

Elektrik Enerjisinin Bölgeler Arası Alışverişinin Optimizasyonu Optimization of Inter Area Transfer Capability on Power Systems

Belgin Emre Türkay¹, Fatih Küçüktezcan¹, Alper Bulut²

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
turkayb@itu.edu.tr, kucuktezca@itu.edu.tr

²Enerji Sektörü İletim ve Dağıtım Hizmetleri, Güç Teknolojileri Uzmanlık Merkezi
SIEMENS A.Ş.
alper.bulut@siemens.com

Özet

Güç sistemlerinin büyük boyutlara ulaşması ve uluslararası elektrik enerjisi ticaretinin artmasıyla birlikte, bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi de önem kazanmıştır. Duyarlılık faktörleri ile, farklı çalışma noktaları için tekrar bir güç akışı analizi yapmadan, iletim hatları ve diğer sistem elemanlarının parametreleri hakkında geniş bilgi edinilebilir. Bu durumda, iletim hattı kapasiteleri ve üretim gruplarının sınır değerleri hesaba katılarak bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişinin sağlanması bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Bu çalışmada, güç iletim dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan güç sisteminde, üretim değerleri optimize edilerek, bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi maksimize edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kullanılabilir iletim kapasitesi, güç iletim dağılım faktörü, optimizasyon, genetik algoritma

Abstract

Since size of the power systems and demand for electric energy trading increases, inter area transfer capability becomes an important issue. By using sensitivity factors, large amount of information about different operating points of power systems, can be obtained without power flow analysis. Providing maximum power transfer between areas of power systems while considering capacities of transmission lines and generation limits, can be thought as an optimization problem. In this study, power transfer distribution factor (PTDF) and different optimization methods are used to optimize generation values for providing maximum power transfer between areas of power system consists of four areas, eleven busses and eighteen transmission lines.

Keywords: Available transfer capability, power transfer distribution factor, optimization, genetic algorithm

1. Giriş

Ekonomik, teknik ve çevresel etkenler sebebiyle, günümüz güç sistemlerinin yüklenebilirlik sınırlarında çalışmasıyla beraber bölgeler arası elektrik enerjisi alışverişi kavramı önem kazanmaya başlamıştır. Sistemin, geniş bir çalışma aralığında ekonomik ve güvenli olarak işletilebilmesi için, yeterli derecede iletim kapasitesi garanti edilmelidir. Hatların termal sınırları, bara gerilim sınırları, geçici hal ve gerilim kararlılık sınırları hesaba katıldığında, sisteme ilişkin maksimum iletim kapasitesine kullanılabilir iletim kapasitesi (Available Transfer Capability, ATC) adı verilir. Literatürde, kullanılabilir iletim kapasitesinin hesaplanması ve iyileştirilmesine ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Klasik P-V, Q-V eğrileri ile yapılan hesaplamalar, eğrilerin oluşturulması için birden çok güç akışı analizine ihtiyaç duyduğundan, çevrimdışı uygulamalarda kullanılmaktadır [1]. Çeşitli çalışmalarda, L indeksi, enerji fonksiyonları, bifürkasyon teorisi, modal analiz vb. yöntemler ile iletim kapasitesi hesaplanırsa da, yöntemler işlem yükünü de beraberinde getirmekte ya da yük değişimlerinin sistemi kararlılık sınırlarına ne kadar yaklaştırdığını belirleyememektedir [2-4].

Senkronize fazor ölçüm teknolojisinin gelişmesiyle, ölçüm tabanlı yöntemler ile maksimum iletim kapasitesinin çevrimiçi olarak belirlenmesi ilgi görmeye başlamıştır [5-7]. Greene, Dobson, ve Alvarado, sistem parametrelerin değişimlerine karşı iletim kapasitesinin duyarlılığı, analitik bir formül ile ifade etmişlerdir [8]. Youjie, McCalley ve Vittal, dahili nokta algoritması ile, güç sistemine ilişkin maksimum yüklenebilirlik ve kullanılabilir iletim kapasitesi gibi optimizasyon problemlerini basitleştirmişlerdir [9]. Mello, Melo, ve Granville'nin çalışmasında ise, dahili nokta algoritmasını Monte Carlo yöntemi ile beraber kullanılarak maksimum iletim kapasitesi belirlenmiştir [10].

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS) ile de güç sisteminin kullanılabilir iletim kapasitesi artırılabilir [11]. Orfanogianni ve Bacher, FACTS cihazlarının sistem içinde konumlandırılması bir optimizasyon problemi olarak ele

olarak, sistemin kullanılabilir iletim kapasitesi optimize etmişlerdir [12]. Bettiol, Wehenkel ve Pavella'nın çalışmasında, toplam tüketimi üretim birimlerine paylaştırılıp ve sınır koşul olarak geçici hal kararlılığı ele alıp, sistemin yüklenebilirliği optimize edilmiştir [13]. Benzer bir çalışmada ise, üretim birimlerinin azaltılmasına dayalı bir optimizasyon yöntemi ile yine geçici hal kararlılığı sınır koşulu altında, kullanılabilir iletim kapasitesi artırılmıştır [14]. Leonidaki, Georgiadis ve Hatziaargyriou'nun çalışmasında, karar ağaçları ile FACTS cihazlarının sistem içindeki optimal yerleri tayin edilerek, sistemin maksimum yüklenebilirliği hesaplanmıştır [15]. Pandey, Tapaswi ve Srivastava, yapay sinir ağları tabanlı bir yöntem ile sistemin güvenlik sınırları aşılmadan, kullanılabilir iletim kapasitesi optimize etmişlerdir [16].

Duyarlılık faktörleri, iletim hatlarının yeterliliğinin hesaplanmasında, farklı senaryo analizlerinde, enerji iletiminin sistem birimleri üzerindeki elektriksel etkilerinin ortaya konmasında, herhangi bir iletim hattının veya herhangi bir üretim biriminin devre dışı kalmasının, şebekenin diğer elemanlarını hangi oranda etkilediğinin belirlemede kullanılan araçlardır. Bu faktörlerden, güç iletimi dağılım faktörü (Power Transfer Distribution Factor, PTDF), normal işletme koşulları altında, üretim bölgeden tüketim bölgeye iletebilecek elektrik enerjinin artmasına bağlı olarak, iletim hatlarının ek yüklenme miktarının hesaplanması için kullanılmaktadırlar.

Literatürde, güç iletimi dağılım faktörleri, FACTS cihazları ile iletim kapasitesinin optimizasyonu gerçekleştirilirken de kullanılmıştır [17,18]. Chong Vittal Kolluri ve Mandal'ın çalışmasında, güç iletimi dağılım faktörü tabanlı bir yöntem ile güç sisteminin yeniden yapılandırılması gerçekleştirilmiştir [19]. Smieja, Lombardi, Styczynski ve Loppen'in çalışmasında, iletim kapasitelerine bağlı bölgesel sistem planlaması esnasında iletim hatları üzerindeki güç akışları, güç iletimi dağılım faktörleri ile hesaplanmıştır [20]. Patel ve Girgis, kullanılabilir iletim kapasitesinin hesaplanmasında güç iletimi dağılım faktörlerinin avantaj ve dezavantajları değerlendirmişlerdir [21].

Evrimsel algoritmalar, doğadaki biyolojik evrimi taklid eden rastlantısal arama yöntemleridir [22]. Bu yöntemlerden, günümüz mühendislik problemlerine yaygın olarak uygulananlardan biri de Genetik Algoritmalar'dır (GA) [23]. Klasik optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, çözüm uzayının bir çok noktasında arama yapması sebebiyle, GA'lar çok parametrelili, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için tercih edilen yöntemlerdendir.

İletim hattı kapasiteleri ve üretim gruplarının sınır değerleri hesaba katılarak bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişinin sağlanması bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir

Yapılan çalışmada, güç iletimi dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri yardımıyla, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan güç sistemi modeli üzerinde [24], bölgelerin üretim değerleri optimize edilerek, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişisi sağlanmıştır. Genetik algoritma, benzetimli tavlama ve tepe tırmanma yöntemleri ile elde edilen sonuçlar Powerworld güç akışı programında gerçekleştirilen simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır.

2. Teorik Altyapı

2.1. Güç İletimi Dağılım Faktörü

Doğrusal duyarlılık faktörleri, iletim hatlarının yeterliliğinin hesaplanmasında, farklı senaryo analizlerinde, enerji iletiminin sistem birimleri üzerindeki elektriksel etkilerinin ortaya konmasında, herhangi bir iletim hattının veya herhangi bir üretim biriminin devre dışı kalmasının, şebekenin diğer elemanlarını hangi oranda etkilediğini belirlemek için kullanılan araçlardır.

PTDF, iki bölge arasında gerçekleşen yük iletiminin, sistem içindeki iletim hatlarına nasıl dağılacakını ifade eden bir göstergedir. PTDF kullanılarak, bir bölgeden, başka bir bölgeye ilave güç alışverişi gerçekleştiğinde, enterkonnekte yapıya bağlı herhangi bir bölge içindeki veya bölgeleri bağlayan iletim hatlarının, güç artışı hangi oranda üstleneceğini belirlemek mümkündür. Doğal olarak, güç sisteminin herhangi bir bölgesinde meydana gelen bir üretim artışı ancak başka bir bölgedeki tüketim artışı ile karşılanarak, sistem üzerindeki arz-talep dengesi sağlanmış olur.

Bu koşullar altında, PTDF'nin hesaplanabilmesi için, üretim ve tüketimin değiştiği baralardaki açıların, belirtilen iletim hattı üzerindeki güç akışına etkisi ortaya konmalıdır.

m ile n bölgeleri arası bir iletim söz konusu olduğunda, i ile j baraları arasındaki l iletim hattına ilişkin güç dağılım faktörü aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [24].

$$PTDF_{ij,mn} = \frac{\partial P_i}{\partial P_m} + \frac{\partial P_l}{\partial P_n} = \frac{\partial}{\partial P_m} \left[\frac{1}{x_l} (\theta_i - \theta_j) \right] + \frac{\partial}{\partial P_n} \left[\frac{1}{x_l} (\theta_i - \theta_j) \right] \quad (1)$$

X_l : i ile j baralarını bağlayan iletim hattının reaktansı [pu],
 ∂P_l : l iletim hattındaki aktif güç akışı değişimi,
 $\partial \theta_i$: i barasındaki açı değişimi,
 $\partial \theta_j$: j barasındaki açı değişimi,
 ∂P_m : m bölgesindeki aktif güç üretimindeki değişim,
 ∂P_n : n bölgesindeki aktif güç üretimindeki değişimidir.

Bara reaktans matrisi olarak tanımlanan X matrisi, doğrusal güç akışı analizinde, bara gerilim açıları ile aktif güç iletimleri arasındaki bağıntıyı veren matristir.

$$\theta = [X] P \quad (2)$$

Bu durumda, m bölgesindeki aktif güç değişimi +P iken, n bölgesindeki aktif güç değişimi -P olacağından, PTDF aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir [24].

$$PTDF_{ij,mn} = \frac{X_{im} - X_{jm} - X_{in} + X_{jn}}{x_l} \quad (3)$$

Burada X_{im} , X_{jm} , X_{in} ve X_{jn} , bara reaktans matrisi X 'in i . ve j . satır, m . ve n . sütunundaki elemanlardır. Sisteme enjekte edilen ek aktif güce bağlı olarak i ile j baraları arasında bulunan l iletim hattındaki aktif güç akışı değişimi aşağıdaki formül ile tanımlanmıştır [24].

$$\Delta P_{ij} = PTDF_{ij,mn} \cdot P_{mn}^{ek} \quad (4)$$

Burada P_{mm}^{ek} , sisteme eklenen aktif güç miktarı, i ile j izlenen bir iletim hattının başındaki ve sonundaki bara numaraları, m ile n de artan üretim/tüketimin, giriş ve çıkış bölge numaralarıdır.

2.2. Tepe Tırmanma

Tepe tırmanma (TT) yöntemi, basit yapısı ve hızı sebebiyle sıkça kullanılan stokastik bir yerel arama yöntemidir. Her zaman mevcut çözümü en fazla geliştiren yönde ilerleme prensibine dayanır ve hafıza gereksinimi oldukça düşüktür. Şekil 1'de TT yöntemine ait akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1: Tepe tırmanma yöntemine ait akış diyagramı [25].

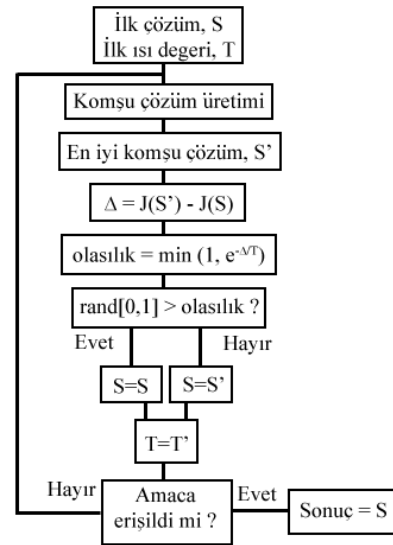
İlk adımda rastlantısal olarak veya probleme uygun bir başlangıç çözümü üretilir. Bir komşu üretme algoritması ile mevcut çözüme benzer belirli sayıda rasgele komşu çözüm üretilir. Bu çözümlerden uygunluk değeri en yüksek komşu çözüm seçilir. Bu çözüm mevcut çözümden daha iyi bir çözüm ise mevcut çözümün yerini alır ve bir sonraki iterasyona geçilir. Önceden belirlenmiş bir iterasyon sayısına, uygunluk değerine veya uygunluk değerinin iterasyona bağlı değişimine ulaşıldığında algoritma sonlandırılır. Algoritmanın basit yapısı sebebiyle oldukça hızlıdır ancak yapısı gereği optimizasyon sonuçları ilk çözüme bağlıdır ve yerel en iyi çözümlere takılma olasılığı mevcuttur.

2.3. Benzetimli Tavlama

Benzetimli Tavlama (BT) yöntemi, katıların fiziksel tavlama sürecinden esinlenilerek ortaya çıkmış ve ayrık optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar veren bir optimizasyon yöntemidir.

BT yöntemine ilişkin akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Yapısal olarak tepe tırmanma yönteminin modifiye edilmiş hali olarak düşünülebilir. Bir ilk çözüm ve ilk ısı değeri atandıktan sonra belirlenen amaca erişilene kadar algoritma bir döngü içine girer. TT yönteminde olduğu gibi bir komşu çözüm kümesi üretilir ve aralarından en iyi komşu seçilir. Tepe tırmanma yönteminden farklı olarak, bu çözüm mevcut çözümden daha kötü bir uygunluk değerine sahip olsa dahi mevcut çözümün yerine geçme olasılığı vardır. Saklanan mevcut çözümün uygunluk değeri düşse bile, yeni çözüm küresel en iyi çözüme komşu bir çözüm olabilir. Bu yaklaşım ile, yöntemin yerel bir en iyi çözüme takılması engellenebilir. Her iterasyonda, T sıcaklığı belli bir oranda azalır. Bu durum, ilerleyen iterasyonlarda mevcut çözümden daha kötü çözümlerin, mevcut çözümün yerini alma olasılığını düşürecektir. Belirlenen bir iterasyon sayısı veya minimum T

sıcaklığına ulaşıldığında algoritma sonlanır. Bu yöntemde karşılaşılabilecek en önemli sorun, ilerleyen iterasyonlarda sürekli azalan bir olasılıkla da olsa daha kötü bir çözüme yakınsayabilmesidir.

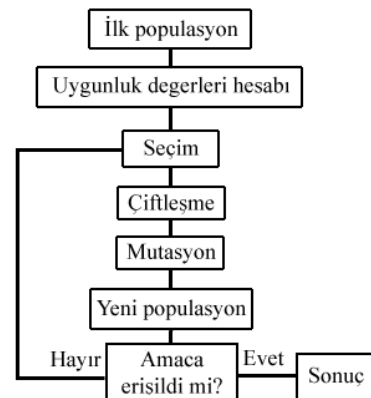


Şekil 2: Benzetimli tavlama yöntemine ait akış diyagramı [26].

2.4. Genetik Algoritmalar

Doğal hayatta güçlü olanın hayatta kalması, hayatta kalan güçlü bireylerin genlerini sonraki nesillere aktarması, bazı genlerin zaman içerisinde değişime uğraması, GA'ların seçim, çifletme ve mutasyon operatörleri ile modellenir. Bu operatörler, potansiyel çözümlerden oluşan bir başlangıç popülasyonu üzerine uygulanmaya başlanır. Popülasyona ait her yeni jenerasyonda, evrimleşen bireyler daha iyi potansiyel çözümlere dönüşür [22].

Ele alınan probleme bağlı olarak, farklı operatörler tipleri kullanan birçok GA oluşturulabilir ancak genel olarak GA'lara ait akış diyagramı Şekil 3'deki gibidir.



Şekil 3: Genetik algoritmalara ait akış diyagramı [22].

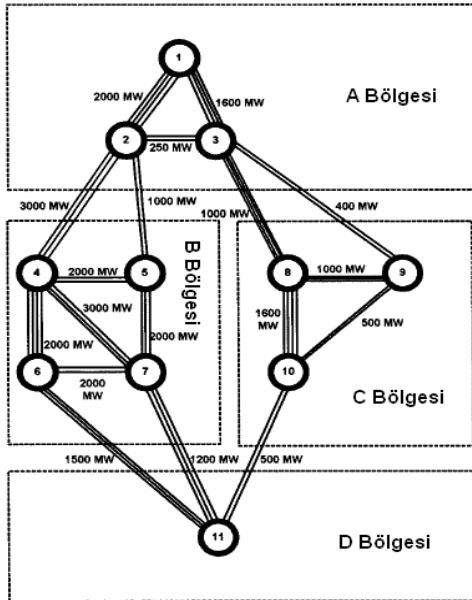
GA'lar genellikle rastlantısal olarak atanan olası bir çözüm kümesi ile ilk popülasyonu oluşturur. Popülasyon içerisindeki her bir birey (potansiyel çözüm), GA'da *kromozom* yapısındaki genetik kod ile temsil edilir. Her bir çözümün seçilen amaç fonksiyonuna bağlı bir uygunluk değeri

mevcuttur. İlk popülasyonu oluşturmadan önce, probleme uygun amaç fonksiyonu ve genetik kodlama yöntemlerinin seçimi yapılır. Genetik kodlama yöntemine göre oluşturulan ilk popülasyonun, amaç fonksiyonuna bağlı uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra GA bir döngü içine girer ve belirlenen sonlandırma kriteri sağlanana kadar yeni jenerasyonlar oluşturmaya devam eder. Bu döngü içerisinde öncelikle, bireylerin uygunluk değerlerine bağlı bir seçim operatörü, çiftleşerek çocukları (yeni potansiyel çözümler) oluşturacak bireyleri seçer. Çiftleşme operatörü ile oluşan çocuklar, bir sonraki jenerasyonda yer alır. Mutasyon operatörü, popülasyon içerisinde rastgele bir bireyin genetik kodunda meydana gelebilecek olası değişimi temsil eder. Bu operatörün amacı, GA'nın yerel en iyi çözümlere yakınsamasını engellemektir. Mutasyon operatörü ve oluşan çocukların uygunluk değerlerinin hesabının ardından yeni popülasyon elde edilmiş olur. Algoritma sonlandırma kriteri sağlanıyorsa algoritma sonlanır ve uygunluk değeri en büyük birey çözüm olarak elde edilir, aksi halde seçim operatörü ile başlayan döngüye geri dönlür. Algoritma sonlandırma kriteri genellikle belli bir jenerasyon sayısı veya popülasyonun ortalama uygunluk değerinin jenerasyona bağlı değişimi olarak seçilebilir.

3. Örnek Uygulama

3.1. Güç İletimi Dağılım Faktörü

Bu çalışmada, dört bölge, onbir bara ve onsekiz iletim hattından oluşan örnek güç sistemi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir [24]. İncelenen sistemin topolojisi Şekil 4'de, iletim hatlarına ilişkin değerler ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 4: 4 bölgeci güç sistemi modeli [24]

Richard D. Christie, Bruce F. Wollenberg ve Ivar Wangestein tarafından gerçekleştirilen çalışmada [24], örnek güç sistemindeki tek üretim bölgesi olan A bölgesinden D bölgesine gerçekleştirilecek 1000 MW elektrik enerjisi alışverişinde, sistemde bulunan iletim hatlarının hangi

oranlarda yükleneceği, bir güç akışı analizi yapılmaksızın, yalnızca PTDF faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 1: İletim hattı verileri [24]

Hat no.	Baralar arası	Hat sayısı	Hat reaktansı (Ω)	Hat kapasitesi (MW)
1	1-2	4	0.02	2000
2	1-3	4	0.025	1600
3	2-3	2	0.08	250
4	2-4	3	0.01	3000
5	2-5	2	0.02	1000
6	3-8	4	0.04	1000
7	3-9	2	0.05	400
8	4-5	2	0.01	2000
9	4-6	4	0.02	2000
10	4-7	3	0.01	3000
11	5-7	3	0.0015	2000
12	6-7	2	0.01	2000
13	8-10	4	0.025	1600
14	8-9	3	0.03	1000
15	9-10	2	0.04	500
16	6-11	3	0.02	1500
17	7-11	3	0.025	1200
18	10-11	2	0.04	500

Bu çalışmada ise, toplam üretim tek bölge yerine farklı birden çok bölgeye yayılmış, ayrıca güç iletimi dağılım faktörleri ve çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılarak, üretim (A, B ve C) bölgelerinden tüketim (D) bölgesine maksimum elektrik enerjisi iletimi gerçekleştirilebilmesi için sağlanmaya çalışılmıştır. A, B ve C bölgelerine paylaştırılan üretim değerleri, hatların taşıma kapasitelerini ve üretim birimlerinin sınır değerlerini hesaba katarak optimize edilmişlerdir.

Optimizasyon sonucunda ulaşılan üretim değerleri, güç akışı programındaki sistem modeline uygulanarak, iletim hatları yüklenmeleri izlenmiştir, optimizasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Örnek sistemdeki bölgeler için, (3) numaralı denklem ile hesaplanan PTDF değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada ise, B ve C bölgelerindeki üretim kapasiteleri sınırlandırılmıştır, ayrıca D bölgesinde olduğu gibi diğer bölgelere de yük baraları tanımlanmıştır. A, B ve C bölgelerindeki tüketimlerin sabit olması koşulu altında, iletim hatları aktif güç taşıma kapasiteleri ve üretim birimleri sınırları izlenerek, bu bölgelerden, D bölgesine maksimum ek elektrik enerjisi alışverişinin gerçekleştirilebilmesi için, ek üretimin bölgeler arasında nasıl dağılması gerektiği, başlangıç durum güç akışı bilgileri, PTDF faktörleri ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak saptanmıştır.

Tablo 2: Hesaplanan PTF Değerleri

Hat no.	$PTDF_{y,AD}$ [24]	$PTDF_{y,BD}$	$PTDF_{y,CD}$
1	0.7140	-0.0854	0.4019
2	0.2860	0.0854	-0.4019
3	-0.0446	0.0240	-0.1130
4	0.5692	-0.1275	0.3864
5	0.1894	0.0181	0.1286
6	0.1744	0.0791	-0.2414
7	0.0670	0.0304	-0.2735
8	-0.0007	0.1211	-0.0005
9	0.2880	0.3608	0.1955
10	0.2819	0.3905	0.1914
11	0.1887	0.1392	0.1281
12	-0.1001	-0.1005	-0.0679
13	0.1813	0.0822	0.2010
14	-0.0069	-0.0031	-0.4424
15	0.0601	0.0272	0.2840
16	0.3881	0.4613	0.2634
17	0.3705	0.4293	0.2515
18	0.2415	0.1094	0.4851

A bölgesindeki bir numaralı bara, B bölgesindeki dört numaralı bara ve C bölgesinde dokuz numaralı bara üretim baraları olarak seçilmiştir. A bölgesindeki üç numaralı bara, B bölgesindeki altı numaralı bara ve C bölgesinde sekiz numaralı bara üretim baraları olarak seçilmiştir. Başlangıç durumunda, bölgelere ilişkin üretim-tüketim değerleri ve üretim gruplarına ait sınırlar değerler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Bölgelere ilişkin üretim ve tüketim bilgileri

Bölge	Başlangıç Üretim (MW)	Başlangıç Tüketim (MW)	Üretim sınırları (MW)
A	2100	900	-
B	1000	1200	1000-2000
C	900	900	500-900
D	0	1000	-

Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu; D bölgesine iletilebilecek maksimum aktif güç miktarı olarak tanımlanmış olup (5) no’lu denklemdeki gibi formüle edilmiştir.

$$J = \sum P_{\bar{u}} - \sum P_t - n \cdot \sum \Delta P_{i,j,ihlal} - m \cdot \sum \Delta P_{\bar{u},ihlal} \quad (5)$$

Burada,

m : Üretim sınırların dışında kalan üretim grubu sayısı,

n : Aşırı yüklenen hat sayısı,

$\sum P_{\bar{u}}$: A, B ve C bölgelerinin toplam üretim değeri,

$\sum P_t$: A, B ve C bölgelerinin toplam tüketim değeri,

$\sum P_{i,j,ihlal}$: i ile j baraları arasındaki hattın, kapasitesinin üzerindeki ek yüklenme değeri,

$\sum P_{\bar{u},ihlal}$: Üretim gruplarının, sınırları dışındaki ek üretim değerleridir. Bu amaç fonksiyonuna göre, iletim hatlarında aşırı yüklenmeler veya üretim sınırlarının aşımına neden olan

bir olası çözümün yüksek bir uygunluk değeri alması engellenmiştir.

3.2. Çözüm İçin Kullanılan Optimizasyon Yöntemleri

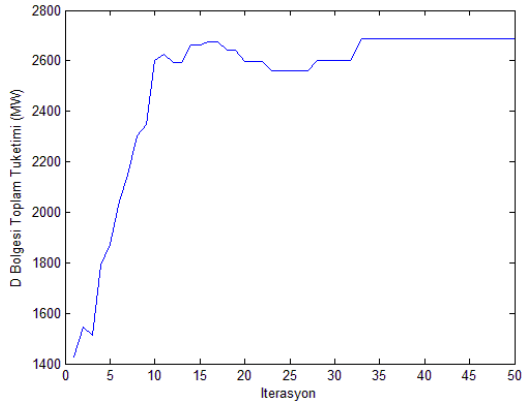
Çalışmada kullanılan optimizasyon yöntemlerinde, her potansiyel çözüm, sistemdeki toplam üretim barası sayısı ile aynı boyutta bir vektör ile, bu çözüm vektörlerinin her bir değeri ise ilgili baradan sisteme enjekte edilen aktif güç miktarı ile temsil edilir.

Her bir potansiyel çözümün uygunluk değerini bulmak için, (3) numaralı denklemde ile hesaplanmış PTF faktörleri ve çözüm vektörlerde belirtilmiş aktif güç değerleri kullanılır. Çözüm vektörlerindeki aktif güç üretim değerleri, Tablo 3’de verilmiş başlangıç üretim değerlerinden çıkartılarak, sisteme o baradan enjekte edilen ek aktif güç değeri hesaplanır (P_{mn}^{ek}). Üretilen ek aktif güç değerlerinin, sistemin hangi iletim hatlarındaki güç akışlarında ne kadar değişime sebep olduğunu hesaplamak için, (5) numaralı denklemde olduğu gibi, ilgili PTF faktörü ile üretilen ek aktif güç değerleri çarpılır. Ek üretim değerlerinin, iletim hatlarındaki güç akışına etkisi (ΔP_{ij}) ile başlangıç durumunda hat üzerindeki güç akışı değerleri toplanarak, üretilen ek aktif güç değerleri sonucunda, hatlar üzerindeki yeni güç akışı değerleri hesaplanmış olur. Yeni güç akışı değerleri, hat kapasitelerinin üzerinde ise bu durum (5) numaralı denklemde olduğu gibi amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır ($n \cdot \sum \Delta P_{i,j,ihlal}$). Benzer şekilde, üretim baralarına ilişkin herhangi bir sınır ihlali de amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır ($m \cdot \sum \Delta P_{\bar{u},ihlal}$). Böylece sınır koşullarını sağlamayan sonuçlar verecek potansiyel çözümler düşük uygunluk değerlerine sahip olacak ve optimizasyonların ilerleyen iterasyonlarında eleneceklerdir. Böylece her optimizasyon sonucunda, sınır koşullarını sağlayan çözümler elde edilir ve çözümlerin amaç fonksiyonlarının değerleri, o çözüm için D bölgesine ne kadar aktif güç iletildiğini belirler.

Tepe tırmanma algoritmasında, her iterasyonda mevcut çözüme komşu 20 adet çözüm oluşturulmuştur. Komşu çözümler, mevcut çözüme ait üretim değerlerinin +/-%40 aralığında kalan bir uzaydan rastlantısal olarak seçilmişlerdir. Mevcut çözümün 30 iterasyon boyunca daha iyi bir çözüm ile yer değiştirmemesi, algoritma sonlandırma kriteri olarak belirlenmiştir.

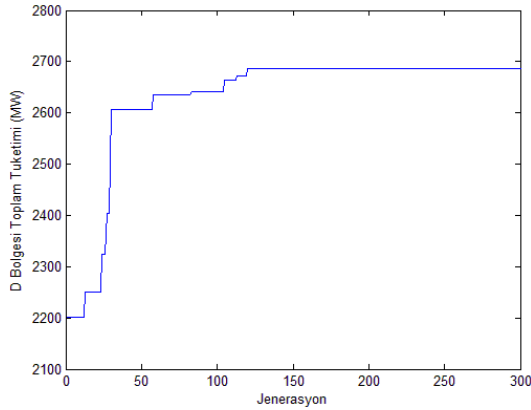
BT yönteminde kullanılan komşu çözüm üretme algoritması ve parametreleri, TT yöntemindeki ile birebir aynıdır. İlerleyen iterasyonlarda, algoritmanın iyi bir çözüme yakınsamaya başlarken tekrar çok kötü bir çözüme dönmesini engellemek için T değeri her iterasyonda %10 oranında azaltılmıştır. Böylece yaklaşık 30 iterasyon içerisinde uygunluk değeri çok yüksek olmayan yeni çözümlerin mevcut çözümün yerine geçme olasılığı %10 değerinin altına inmektedir ancak yüksek uygunluk değerlerine sahip çözümlerin mevcut çözümün yerini alma olasılığının oldukça düşük değerlere inmesi için yaklaşık 20 iterasyon daha gerekmektedir. Bu durumdan sonra mevcut çözümde herhangi bir değişim meydana gelmediği için optimizasyon 50 iterasyon sonunda durmaktadır.

Bu çalışmada uygulanan GA’da, bireyler üç genden oluşan kromozomlar şeklinde kodlanmışlardır. Kromozomdaki genler A, B ve C bölgelerindeki üretim gruplarının, üretim değerlerini temsil etmektedir. Böylece ikili (binary) kodlama için harcanacak hesaplama zamanının önüne geçilmiştir.



Şekil 7: En iyi çözümün iterasyona bağlı değişimi (BT)

Bir başlangıç popülasyonu oluşturan GA, ilk itereasyonda diğer yöntemlere göre daha iyi bir çözüm yakalayabilmektedir (Şekil 8). Diğer iki yöntemle göre daha iyi bir sonuca ulaşmasına karşın, bu yöntemlerden daha büyük popülasyon sayısına ve iterasyon sayısına başka bir deyişle daha fazla hafıza gereksinimi ve işlem yüküne maruz kalmıştır.

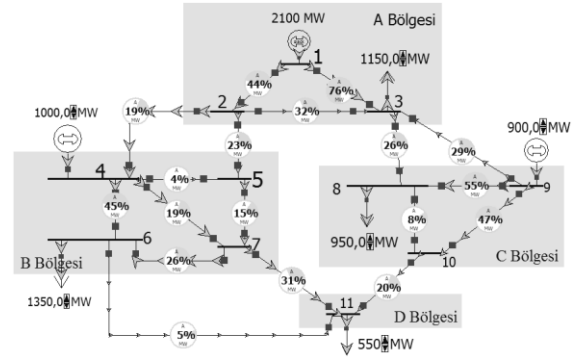


Şekil 8: En iyi çözümün iterasyona bağlı değişimi (GA)

Elde edilen sonuçların doğruluğunun tespiti için optimize edilmiş bölge üretim değerleri ve D bölgesindeki yük miktarı, Powerworld programında gerçekleştirilen güç akışı analizlerinde kullanılmıştır. GA sonuçları kullanılarak gerçekleştirilen güç akışı analizi sonucunda, 2 ve 17 numaralı iletim hatlarının yüklenme oranlarının sınır değere ulaştığı, B ve C bölgelerindeki üretimin, belirlenmiş olan sınır değerler içinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Elektrik güç sistemleri dinamik olarak değişen aktif sistemlerdir. Güç sistemi üzerindeki bulunan yüklerin değişimi, iletim hatları üzerindeki güç akışlarını da etkileyecektir. Çalışmada ikinci bir senaryo olarak, tüketim baralarından çekilen aktif güç değerleri artırılarak sistem yeni bir çalışma noktasına taşınmıştır, bu duruma ilişkin yeni tüketim değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

İkinci senaryoda A, B ve C bölgelerindeki üretim değerleri sabit iken tüketim değerlerinin artışı, D bölgesine iletilen toplam güç miktarını azaltmıştır. Bu yeni duruma ilişkin iletim hattı yüklenme oranları Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Yeni başlangıç durumuna ilişkin hat yüklenmeleri

Tablo 6: Bölgelere ilişkin üretim ve tüketim bilgileri

Bölge	Başlangıç Üretim (MW)	Başlangıç Tüketim (MW)	Üretim sınırları (MW)
A	2100	1150	-
B	1000	1350	1000-2000
C	900	950	500-900
D	0	550	-

İlk senaryoda olduğu gibi, belirlenen amaç fonksiyonuna göre, farklı optimizasyon yöntemleri ile optimize edilmiş bölge üretim değerleri ve bu değerlere ilişkin D bölgesi tüketim değerleri, Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7: İkinci senaryo için optimizasyon sonuçları

	Tepe Tırmanma	Benzetimli Tavlama	Genetik Algoritma
Üretim A (MW)	3165	3196	3173
Üretim B (MW)	1797	1774	1834
Üretim C (MW)	878	890	883
Tüketim D (MW)	2390	2410	2440
İterasyon	40	50	300

Sonuçlar, Tablo 5.'deki ilk senaryo için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, D bölgesine iletilen aktif güç miktarının daha sınırlı olduğu gözlenmiştir. Diğer bölgelerdeki tüketim değerlerinin artması, optimizasyonlar esnasında üretim değerleri artırılırken iletim hatlarının daha erken sınır değerlere ulaşmasına neden olarak, iletim hatları üzerinden D bölgesine iletilecek güç miktarını kısıtlamıştır.

PTDF faktörlerinin kullanılması, güç akışı analizine olan gereksinimi ortadan kaldırdığından, optimizasyonlar, Pentium Core 2 Duo 2GHz işlemci ve 2GB RAM'e sahip bir bilgisayar ile 10 sn'den kısa bir sürede sonuçlanmıştır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, güç iletim dağılım faktörü ve farklı optimizasyon yöntemleri kullanılarak, çok bölgeli bir güç sistemi modeli üzerinde, üretim gruplarının aktif güç değerleri optimize edilerek, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişi sağlanmıştır.

Potansiyel çözümlerin uygunluk değerlerinin hesabında kullanılan iletim hattı yüklenmelerinin PTDF faktörleri ile hesaplanması, optimizasyon için ihtiyaç duyulan süreyi oldukça kısaltmıştır. Bu durum, çalışmada uygulanan yöntemlerin, gerçek zamanlı uygulanabilirliğini mümkün kılmaktadır.

Kullanılan optimizasyon tekniklerinden benzetimli tavlama ve genetik algoritmalar, bölgeler arası maksimum elektrik enerjisi alışverişini sağlamada her seferinde global sonuca ulaşırken tepe tırmanma yöntemi bazım durumlarda yerel en çözümlere takılmıştır.

Optimize edilmiş üretim değerlerinin kontrolü için güç akışı analizleri yapılmış ve elde edilen güç akışları, optimum çözümler için PDTF faktörleri ile hesaplanan hat yüklenmeleri ile örtüştüğünden, optimizasyonların yeterli doğrulukta çözümlere ulaştığı belirlenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Chiang H., Flueck A., Shah K. ve Balu N., "CPFLOW, a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations", IEEE Trans. Power Syst., 10(2), 623-634, 1995.
- [2] Overbye, T. ve Demarco, C., "Improved techniques for power system voltage stability assessment using energy methods", IEEE Trans. Power Syst., 6(4), 1446-1452, 1991.
- [3] Gao B., Morison G. ve Kundur P., "Voltage stability evaluation using modal analysis", IEEE Trans. Power Syst., 7(4), 1529-1542, 1992.
- [4] Canizares C., "On bifurcations, voltage collapse and load modeling", IEEE Trans. Power Syst., 10(2), 512-518, 1995.
- [5] Haque M., "On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., 2003, 107-112.
- [6] Wang Y., Li W., Lu J., "A new node voltage stability index based on local voltage phasors", Electr. Power Syst. Res., 79(1), 265-271, 2009.
- [7] Corsi S., Taranto G., "A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements", IEEE Trans. Power Syst., 23(3), 1271-1279, 2008.
- [8] Greene, S., Dobson, I. ve Alvarado, F.L., "Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula", IEEE Trans. Power Syst., 17(1), 34-40, 2002.
- [9] Youjie D., McCalley, J.D. ve Vittal, V., "Simplification, expansion and enhancement of direct interior point algorithm for power system maximum loadability", IEEE Trans. Power Syst., 15(3), 1014-1021, 2000.
- [10] Mello, J.C.O., Melo, A.C.G. ve Granville, S., "Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and Monte Carlo simulation", IEEE Trans. Power Syst., 12(2), 736-742, 1997.
- [11] Ying X., Song, Y.H., Chen-Ching L. ve Sun, Y.Z., "Available transfer capability enhancement using FACTS devices", IEEE Trans. Power Syst., 18(1), 305-312, 2003.
- [12] Orfanogianni, T. ve Bacher, R., "Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices", IEEE Trans. Power Syst., 18(1), 19-26, 2003.
- [13] Bettiol, A.L., Wehenkel, L. ve Pavella, M., "Transient stability-constrained maximum allowable transfer", IEEE Trans. Power Syst., 14(2), 654-659, 1999.
- [14] Hakim, L., Kubokawa, J., Yue Yuan, Mitani, T., Zoka, Y., Yorino, N., Niwa, Y., Shimomura, K. ve Takeuchi, A., "A Study on the Effect of Generation Shedding to Total Transfer Capability by Means of Transient Stability Constrained Optimal Power Flow", IEEE Trans. Power Syst., 24(1), 347-355, 2009.
- [15] Leonidaki, E.A., Georgiadis, D.P. ve Hatziaargyriou, N.D., "Decision trees for determination of optimal location and rate of series compensation to increase power system loading margin", IEEE Trans. Power Syst., 21(3), 1303-1310, 2006.
- [16] Pandey, S.N., Pandey, N.K., Tapaswi, S. ve Srivastava, L., "Neural Network-Based Approach for ATC Estimation Using Distributed Computing", IEEE Trans. Power Syst., 25(3), 1291-1300, 2010.
- [17] Sookananta, B., Galloway, S.J., Burt, G.M. ve McDonald, J.R., "Employment of power transfer distribution factor for the optimal placement of FACTS devices", IPEC, International Power Engineering Conference, 2007, 569 - 573.
- [18] Naik, R.S., Vaisakh, K., ve Anand, K., "Application of TCSC for enhancement of ATC withPTDF in Power Transmission System", International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010, 1-6.
- [19] Chong W., Vittal, V., Kolluri, V.S. ve Mandal, S., "PTDF-based automatic restoration path selection", IEEE Trans. Power Syst., 25(3), 1686-1695, 2010.
- [20] Smieja, T., Lombardi, P., Styczynski, Z.A. ve Loppen, S., "Influence of inter area Transfer Capacity on the Regional Power System Planning", IEEE PowerTech Conference, 2009, 1-6.
- [21] Patel, M. ve Girgis, A.A., "Review of available transmission capability (ATC) calculation methods", PSC, Power Systems Conference, 2009, 1-9.
- [22] Goldberg D. E., "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning", Addison Wesley Longman, 1989.
- [23] Uyar A. Ş. ve Türkay B., "Evolutionary Algorithms for the Unit Commitment Problem", Turkish Journal of Electrical Engineering, 16(3), 239-255, 2008.
- [24] Christie, R.D., Wollenberg, B.F. ve Wangenstein, I., "Transmission management in the deregulated environment", Proceedings of the IEEE, 88(2), 170-195, 2000.
- [25] Levy, Norman M., "The Application of Hill-Climbing Methods to the Adaptive Control of Small-Scale Practical Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 24(1), 74-80, 1977.
- [26] Kurbel, K., Schneider, B. ve Singh, K., "Solving optimization problems by parallel recombinative simulated annealing on a parallel computer-an application to standard cell placement in VLSI design", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 28(3), 454-461, 1998.