YES büyüklüğü elde edilir. Bulunan YES büyüklüklerin dağıtım sistemindeki güç kayıplarını ve bara gerilimlerini nasıl etkilediği incelenmektedir. Bu amaçların hangisinin dağıtım sistemini iyileştirdiği, hangisinin kötüleştirdiği, hangisinin YES barındırma kapasitesinin arttırdığı tartışılmaktadır.

Bu çalışma ile YES'in dağıtım sistemi üzerindeki olumlu etkisinin; YES büyüklüğüne, konumuna ve dağıtım sistemi yapısına göre değiştiğini gösterilmektedir. Dağıtım sistemi planlayıcılarına, dağıtım sistemine göre maksimum YES kapasitesi belirlenebileceği fikri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım sistemi, Yerel elektrik santrali, Güç kayıpları, Gerilim profili, Uygun büyüklük, Azami büyüklük, Barındırma kapasitesi

Abstract

Decisions and incentives regarding renewable energy resources increase the number of distributed generation (DG) in the distribution system. It is inevitable to use energy storage systems in order to benefit more from them. However, the installation of energy storage systems is delayed due to high investment costs. Distribution system planners replace a certain DG capacity in the distribution system to avoid negative effects on the distribution system. This prevents having enough DG in the distribution system.

In this study, it is investigated how much DG can be located by maintaining or improving the current state of the distribution system without any energy storage system. For two different purposes which preserves the existing active power loss of the distribution system and reduces the active power loss, DG sizes are obtained. In addition to these, for two different purposes which preserves the existing voltage profile of the distribution system and improves the voltage profile, other DG sizes are obtained. It is examined how the obtained DG sizes affect power losses and busbar voltages of the distribution system. Then which of these objectives improves the distribution system, which negatively affects it, and which increases the YES hosting capacity is discussed.

This study shows that the positive effect of DG on the distribution system changes according to its size, its location and the distribution system structure. It offers distribution system planners the notion that the maximum DG capacity for any distribution system may be established in accordance with the distribution system advantages.

Keywords: Distribution system, Distributed generation, Power losses, Voltage profile, Optimal size, Maximum size, Hosting capacity

I. GİRİŞ

Karbon emisyonunun azaltılması amacıyla alınan kararlar ve teşvikler neticesinde yenilenebilir enerji kaynakları her geçen gün yerel elektrik santralleri (YES) dahilinde elektrik enerjisi sistemine artarak yerine almaktadır [1]. 1990'lı yıllardan bu yana YES'lerin dağıtım sistemine etkisi, yerleşimi, dağıtım sistemi ile planlanması, işletilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. [2]-[6]. Bu çalışmalardan YES'in işletimi incelendiğinde; YES'leri

işletenlerin ihtiyaçlarına göre, YES işletiminde farklılık bulunmaktadır: Örneğin YES dağıtım şebekesi ile paralel çalışır ve YES'den sağlanan enerjinin bir kısmını kullanıp bir kısmını satabilir. Pik dönemlerde elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için işletilir ve maliyetin yüksek olduğu zamanlarda tüketicilerin enerji talebinin bir kısmını karşılar. YES'in bir diğer işletim şekli de dağıtım sistemine veya elektrik enerji müşterisine destek sağlamasıdır; ara sıra veya periyodik olarak yüksek talepleri karşılar veya arızalardan dolayı sıkıntıları giderir. YES'in işletim amacı ne olursa olsun dağıtım sistemini etkilemektedir [6].

YES'in olumlu etkileri genellikle teknik, ekonomik ve çevresel olarak sınıflandırılmaktadır. Başlıca teknik faydası; hat kayıpların azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinin yüklenilebilirliğinin artırılması gibi sayılabilir. Ekonomik avantajları ise şebeke yatırımlarının ertelenmesi, yakıt maliyetlerinin azalması, rezerv miktarın azalması ile ilgili maliyetin düşmesi şeklinde ifade edilebilir. Çevresel etkisi de düşük karbon emisyonu, yeşil enerji olarak sayılabilir. YES'in olumsuz etkileri de bulunmaktadır; ters güç akışı, gerilim profilindeki değişimler, ani güç değişimleri, arz talep dengesizlikleri. Ayrıca koruma cihazların koordinasyon problemi gibi teknik sorunlar dağıtım şebekesinde meydana gelebilmektedir [2].

Planlayıcıların ve araştırmacıların en çok zorlandıkları konu uygun boyuttaki YES'in dağıtım sisteminde uygun yere yerleştirilmesidir [2]-[7]. İlk çalışmalarda YES'in olumlu etkilerinden yararlanacak ve dağıtım sisteminin işleyişini bozmayacak araştırmalar yapıldı. Çoğunlukla güç kayıplarını azaltacak YES'in boyutunu ve/veya konumunu belirleyen analitik yöntemler geliştirildi [8], [9]. Daha sonra aktif güç kayıplarını azaltmak için oluşturulan optimizasyon problemlerine; gerilim profilinin iyileştirilmesi, güvenilirliğin artırılması gibi amaçlar eklendi [10], [11]. Tek YES için optimizasyon problemi çözülürken, birden fazla YES'in yerleşimi ve boyutu araştırıldı [12], [13]. Sabit yük ve üretim için analizler yapılırken; zamanla değişen ve stokastik analizler de eklendi [14], [15]. Hemen hemen her optimizasyon metodu, analitik, sezgisel ve meta sezgisel, bu hesaplamalarda kullanıldı [2]-[7].

YES ile ilgili bazı çalışmaları incelenecek olursak; [16]'da analitik ifade ile aktif güç kaybını en aza indirecek birden fazla YES'lerin yerini belirlerken, iteratif yöntem ile de YES büyüklüğünü elde ettiği görülmüştür. [17]'de "hibrit karga arama parçacık sürü" optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile maliyet ve aktif güç kaybını azaltmak amacıyla tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca YES'lerin yeri, büyüklüğü ve en uygun rüzgar türbin modeli belirlenmiştir. [18]'de "su, enerji ve yiyecek" algoritması ile aktif, reaktif güç kayıplarını ve

karbon emisyonunu en aza indirecek YES'lerin yerini belirleyen bir çalışma yapılmıştır. [19]'da ise aktif güç kaybını en aza indirecek YES'lerin dağıtım sistemindeki konumu; parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilmiş, gerilim kararlılığı değerlendirilmiş ve tekno-ekonomik uygunluğu araştırılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynağı içeren YES'lerin teknik ve ekonomik etkilerini ve stokastik doğasını dikkate alan çalışmalardan biri olan [20]'de optimizasyon problemi; güç kaybının azaltılması, gerilimin iyileştirilmesi, sistem kararlılığı ve yıllık ekonomik tasarrufun sağlanması amaçları ile tanımlanmıştır. [21]'de güç kaybı ve yıllık ekonomik kaybı azaltmak amacı ile çok amaçlı "balina" optimizasyon tekniği kullanılarak YES'lerin uygun büyüklükleri ve uygun konumları elde edilmiştir. [22]'de YES ve elektrikli araçları içeren dağıtım sistemlerinde güç kaybını ve gerilim sapsmasını kontrol etmek için; "bulanık şans kısıtlı stokastik" optimizasyon metodu kullanılmıştır. Çalışmada transformatörlerin kademe konumunun ayarlanması, şönt kapasitör grupları, esnek yük gücü, enerji depolama sistemlerinin şarj ve deşarj gücü ve YES'lerin reaktif güç çıkışı araştırılmıştır.

Dağıtım sistemlerinde gittikçe artan YES'leri daha verimli kullanabilmek, maliyeti azaltmak ve kar elde edebilmek için enerji depolama sistemleri ile birlikte enerji yönetimi ve talep tarafı yönetimi üzerine de çalışılmaktadır [23]. Enerji yönetimi ile ilgili çalışmalardan biri olan [24]'teki çalışmada, sanal elektrik santralin dağıtım sistemindeki enerji yönetimi "lokal arama" optimizasyon algoritması ile yapılmıştır. Enerji yönetimi probleminde YES'lerin uygun büyüklükleri ve konumları; gerilim profilini ve güç akış yönünü düzeltmek, şebekeden daha az enerji satın alarak YES'lerden daha fazla yararlanmak amacı ile belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan uygun YES yerleşimi ile şebekeden çekilen enerjinin %81 azaltıldığı saptanmıştır.

[25]'te güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve diğer YES'ler ile elektrik fiyatları göz önünde bulundurularak toplam işletim maliyetlerinin azaltılması ile ilgili bir "enerji kaynak işletimi" planlaması yapılmıştır. [26]'nın çalışmasında PV barındırma kapasitesinin artırılmasının, dağıtım şebekesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. AG trafo sayısı ile PV kapasitesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Trafo sayısının artmasıyla AG'den gelen gerilim OG'ye kaydığı için, PV kapasitesinin artması teknik olarak tercih edilmekle birlikte ekonomik olarak yüksek maliyet oluşturduğu tespit edilmiştir. Dağıtım sistemlerinde sayıları artan YES'lerin enerji depolama sistemleri ile birlikte işletilmesi dağıtım sistemlerinde olumsuz etkileri azaltmaktadır [27]. Ancak enerji depolama sistemlerinin yatırım maliyeti henüz yüksektir [23].

Literatürde artan YES'lerin yerleşimi, olumsuz etkileri, verimli kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak mevcut durumu koruyarak YES kapasitelerin artırılması incelenmemiştir. Optimal ve azami YES büyüklükleri ile dağıtım sisteminin güç kayıpları ve gerilim profilinin değişimi incelenmemiştir. Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde herhangi bir düzenlemeye gerek duymadan, enerji depolama sistemleri olmadan, mevcut durumu koruyan YES kapasitesi araştırılmaktadır. Dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını arttırmayan maksimum YES büyüklüğünü elde etmek için optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Ayrıca sistemin güç kaybını en aza indirecek en uygun YES büyüklüğü belirlenmektedir. Tüm dağıtım sistemi için belirlenen maksimum ve en uygun YES büyüklüğünün sistem kayıplarını ve gerilim profilini nasıl etkilediği incelenmiştir. Gerilim profili için de maksimum ve en uygun YES büyüklüğü benzer şekilde elde edilerek dağıtım sistemini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu çalışma ile dağıtım sistemi planlayıcılarına YES kapasitesi artışının, dağıtım sisteminin güç kayıplarına ve gerilim profiline etkisi hakkında bilgi verilmektedir.

Bu makalede ikinci bölümde, aktif güç kaybı ve gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleyen dört farklı optimizasyon problemi ve izgara arama yöntemi anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde önerilen yöntem gerçek dağıtım sistemine uygulanmış ve YES büyüklükleri elde edilmiştir. Elde edilen YES büyüklüklerin dağıtım sistemine etkisi tek tek ve karşılaştırılarak incelenmiştir. Bulgu ve tartışmalar dördüncü bölümde ele alınmıştır. Beşinci bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. YÖNTEM

Bu bölümde aktif güç kaybına ve gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleyecek dört optimizasyon problemi anlatılmıştır. İlk olarak dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını koruyacak bir başka deyişle aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü elde eden optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Problemin amacı; aktif güç kaybını, YES olmadığı durumdaki aktif güç kayıp değerine eşitleyecek maksimum YES büyüklüğünü elde etmektir. İkinci olarak dağıtım sisteminin aktif güç kaybını azaltacak YES büyüklüğünü elde eden bir minimizasyon problemi verilmiştir.

Üçüncü optimizasyon problemi ise dağıtım sisteminin mevcut gerilim profilini koruyacak bir başka deyişle gerilim sapmasını arttırmayacak YES büyüklüğünü elde etmektir. Problemin amacı; dağıtım sisteminin gerilim sapmasını, YES olmadığı durumdaki gerilim sapma değerine eşitleyecek maksimum YES büyüklüğünü aramaktır. Son olarak da gerilim sapmasını azaltacak YES büyüklüğünü bulacak bir minimizasyon problemi tanımlanmıştır.

İlk kısımda aktif güç kaybı ile ilgili ikinci kısımda gerilim profili ile ilgili optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonları ve kısıtları verilmiştir. Son kısımda da optimizasyon problemlerinin çözüldüğü izgara arama algoritması anlatılmıştır.

2.1. Aktif Güç Kaybına Göre YES Büyüklüğü Belirleme

Aktif güç kaybını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan olmak üzere iki farklı amaç için, YES büyüklükleri belirlenmektedir. Amaç 1'de aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü belirleyen optimizasyon problemi tanımlanmıştır. YES barındırarak dağıtım sisteminin aktif güç kaybını, dağıtım sisteminin mevcut durumundaki toplam aktif güç kaybına kadar arttıracak; kısaca güç kaybını maksimum değer olarak tanımlanan mevcut değere getirecek YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemidir. Amaç 2'de ise aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerini elde eden optimizasyon problemi verilmiştir.

Amaç 1: Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü olarak tanımlanan birinci amaç fonksiyonu Eşitlik (1)'de kısıtları da Eşitlik (2)'de verilmiştir. Problem, dağıtım sisteminin aktif güç kaybını maksimum yapacak YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemidir. İlk kısıt YES'in aktif güç değeri, P_{YES} , toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. İkinci kısıt ise P_{YES} ile dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybı mevcut durumdaki aktif güç kaybı kadar veya daha küçük değerinde olmasıdır. Diğer kısıt ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerini elde etmek için Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) kullanılmaktadır.

$$\max f(P_{YES}) = \sum_{i=1}^{nb} Ploss_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{şartı altında} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n Pyük_k \\ & Ploss \leq basePloss \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Eşitlik (1)'de geçen P_{YES} YES'in aktif gücü, $Ploss_i$ i. hattın aktif güç kaybı, nb dal sayısıdır. Eşitlik (2)'de bulunan n bara sayısı, $Pyük_k$ k. baradaki yükün aktif gücü, $Ploss$ P_{YES} için toplam aktif güç kaybı, $basePloss$ ise mevcut dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybı, V_{max} bara gerilimin üst limiti, V_{min} bara gerilimin alt limiti, V_i i. baranın gerilimidir.

Amaç 2: Dağıtım sisteminin aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüğünü bulan ikinci amaç fonksiyonu sistemin toplam aktif güç kayıp ifadesidir ve Eşitlik (3)'te verilmiştir. Amaç fonksiyonun kısıtları Eşitlik (4)'te verilmiştir. Kısıtlardan birincisi YES'in aktif güç

büyüklüğü toplam yükün üç katı kadar veya ondan küçük olmasıdır. Diğer kısıt ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\min f(P_{YES}) = \sum_{i=1}^{nb} P_{loss_i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2. Gerilim Profiline Göre YES Büyüklüğü Belirleme

YES yerleştirirken dağıtım sisteminin gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleme de iki farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Amaç 3'te gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüğünü belirleyen optimizasyon problemi tanımlanmıştır. YES barındıracak dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını, dağıtım sisteminin mevcut durumdaki ortalama gerilim sapsmasına kadar arttıracak; kısaca gerilim sapsmasını maksimum değer olarak tanımlanan mevcut değere getirecek YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemi verilmiştir. Amaç 4'te ise gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde eden optimizasyon problemi verilmiştir. Optimizasyon problemi ile bara gerilimleri 1 pu değerine yaklaşır. Her iki amaçta da ortalama gerilim sapsması formülasyonu kullanılmıştır. Ortalama gerilim sapsması (VDA) formülasyonu, bara gerilimlerin referans bara gerilimine göre farkının karelerinin ortalamasından oluşmaktadır.

Amaç 3: Dağıtım sisteminin gerilim profiline koruyan bir başka deyişle gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüklerini elde eden üçüncü amaç fonksiyonu Eşitlik (5)'te amaç fonksiyonun kısıtları ise Eşitlik (6)'da verilmiştir. Amaç fonksiyonu dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını maksimum yapacak YES büyüklüğünü elde edecek bir maksimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Birinci kısıt YES'in aktif güç değeri toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. İkinci kısıt mevcut dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasına (VDA) eşit veya küçük olmasıdır. Diğer ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\max f(P_{YES}) = VDA = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |\Delta V_i|^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & VDA \leq baseVDA \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (6)$$

Eşitlik (5)'te bulunan VDA dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını, n bara sayısını, ΔV_i ise i. bara gerilim değerinin referans gerilimine olan farkını göstermektedir. Eşitlik (6)'da verilen *baseVDA* mevcut dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasıdır.

Amaç 4: Dağıtım sisteminin gerilim profiline iyileştiren bir başka deyişle gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini bulan dördüncü amaç fonksiyonu Eşitlik (7)'de amaç fonksiyonun kısıtları ise Eşitlik (8)'de verilmiştir. Amaç fonksiyonu minimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Kısıtlarından biri YES'in aktif güç değeri toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. Diğer ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\min f(P_{YES}) = VDA = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |\Delta V_i|^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3. Izgara Arama Algoritması ile YES Büyüklüğü Belirleme

Yukarıda anlatılan dört amaca göre YES büyüklüklerini elde etmede izgara arama algoritması kullanılmıştır. Izgara arama algoritması ile YES'i her bir baraya sırayla yerleştirerek ve YES büyüklüğünü adım adım toplam yükün üç katına kadar arttırarak yük akışı yapılmaktadır. Yük akışı Thukaram'ın süpürme temelli radyal yük akışı [28] ile yapılmaktadır. Yük akışından elde edilen değerler ile her bir amaca ve kısıtlarına uyan YES büyüklüklerinden en uygun değeri belirlenerek yük akışı analizinden ilgili veriler alınmaktadır. Izgara arama algoritması ile YES büyüklüğü belirleme yöntemin akışı aşağıda verilmiştir.

Adım 1 Dağıtım sisteminin bara ve dal verilerini oku,
Adım 2 YES'in yerleşeceği bara numarasını belirle,
j=2

Adım 3 i'ye başlangıç değerini ata, i=1

Adım 4 YES'in ürettiği aktif güç değerini ata, $P_{YES} = \frac{3 \cdot i}{300} \sum_{k=1}^n P_{yük_k}$

Adım 5 Yük akışı algoritmasına verileri hazırla ve çalıştır,

Adım 6 Yük akışından elde edilen Ploss, Qloss, VDA, min(V_k), mak(V_k), ort(V_k) ve P_{YES} değerlerini kaydet,

Adım 7 i = i + 1

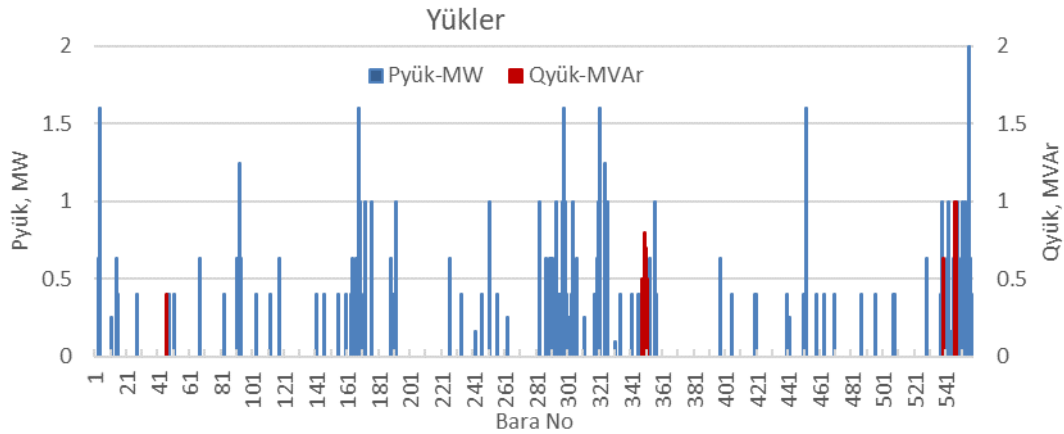
Adım 8 Eğer $P_{YES} < 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k}$ ise Adım 4'e git,

Adım 9 Kaydedilen değerler arasında Amaç 1 için Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'yi sağlayan maksimum YES büyüklüğü P_{YES1} belirle,

Adım 10 Amaç 2 için Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'yi sağlayan minimum YES büyüklüğü P_{YES2} belirle,
 Adım 11 Amaç 3 için Eşitlik (5) ve Eşitlik (6)'yi sağlayan maksimum YES büyüklüğü P_{YES3} belirle,
 Adım 12 Amaç 4 için Eşitlik (7) ve Eşitlik (8)'yi sağlayan minimum YES büyüklüğü P_{YES4} belirle,
 Adım 13 Her bir amaç için belirlenen j. baranın $P_{YES1..4}$ değerlerine ait Ploss, Qloss, VDA, Vmin, Vmax, Vort değerlerini kısıtlara göre kontrol et. Kısıtı sağlayan değerleri kaydet,
 Adım 14 $j = j + 1$
 Adım 15 Eğer $j <$ toplam bara sayısı ise Adım 3'e git,
 Adım 16 Sonlandır.

III. YES'in DAĞITIM SİSTEMİNE ETKİSİ

YES kapasitesinin ve yerleşiminin dağıtım sistemini nasıl etkilediği bu bölümde araştırıldı. Bunun için 558 baralı gerçek dağıtım sistemi üzerinde aktif güç kaybı ve gerilim sapsması koruyacak ve iyileştirecek YES büyüklükleri elde edildi ve dağıtım sistemine YES'lerin etkisi aktif ve reaktif güç kaybı ve gerilim profili ile incelendi. Dağıtım sistemin toplam aktif yükü 66.64 MW ve toplam reaktif gücü 5.53 MVAR'dır. Yüklerin dağıtım sistemindeki dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Analizlerde YES sadece aktif güç ürettiği varsayıldı ve dağıtım sistemine en fazla toplam aktif yükün üç katı kadar YES yerleşebilmesine izin verildi.



Şekil 1. 558 baralı gerçek dağıtım sistemin aktif ve reaktif yükleri

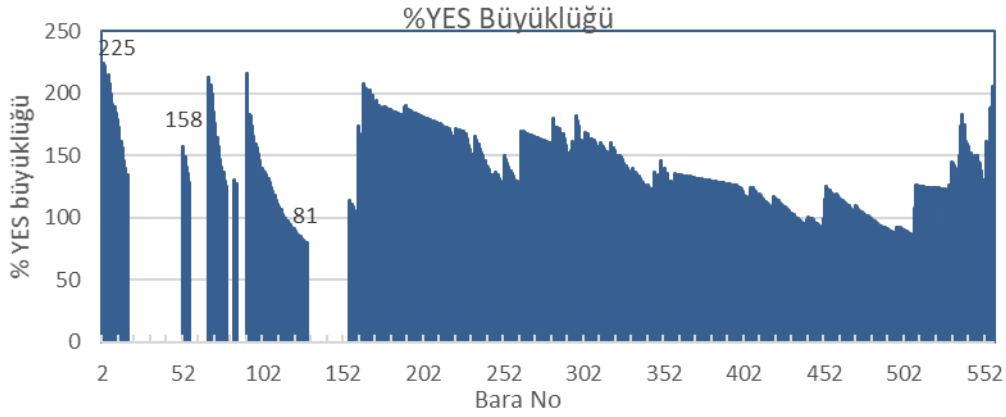
YES'in dağıtım sistemine etkisi araştırılırken öncelikle birinci amaç için mevcut dağıtım sisteminin güç kaybı aynı kalacak şekilde ne kadar YES yerleştirilebileceğine bakıldı ve dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı ve gerilim profili nasıl değiştiği tespit edildi. Sonrasında ikinci amaç olan dağıtım sisteminin güç kaybını azaltacak YES kapasiteleri belirlenerek dağıtım sistemi incelendi ve iki durum karşılaştırıldı. Bu analizler gerilim profili için üçüncü ve dördüncü amaçlar tekrarlandı. Son olarak da güç kaybı ile gerilim profilini birlikte dikkate alınarak YES'in dağıtım sistemini nasıl etkilediği araştırıldı.

Tüm analiz sonuçlarında YES büyüklükleri dağıtım sisteminin toplam yük oranına göre hesaplanmıştır. Elde edilen YES büyüklüklerine göre dağıtım sisteminin aktif güç kayıp, reaktif güç kayıp ve gerilim sapma değişimi mevcut dağıtım sisteminin değerlerine oranlayarak hesaplanmıştır. Şekillerde bu değerler

yüzde cinsinden gösterilmiştir. Şekillerde x ekseninde bara numarası ve y ekseninde ise o baraya yerleştirilen YES'in kapasite değeri gösterilmektedir.

3.1. Aktif Güç Kaybına Göre YES'in Dağıtım Sistemine Etkisi

YES yerleşim amacı, mevcut dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybını arttırmadan yerleştirmek olduğunda hangi baraya ne kadar büyüklükte YES yerleştirilebildiği araştırılmıştır. Her bara için YES büyüklüğü elde edilmiş ve elde edilen YES büyüklükleri için dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapsması, en düşük ve en yüksek bara gerilimleri belirlenerek analiz edilmiştir. Elde edilen her bir baraya yerleşebilecek YES büyüklükleri Şekil 2'de gösterilmiştir. YES büyüklüğü dağıtım sistemin toplam yüküne oranlanarak verilmiştir. Şekilde bazı baralarda uygun YES büyüklüğü elde edilemediği için değer bulunmamaktadır.

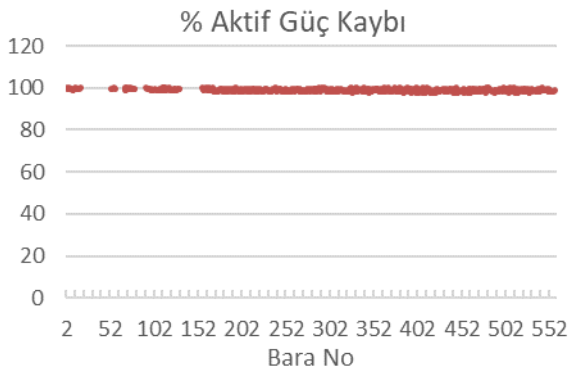


Şekil 2. Mevcut aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri

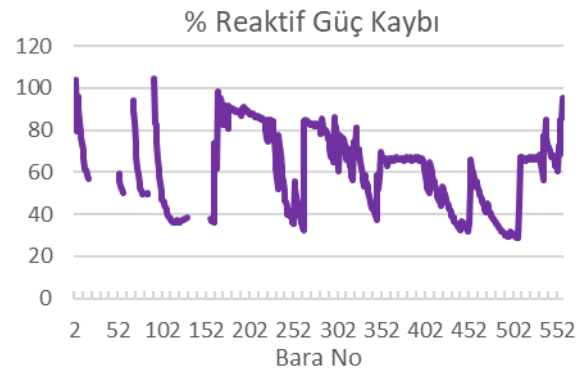
Şekilde x eksenindeki bara numarasına karşılık gelen y eksenindeki değer YES büyüklüğüdür ve ilgili bara için hesaplanan aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü göstermektedir. Örneğin ikinci baraya toplam yükün 2.25 katı büyüklüğünde YES yerleşirse dağıtım sistemin aktif güç kaybı, YES yerleşmeden önceki aktif güç kaybı (mevcut aktif güç kaybı) kadar olmaktadır. 128. baraya toplam yükün %81 katında YES yerleşirse sistemin aktif güç kaybı mevcut değer kadar olmaktadır ve 53. baraya %158'si kadar YES yerleşirse de mevcut aktif güç kaybı ile aynı değerdedir. Dolayısıyla mevcut dağıtım sistemin aktif güç kaybını

değiştirmeden yerleşebilecek YES büyüklüğü baralara göre değiştiği görülmektedir. YES büyüklüğü en fazla toplam yükün %225'i olarak, en az %80'ni ve ortalama YES büyüklüğü ise %140'ı olarak hesaplanmıştır.

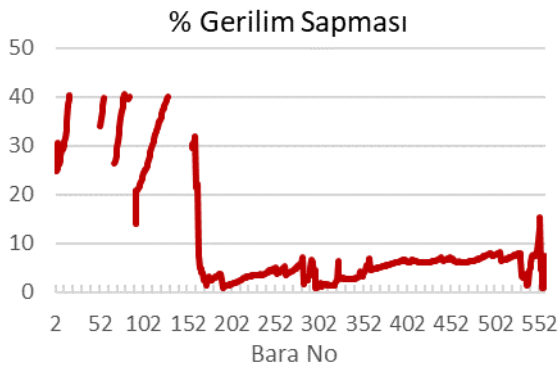
Şekil 3'te hesaplanan YES büyüklükleri dağıtım sistemine yerleştirildiği takdirde dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapsması mevcut değerlerine oranlanarak yüzde olarak verilmiştir ve ilaveten bara gerilimlerin aldığı maksimum, ortalama ve minimum değerleri birim değer cinsinden verilmiştir.



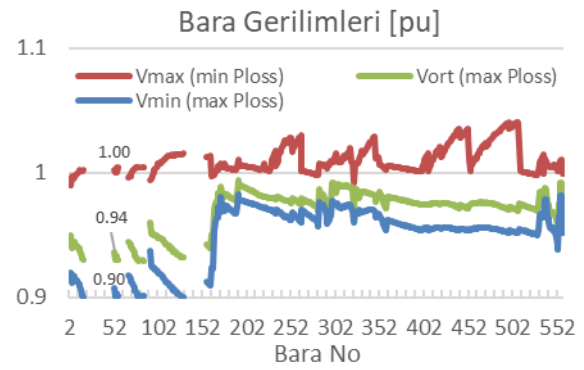
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü durumunda dağıtım sisteminin (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması ve (d) bara gerilimleri

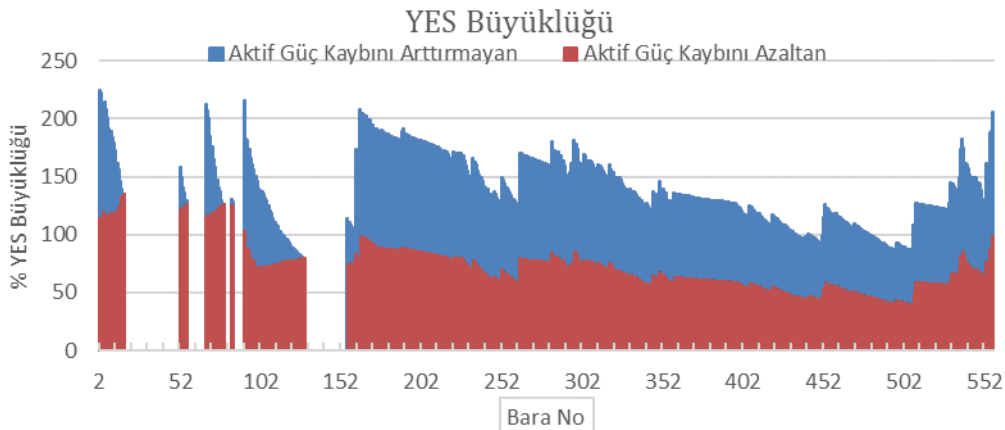
YES büyüklükleri dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybı esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre Şekil 3.a'da her bir bara için belirlenen büyüklükte YES yerleştiğinde dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, yerleşmeden önceki aktif güç kaybıyla eşit olduğu görülmektedir. Şekil 3.b'de reaktif güç kaybının durumunu incelediğimizde reaktif güç kayıpları YES büyüklüğü ile orantılı değişmektedir. Reaktif güç kayıplarının mevcut değere göre maksimum değeri %105, minimum değeri %28 ve ortalama değeri %62'dir. Mevcut aktif güç kaybını koruyarak YES büyüklüğü yerleştirildiğinde çok az barada mevcut reaktif güç kaybı kadar değerler alınırken çoğu barada ise reaktif güç kayıpları düşmektedir.

Şekil 3.c'de dağıtım sisteminin gerilim profili incelendiğinde mevcut durumundaki gerilim sapmasının önemli oranda küçüldüğü görülmektedir. En büyük gerilim sapmaları ilk 150 barada olduğu maksimum değer %40 olduğu, 160. baradan sonra gerilim sapmasının %10'un aşağısında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.d'de her bir YES büyüklüğü için dağıtım sisteminin bara gerilimlerinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri gösterilmiştir. Örneğin, 53. baraya toplam yükün %158'i kadar büyüklükte YES yerleştiği durumda dağıtım sisteminin ortalama

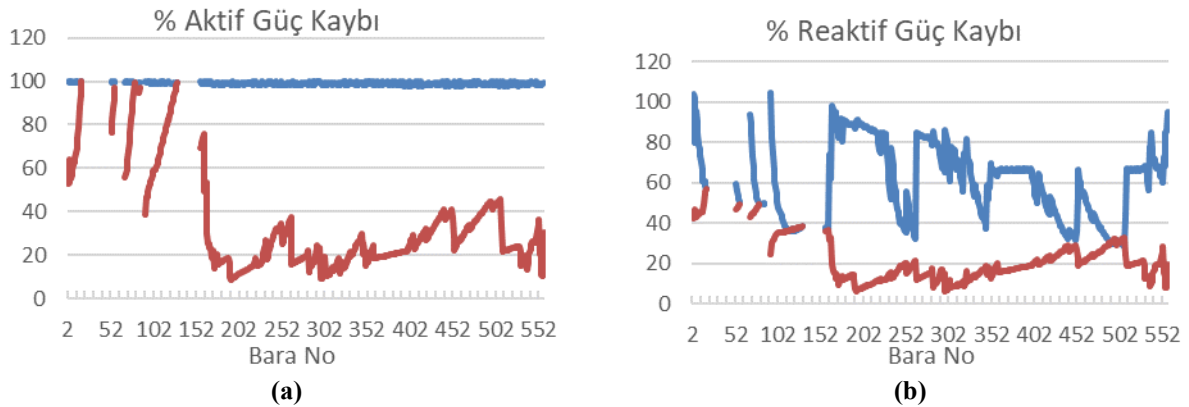
bara gerilim değeri 0.94 pu, maksimum gerilim değeri 1.00 pu, minimum gerilim değeri 0.90 pu olmaktadır. Belirlenen tüm YES büyüklüğünde bara gerilimleri gerilim limitlerinin içinde kaldığı ve 160. baradan sonra yerleştirecek YES'lerin ortalama bara gerilimlerini 1.00 pu'ya yaklaştırdığı görülmektedir.

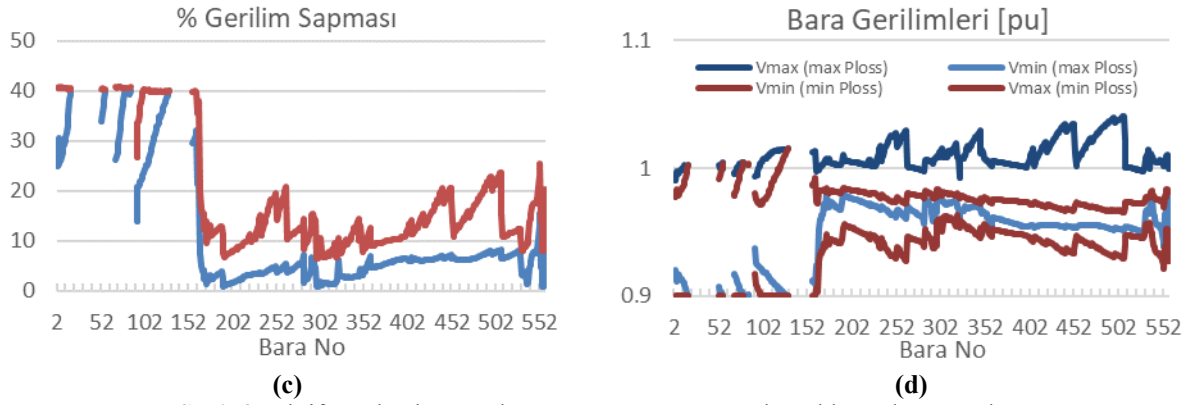
Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri ile aktif güç kaybını azaltacak YES büyüklükleri Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerin ortalama değeri toplam yükün %70'i iken en az değeri %39'u ve en fazla %135'i olarak elde edilmiştir. Güç kaybını arttırmayan ve azaltan YES büyüklüklerinde ortalama fark %70 olduğu, en fazla fark %113 ve ilk baralarda olduğu, farkın çok az olduğu baralar da çözüm bulunamayan baralara yakın olduğu görülmektedir.

Her iki durum için dağıtım sisteminin aktif güç kayıp, reaktif güç kayıp ve gerilim sapması değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde mavi renk ile aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri için, kırmızı renk ile aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerler gösterilmiştir.



Şekil 4. Aktif güç kaybını azaltan ve arttırmayan YES büyüklükleri





Şekil 3. Aktif güç kaybını azaltan ve arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapması ve (d) bara gerilimleri

Şekil 5.a'da aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile özellikle 160. baradan sonra aktif güç kayıplarının çoğunlukla %40'ın altına düştüğü, aktif güç kaybının %100 olduğu baralar çözüm olmayan baralara yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen YES büyüklükleri sistemin aktif güç kaybını ortalama %33 düşürdüğü ve 192. baradaki YES ile aktif güç kaybı %9'lara kadar azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 5.b'den reaktif güç kayıplarının ortalama %21'lere düştüğü, en az azalma %56 ile hat başlarında en fazla azalma ise %6 ile 192. barada olduğu görülmektedir. Aktif gücü arttırmayan YES büyüklüklerindeki reaktif güç kayıpları %80'ler civarında olan baralarda aktif gücü azaltan YES büyüklüklerindeki reaktif güç kayıp değişim oranları daha fazladır. Bunun aksine reaktif güç kaybı az olan baralarda ise değişim oranı azdır.

Şekil 5.c'de aktif gücü azaltan YES büyüklüklerin gerilim sapma değişimine etkisini incelediğimizde ilk baralarda gerilim sapması %40 seviyelerinde iken 160. baradan itibaren çoğunlukla %20'lerin altına düştüğü görülmektedir. Tüm YES büyüklüklerine göre ortalama gerilim sapma yüzdesi %17 iken en fazla gerilim sapma yüzdesi %40 ve en azı %6'dır. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinde ortalama gerilim sapma yüzdesi ise %9'dur ve aktif gücü azaltan YES büyüklüklerinde gerilim sapması arttırmayanlara göre daha fazladır. YES büyüklüklerine göre minimum ve maksimum bara gerilim değerleri de Şekil 5.d'de verilerek bara gerilimlerinin hangi aralıkta değiştiği görülmektedir. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerin bara gerilimleri mavi tonlarda ve azaltan YES büyüklüklerin bara gerilimleri ise kırmızı tonlarda gösterilmiştir. Her iki durumda ilk baralara yerleşen YES büyüklüklerinde bara gerilimleri 1.00 pu ile 0.9 pu arasında değişir iken 160. baradan itibaren gerilim değerleri yükselmiştir. Azaltan durumda gerilim değerleri arttırmayan durumun minimum değerlerinin civarında ve aşağısında kalmıştır.

Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Güç kaybı arttırmayan YES büyüklükleri en fazla toplam yükün %225'i ve ortalama YES büyüklüğü ise %140'ı olarak elde edilmiştir.
- Hat başındaki YES büyüklüğü maksimum değerde olurken aktif ve reaktif güç kaybı mevcut durumdaki değerlerde olduğu ve gerilim sapmasının da mevcut durumdan %70 azalttığı tespit edilmiştir.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için aktif güç kaybı %100 civarında iken reaktif güç kaybının çoğunlukla %100 değerinden daha düşük olduğu, ortalama reaktif güç kaybının da %62 değerinde olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için maksimum gerilim sapması %40 ve ortalama değeri %9'dur. 160. baradan sonra yerleşecek YES'ler için gerilim sapması %10'dan daha küçük değerlerdedir ve ortalaması %5'e düşmüştür.

Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinden maksimum YES büyüklüğü toplam yükün %135'i iken ortalama YES büyüklüğü ise %70 olarak tespit edilmiştir.
- Hat başına toplam yükün %114'ü kadar YES yerleştirilmesi uygun bulunurken aktif güç kaybını yarısına indirmiş, reaktif güç kaybını %40, gerilim sapmasını ise %40 seviyelerine düşürmüştür.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için ortalama aktif güç kayıp değeri mevcut değerden %33 seviyelerine düşerken iken ortalama reaktif güç kaybının ise %21 seviyelerine düştüğü görülmüştür. Ortalama gerilim sapması ise %17'dir ve aktif güç kaybını arttırmayan durumdan yaklaşık iki kat daha büyüktür.

3.2. Gerilim Profiline Göre Yerleştirme Analizi

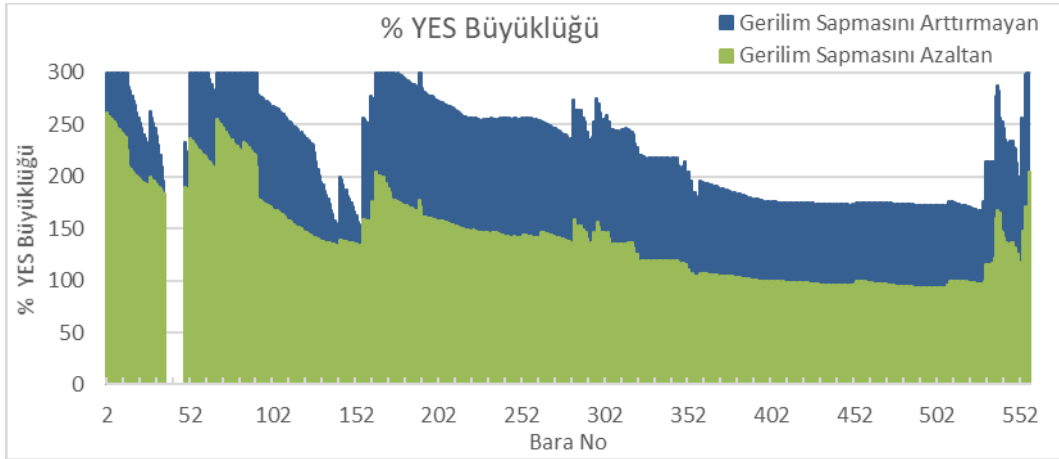
Bu kısımda gerilim profili analizi bara gerilimlerin ilk bara gerilimine göre farklarının ortalamasını veren gerilim sapmasına göre yapılmıştır. Mevcut dağıtım sistemin gerilim sapmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklükleri ve bu büyüklüklere göre sistemin aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve bara gerilimleri hangi değerlerde olduğu araştırılmıştır. Mevcut dağıtım

sistemin gerilim sapsmasını arttırmayan ve azaltan iki amaç için her bir bara için iki farklı YES büyüklükleri elde edilmiş ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

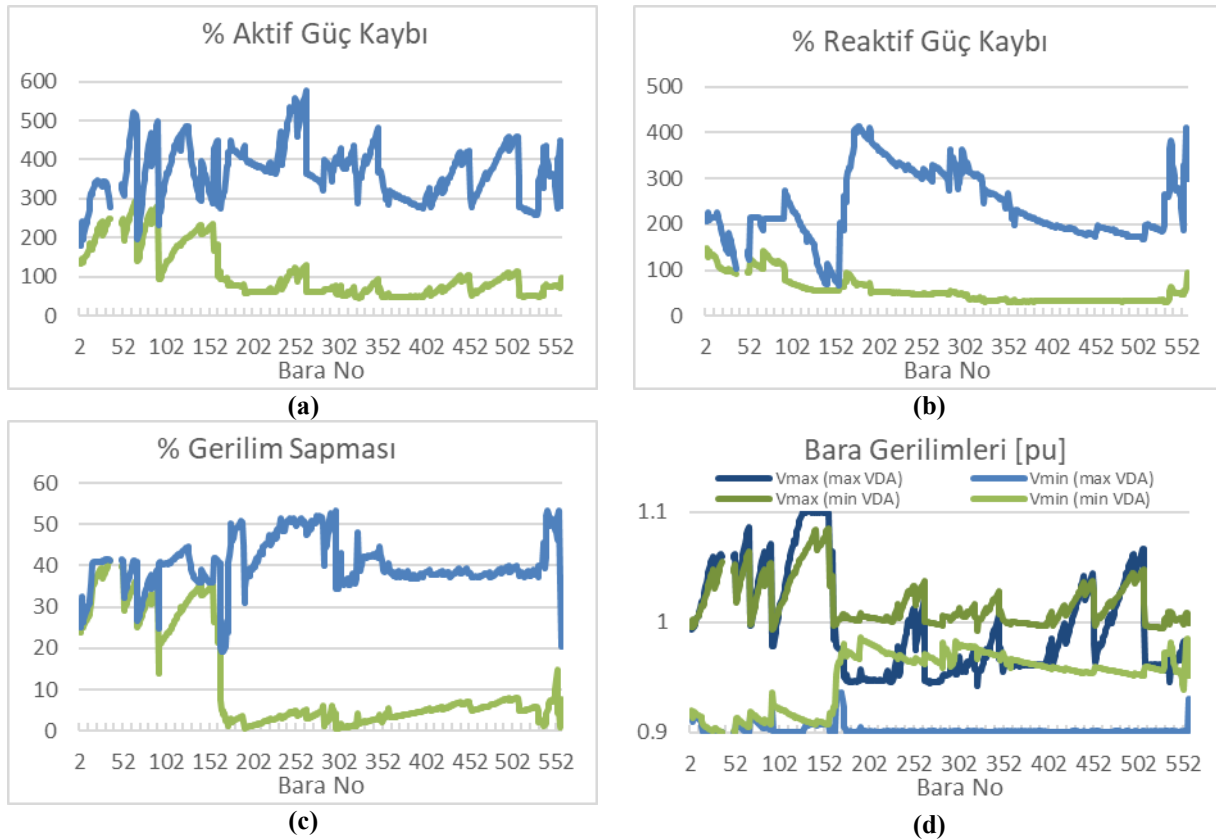
Mevcut dağıtım sistemin gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri ilk baralarda azami kapasite sınırı olan toplam yükün 3 katında veya yakın değerlerde olduğu görülmektedir. En küçük değeri %151 ile 155. bara için hesaplanırken 350. baradan sonra çoğunlukla %200 ile %150 arasında değerler aldığı tespit edilmiştir. Şekil 6'da gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini incelediğimizde arttırmayan YES büyüklükleri ile aynı forma sahip olduğu

görülmektedir. Arttırmayanda ortalama YES büyüklüğü %228 iken azaltanda ise %142'dir. Aralarında en az fark %40 iken ortalama fark ise %92 civarlarındadır.

Şekil 7'de gerilim sapsmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklükleri için dağıtım sisteminin aktif güç kayıp, reaktif güç kayıp ve gerilim sapsması verilmiştir. Şekilde mavi renk ile gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri için, yeşil renk ile gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. Gerilim sapsmasını azaltan ve arttırmayan YES büyüklükleri



Şekil 7. Gerilim sapsmasını azaltan ve arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması ve (d) bara gerilimleri

Şekil 7.a'da toplam yükün üç katı civarlarında hesaplanan gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüklerinin aktif güç kayıplarını önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Aktif güç kaybı en fazla %575 artarken ortalama olarak %370'lerde en az kayıp bile %180 değerindedir. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri ise aktif güç kayıpları ortalama %107 civarındadır. İlk baralarda aktif güç kaybı %300'lere çıkarken 160. baradan sonra çoğunlukla %100'ün aşağısındadır.

Şekil 7.b'de her iki durum için reaktif güç kayıpları görülmektedir. Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri reaktif güç kaybını aktif güç kaybı kadar arttırmamıştır. En fazla %413 olurken ortalama değer %240'tır. Reaktif güç kaybı aktif güç kaybı ilk baralarda %200 ile %100 aralarında değişirken 160. baradan sonra gibi hızlıca yükselmiştir ve %400 ile %200 aralığındadır. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerine göre reaktif güç kayıpları ise ortalama değeri %55'tir. İlk baralarda reaktif güç kayıp değerleri %100 civarında iken 160. baradan sonra %55 seviyelerine düşmüştür.

Şekil 7.c'de ilk baralarda gerilim sapmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklüklerin gerilim sapma değerleri birbirine yakın görülürken 160. baradan sonra önemli ölçüde aralarında fark açılmıştır. Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüklerinde ortalama gerilim sapması %40 civarında iken gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinde ise ortalama gerilim sapması %12'lerdedir. Şekil 7.d'de ilk baralara yerleştirilen YES büyüklükleri için bara gerilim değerlerinin aralığı büyük iken daha sonraki baralarda gerilim aralıkların küçüldüğü görülmektedir. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinde bu aralık çok daha azdır.

Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Dağıtım sisteminin mevcut gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri toplam yükün üç katı ile 1.5 katı aralığında elde edilmiştir.
- Kısıtlardan YES büyüklüğü veya gerilim limiti nedeniyle mevcut gerilim sapma değerine ulaşamayıp en fazla %55 seviyesinde kalmıştır.
- Hat başındaki YES büyüklüğü kısıttan dolayı toplam yükün üç katı olarak elde edilirken iken aktif ve reaktif güç kaybı da mevcut durumdaki aktif ve reaktif güç kaybının iki katı civarında olduğu gerilim sapmasının ise mevcut durumdaki gerilim sapma değerinin %25'ine indiği tespit edilmiştir.
- Aktif güç kayıpları mevcut kaybın maksimum altı katına çıkmış, ortalama kayıp ise yaklaşık mevcut durumun dört katıdır. Reaktif güç kaybı aktif güç kaybı kadar artmasa da ortalama reaktif güç kaybı mevcut durumun 2.5 katı kadardır. Gerilim sapma değişimi ortalama mevcut durumun %40'dır ve

bara gerilimleri çoğunlukla alt sınır olan 0.9pu değerinde minimum değeri almıştır ve bara gerilimlerin ortalaması 0.94pu'dur.

- Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüğünün dağıtım sisteminin güç kayıplarını önemli ölçüde attırdığı için Amaç 3 dağıtım sistemini olumsuz yönde etkilemiştir.

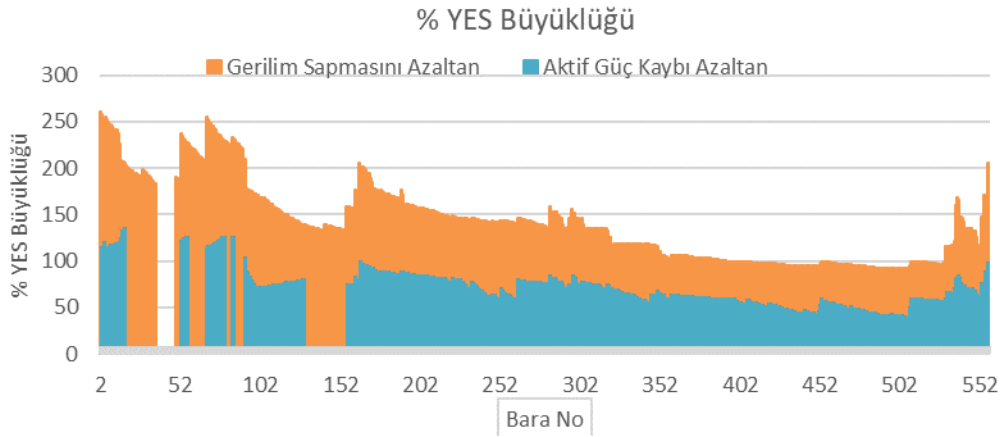
Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Dağıtım sisteminin mevcut gerilim sapmasını azaltan bir başka deyişle gerilim profilini iyileştiren YES büyüklükleri toplam yükün yaklaşık 2.5 katı ile bir katı aralığında elde edilmiş ve ortalama YES büyüklükleri toplam yükün %140'ı bulunmuştur.
- Hat başı için YES büyüklüğü toplam yükün iki buçuk katından daha fazla olduğu, mevcut aktif güç kaybın bir katı, mevcut reaktif güç kaybının bir buçuk katı ve mevcut gerilim sapmasının %25 olduğu elde edilmiştir.
- Aktif güç kayıpları birkaç barada mevcut kaybın üç katına çıkmış, tüm YES büyüklükleri için ortalama kayıp ise yaklaşık mevcut aktif güç kaybı kadardır. Reaktif güç kayıplarında ise maksimum mevcut reaktif güç kaybın 1.5 katına çıksa da ortalama mevcut kaybın yarısı kadardır. Gerilim sapmasında ise maksimum sapma mevcut durumun %40'ı iken ortalaması %12'dir. Bara gerilim değeri 1pu'ya yaklaştığı ve maksimum ve minimum değer aralıkların 1.02pu ile 0.95pu aralığındadır.

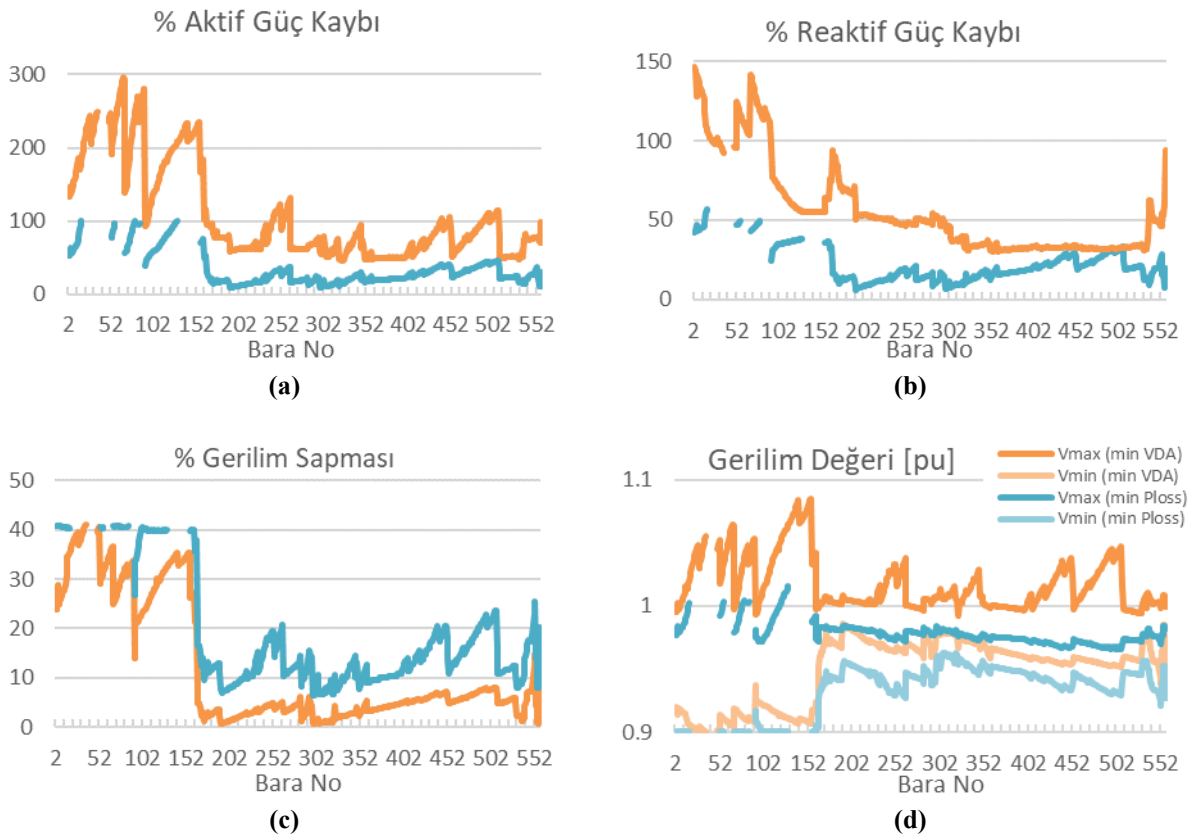
3.3. Aktif Güç Kayıp ve Gerilim Profil Analizlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde aktif güç kaybı ve gerilim sapması ile ilgili YES büyüklükleri karşılaştırılmıştır. İlk analiz gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri incelenmiştir ve elde edilen YES büyüklükleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri aktif güç kaybı azaltan YES büyüklüklerinden daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Aktif güç kaybını azaltan amaç probleminde uygun çözüm bulunamayan bara sayısı daha çoktur. İki amaç için elde edilen YES büyüklüklerindeki fark ortalama %80'dir. 160. baradan sonra her iki amaç için de YES büyüklükleri aynı paterne sahiptir, aralarındaki fark ise ortalama %60 civarındadır.

Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile dağıtım sistemindeki aktif ve reaktif güç kayıplarındaki, gerilim değişimlerini Şekil 9'da verilmiştir. Şekillerde turuncu rengi gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri için ve turkuaz rengi ise güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerleri göstermektedir.



Şekil 8. Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri



Şekil 9. Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması (d) bara gerilimleri

Dağıtım sisteminin ilk baralarında gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri aktif güç kaybını üç katına kadar arttırdığı, aktif güç kaybını azaltan da ise %100 seviyelerine yakın olduğu Şekil 9.a'da görülmektedir. 160. baradan sonra her iki amaçta kayıp düşmüş ve ortalama fark %50'dir. Reaktif güç kaybında ise benzer değişim olduğu Şekil 9.b'de görülmektedir. Tüm sistem için ortalama fark %36 civarında iken 160. baradan sonra ortalama fark %25'e düşmektedir.

Şekil 9.c'de verilen gerilim sapsmaları incelendiğinde aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için gerilim sapma değerleri daha fazla iken ilk baralarda maksimum gerilim sapsması %40 seviyelerinde

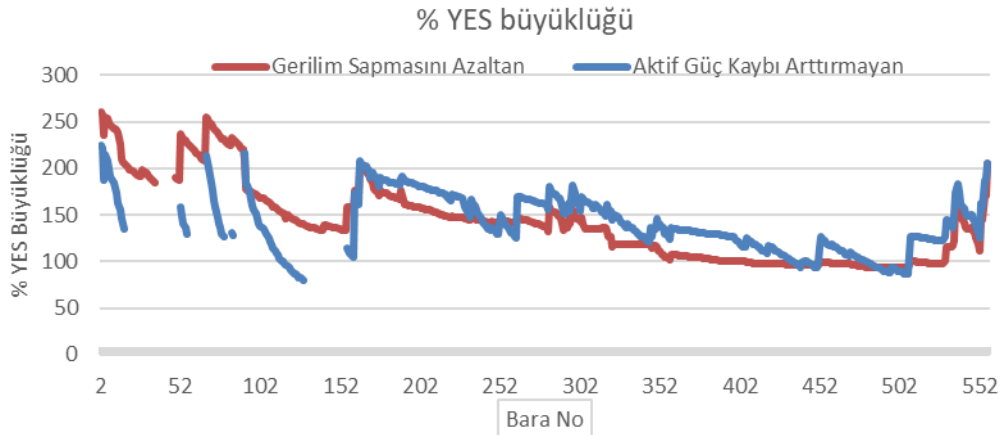
görülmektedir. Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri ile gerilim sapsması ortalama %12 iken aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile gerilim sapsması ortalama %18 seviyesindedir. Her iki durumda da 160. baradan sonra önemli bir azalma görülmektedir ve gerilim sapsmasını azaltan için %4.5'lere düşerken aktif güç kaybı azaltan için %13'lerde kalmaktadır. Şekil 9.d'deki bara gerilimlerinden de gerilim sapsması azaltan YES büyüklükleri maksimum bara gerilimlerini 1pu'ya çekerken minimum bara gerilimleri ile arasındaki fark da özellikle 160. baradan sonra küçülmüştür. Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinde uygun çözüm bulunmayan baralardaki

gerilim seviyelerin 1.1pu seviyesine doğru yükseldiği görülmektedir.

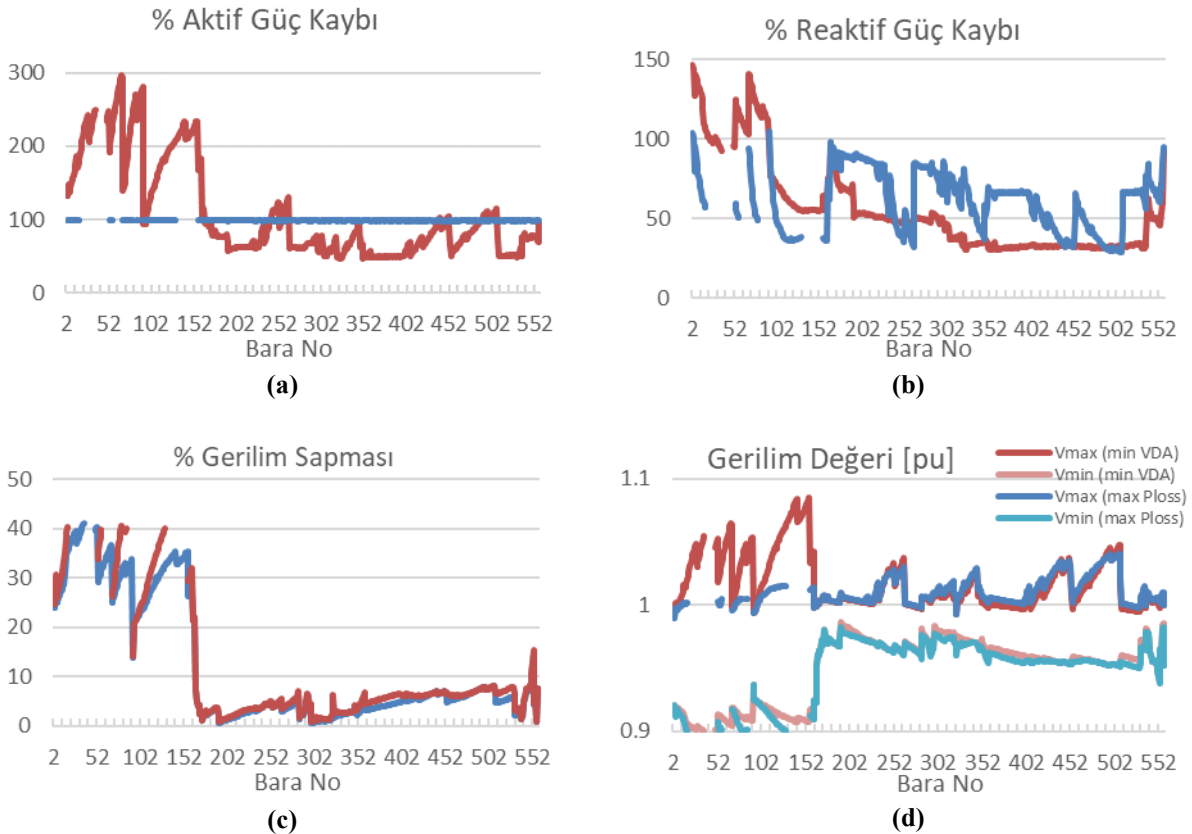
Bu bölümdeki ikinci analizde gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri karşılaştırılmıştır. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri, aktif güç kaybı arttırmayan YES büyüklüklerinden bazı baralarda büyük iken bazı baralar da küçük değerde olduğu ve birbirlerine çok yakın değerler aldıkları için YES büyüklükleri Şekil 10'da çizgi olarak gösterilmiştir. Her iki durumun yaklaşık YES büyüklük ortalaması %140 civarındadır ve birbirleri arasındaki ortalama farkı %19'dur. 160.

baradan sonra aktif güç kaybı arttırmayan YES büyüklükleri ortalama %140 iken gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinin ortalaması %125 ve aktif güç kaybı arttırmayan %15 daha küçüktür.

Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinin sistemi nasıl etkilediğini Şekil 11'de aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapması ve gerilim değerleri ile gösterilmiştir. Şekilde kırmızı renk gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerine ve mavi renk ise aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerine karşılık gelmektedir.



Şekil 10. Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri



Şekil 11. Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapması (d) bara gerilimleri

Şekil 11.a'da aktif güç kaybını azaltmayan YES büyüklükleri için aktif güç kayıplarının tüm baralarda %100 civarındadır ve uygun YES büyüklüğü bulunmayan baralardaki gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri için aktif güç kayıpların %300'lere çıktığı görülmektedir. 160. baradan sonra gerilim sapsmasını azaltan durum için aktif güç kaybı çoğunlukla %100'ün altındadır ve ortalaması %71'dir. Her iki durum arasındaki fark ise %30 ile gerilim sapsmasını azaltan durumunda daha düşüktür. Reaktif güç kaybını Şekil 11.b'de incelediğimizde aktif güç kaybı kadar artmamış ve en fazla %150 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Aktif güç kaybında olduğu gibi ilk baralarda gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri daha büyük değerlere sahip iken 160. baradan sonra tam ters olmaktadır ve ortalama değerlerinde %20 fark bulunmuştur.

Şekil 11.c'de her iki durum için gerilim sapsması değeri yaklaşık değerler aldığı görülmektedir. İlk baralardaki değerlerin farklılıkları uygun çözüm bulunmayan baralara yakın yerlerde fazla olduğu ve 160. baradan sonraki farkın %1'in altında olduğu tespit edilmiştir. Bara gerilim değerlerini Şekil 11.d'de baktığımızda 160. baradan sonra bara gerilim aralıkların hemen hemen aynı olduğu ve ilk baralarda maksimum gerilim değerlerinde farkın büyük olduğu görülmektedir.

Aktif güç kaybını ve gerilim sapsması azaltan YES büyüklüklerin karşılaştırması

- Gerilim sapsmasını azaltan ile güç kaybını azaltan YES büyüklükleri arasında ortalama fark %60 olup gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri daha yüksek değerdedir.
- İki durumun aktif güç kayıpları arasındaki ortalama fark %80 civarlarındadır. Reaktif güç kayıplarında ortalama fark ise %40'ın altındadır. Gerilim sapsmasında ise ortalama fark %12'dir.

Aktif güç kaybı arttırmayan ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerin karşılaştırması

- Gerilim sapsmasını azaltan ile güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri arasında ortalama fark sadece %19 olup her iki durum için de ortalama büyüklükleri %140'dır.
- İki durumun aktif güç kayıpları arasındaki ortalama fark %20'dir. Reaktif güç kayıplarında ortalama fark ise %32'dir. Gerilim sapsmasında ise ortalama fark sadece %3.5'tir.

IV. BULGU VE TARTIŞMA

558 baralı gerçek dağıtım sistemi için aktif güç kaybı ve gerilim profili ile ilgili dört optimizasyon probleminde elde edilen YES büyüklükleri ve dağıtım sistemine etkileri genel olarak aşağıda değerlendirilmiştir. Buna göre;

- Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinin ortalaması toplam yükün %70'i iken aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerin de bunun iki katı olduğu belirlenmiştir. Aktif güç kaybını

arttırmayan YES büyüklüklerinde azaltan YES büyüklüklerindeki aktif ve reaktif güç kaybının üç katı iken gerilim sapsmasında bu oran iki katıdır. Aktif güç kaybını göre YES büyüklüklerini arttırdığımız zaman aktif ve reaktif güç kaybı gerilim sapsmasına göre daha çok arttığı ve hepsinin mevcut duruma eşit veya altında kaldığı tespit edilmiştir.

- Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerin ortalaması toplam yükün %140'ı iken gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri de %150'sidir. Arttırmayan YES büyüklük değerlerin elde edilmesinde kısıt limitlerine göre belirlenmiştir. Çoğunlukla bara gerilim limitleri belirlerken hat başlarında ise YES kapasite limiti belirlemiştir. Ayrıca gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüğünde aktif ve reaktif güç kayıpları çok artmıştır. Aktif güç kayıpları mevcut durumdaki değerin dört katına yaklaşırken ve reaktif güç kayıpları ise iki buçuk katına yaklaşmıştır.
- Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri karşılaştırıldığında YES büyüklükleri arasında toplam yükün ortalama %80'i kadar farklılık olduğu ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklük değerleri daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma için aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmaları arasındaki ortalama fark sırasıyla %80, %40 ve %12'dir. Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüğünde aktif güç kayıpları hat başında mevcut durumun üç katına çıkarken 160. baradan sonra mevcut duruma veya daha aşağısında olmaktadır. Benzer şekilde reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmaları hat sonuna doğru daha da iyileşmiştir.
- Aktif güç kaybını arttırmayan ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri karşılaştırıldığında YES büyüklükleri arasında toplam yükün ortalama %43'ü kadar farklılık olduğu görülmüştür. Aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmalarındaki ortalama fark sırasıyla %62, %32 ve %5.5 civarlarındadır. bazı baralarda aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinde değerler daha büyük iken bazı baralarda gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerinde değerler daha büyüktür. 160. baradan sonra YES büyüklükleri arasındaki ortalama fark %17'lere gerilemiş ve birbirine yaklaşmıştır. Aktif ve reaktif güç kayıpları yarıya inerken gerilim sapsmaları da %1'in altına inmiştir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada dağıtım sistemini YES'in büyüklüğü ve konumu nasıl etkilediği incelenmiştir. YES yerleşiminde dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını ve gerilim profilini korumak veya iyileştirmek amaçları dikkate alınmıştır ve her bir bara için YES büyüklükleri elde edecek dört optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Bu dört amaç ile 558 baralı gerçek

dağıtım sistemi için problem çözülmüş ve elde edilen YES büyüklükleri ile dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, ortalama gerilim sapması ve bara gerilimlerin değişimi mevcut dağıtım sistemine göre araştırılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- YES büyüklük değerleri amaca ve yerleştiği baraya göre farklı değerler almaktadır.
- Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri diğer amaçlarda elde edilen YES büyüklüklerinden daha küçük değerler almaktadır.
- Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri toplam yükün üç katı olan en büyük değerleri almakta dolayısıyla aktif ve reaktif güç kayıplarını çok arttırmaktadır.
- Aktif güç kaybını arttırmayan ve gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri yakın değerler almaktadır. Çoğunlukla dağıtım sisteminin mevcut durumunu ya korumak ya da iyileştirmektedir.

Bu çalışma ile amaca ve YES'in yerleşeceği baraya göre YES büyüklüklerin farklı değerler aldığı tespit edilmiştir. Aktif güç kaybını iyileştirmek amacıyla YES barındırma kapasitesinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Gerilim profilinin mevcut durumunu korumak amacı ile YES büyüklüklerin belirlenmesinin dağıtım sisteminin güç kayıplarını olumsuz etkilediği ve amacın YES büyüklük belirlemede uygun olmadığı görülmüştür. Aktif güç kaybının mevcut durumunu korumak ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla dağıtım sisteminin faydalanabileceği YES barındırma kapasitesinin daha büyük olduğu görülmüştür. Dağıtım sistemi planlayıcılarına; YES barındırma kapasitesi kadar yerleştiği baranın da önemli olduğu, YES'in olumlu ve olumsuz etkisinin yerleştiği baraya ve kapasitesine göre değiştiği ve YES barındırma kapasitesinin arttırabileceği gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda dağıtım sisteminin yapısı, yüklerin yoğunluğu ve yerleşimine ek olarak yük profilini ve YES'in üretim profilini de dikkate alarak farklı amaçlar için YES büyüklüklerin ve yerleşimin incelenmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; TÜBİTAK 116E107 nolu "Yüksek Oranda Yerel Elektrik Santralleriyle Beslenmekte Olan Dağıtım Şebekelerinin Etki Haritalarının Çıkarılması" isimli araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan veriler Sakarya Dağıtım Elektrik A.Ş.'inden temin edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] IEA (2022), Renewables 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, License: CC BY 4.0.
- [2] Abdmouleh, Z.; Gastli, A.; Ben-Brahim, L.; Haouari, M.; Al-Emadi, N. A. Review of

Optimization Techniques Applied for the Integration of Distributed Generation from Renewable Energy Sources. *Renew. Energy* 2017, 113,266–280.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>.

- [3] Sultana, U.; Khairuddin, A. B.; Aman, M. M.; Mokhtar, A. S.; Zareen, N. A Review of Optimum DG Placement Based on Minimization of Power Losses and Voltage Stability Enhancement of Distribution System. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 63, 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.056>.
- [4] Akorede, M. F.; Hizam, H.; Aris, I.; Ab Kadir, M. Z. A. A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems. *Res. J. Appl. Sci.* 2010, 5 (2), 137–145.
- [5] Kumar, M.; Soomro, A. M.; Uddin, W.; Kumar, L. Optimal Multi-Objective Placement and Sizing of Distributed Generation in Distribution System: A Comprehensive Review. *Energies* 2022, 15 (21). <https://doi.org/10.3390/en15217850>.
- [6] Viral, R.; Khatod, D. K. Optimal Planning of Distributed Generation Systems in Distribution System: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16 (7), 5146–5165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020>.
- [7] Yang, B.; Yu, L.; Chen, Y.; Ye, H.; Shao, R.; Shu, H.; Yu, T.; Zhang, X.; Sun, L. Modelling, Applications, and Evaluations of Optimal Sizing and Placement of Distributed Generations: A Critical State-of-the-Art Survey. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45 (3), 3615–3642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.6104>.
- [8] Willis, H. L. Analytical Methods and Rules of Thumb for Modeling DG-Distribution Interaction. In 2000 power engineering society summer meeting (Cat. No. 00CH37134); 2000; Vol. 3, pp 1643–1644.
- [9] Wang, C.; Nehrir, M. H. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 2004, 19 (4), 2068–2076.
- [10] Ali, E. S.; Abd Elazim, S. M.; Abdelaziz, A. Y. Ant Lion Optimization Algorithm for Optimal Location and Sizing of Renewable Distributed Generations. *Renew. Energy* 2017, 101, 1311–1324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.023>.
- [11] El-Ela, A. A. A.; El-Sehiemy, R. A.; Abbas, A. S. Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Water Cycle Algorithm. *IEEE Syst. J.* 2018, 12 (4), 3629–3636. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2796847>.
- [12] Niknam, T.; Taheri, S. I.; Aghaei, J.; Tabatabaei, S.; Nayeripour, M. A Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm for Multiobjective Placement of Renewable Energy Resources. *Appl.*

- Energy 2011, 88 (12), 4817–4830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.023>.
- [13] Maciel, R. S.; Rosa, M.; Miranda, V.; Padilha-Feltrin, A. Multi-Objective Evolutionary Particle Swarm Optimization in the Assessment of the Impact of Distributed Generation. *Electr. Power Syst. Res.* 2012, 89, 100–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.02.018>.
- [14] Hadian, A.; Haghifam, M.-R.; Zohrevand, J.; Akhavan-Rezai, E. Probabilistic Approach for Renewable Dg Placement in Distribution Systems with Uncertain and Time Varying Loads. In 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting; 2009; pp 1–8. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275458>.
- [15] Chen, Y.; Strothers, M.; Benigni, A. A Stochastic Approach to Optimum Placement of Photovoltaic Generation in Distribution Feeder. In 2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC); 2016; pp 1–7. <https://doi.org/10.1109/PSC.2016.7462847>.
- [16] Abdelkader, M. A.; Elshahed, M. A.; Osman, Z. H. An Analytical Formula for Multiple DGs Allocations to Reduce Distribution System Losses. *Alexandria Eng. J.* 2019, 58 (4), 1265–1280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.009>.
- [17] Farh, H. M. H.; Eltamaly, A. M.; Al-Shaalan, A. M.; Al-Shamma'a, A. A. A Novel Sizing Inherits Allocation Strategy of Renewable Distributed Generations Using Crow Search Combined with Particle Swarm Optimization Algorithm. *IET Renew. Power Gener.* 2021, 15 (7), 1436–1450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/rpg2.12107>.
- [18] Hassan, A. S.; Sun, Y.; Wang, Z. Water, Energy and Food Algorithm with Optimal Allocation and Sizing of Renewable Distributed Generation for Power Loss Minimization in Distribution Systems (WEF). *Energies* 2022, 15 (6). <https://doi.org/10.3390/en15062242>.
- [19] Roshan, R.; Ravishankar, B. S.; Mohan, N.; Sandeep Kumar, K. J.; Devaru, D. G. Reassessment of Power Losses and Enhancement of Techno-Economic Feasibility in a Radial Distribution System. In 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon); 2022; pp 1–6. <https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972726>.
- [20] Elkadeem, M. R.; Abd Elaziz, M.; Ullah, Z.; Wang, S.; Sharshir, S. W. Optimal Planning of Renewable Energy-Integrated Distribution System Considering Uncertainties. *IEEE Access* 2019, 7, 164887–164907. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947308>.
- [21] C, H. P.; Subbaramaiah, K.; Sujatha, P. Optimal DG Unit Placement in Distribution Networks by Multi-Objective Whale Optimization Algorithm & Its Techno-Economic Analysis. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 214, 108869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108869>.
- [22] Huiling, T.; Jiekang, W.; Fan, W.; Lingmin, C.; Zhijun, L.; Haoran, Y. An Optimization Framework for Collaborative Control of Power Loss and Voltage in Distribution Systems With DGs and EVs Using Stochastic Fuzzy Chance Constrained Programming. *IEEE Access* 2020, 8, 49013–49027. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976510>.
- [23] Oskouei, M. Z.; Şeker, A. A.; Tunçel, S.; Demirbaş, E.; Gözel, T.; Hocaoglu, M. H.; Abapour, M.; Mohammadi-Ivatloo, B. A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network. *Sustainability* 2022, 14 (4). <https://doi.org/10.3390/su14042110>.
- [24] Kesavan, T.; Lakshmi, K. Optimization of a Renewable Energy Source-Based Virtual Power Plant for Electrical Energy Management in an Unbalanced Distribution Network. *Sustainability* 2022, 14 (18). <https://doi.org/10.3390/su14181129>.
- [25] Hai, T.; Zhou, J.; Muranaka, K. Energy Management and Operational Planning of Renewable Energy Resources-Based Microgrid with Energy Saving. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 214, 108792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108792>.
- [26] Püvi, V.; Lehtonen, M. Evaluating Distribution Network Optimal Structure with Respect to Solar Hosting Capacity. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 216, 109019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109019>.
- [27] Tunçel, S.; Oskouei, M. Z.; Şeker, A. A.; Gözel, T.; Hocaoglu, M. H.; Abapour, M.; Mohammadi-Ivatloo, B. Risk Assessment of Renewable Energy and Multi-Carrier Energy Storage Integrated Distribution Systems. *Int. J. Energy Res.* 2022.
- [28] Thukaram, D.; Wijekoon Banda, H. M.; Jerome, J. A Robust Three Phase Power Flow Algorithm for Radial Distribution Systems. *Electr. Power Syst. Res.* 1999, 50 (3), 227–236. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00150-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00150-3).