

Enerji iletim sisteminde bara bölme problemi için çok amaçlı optimizasyon yöntemi

Multi-Objective optimization method for bus splitting problem in energy transmission system

Erdi DOĞAN^{1*} 

¹Türkiye Elektrik İletim AŞ, Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü, Sakarya, Türkiye.
erdi.dogan.teias@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 10.09.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 12.04.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 02.03.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.77672
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için genişlemeye devam eden elektrik enerjisi iletim sistemi çeşitli güvenlik problemlerine sebep olmaktadır. Şebekeye entegre edilen yeni yatırımların bir sonucu olarak sistem eşdeğer empedansının azalması kısa devre akımlarının yükselmesine neden olmaktadır. Meydana gelebilecek kısa devre akımlarının mevcut kesicilerin kasma kapasitesini aşması önlem alınması gereken önemli bir problemdir. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak amacıyla kullanılan yöntemlerden biri bara bölme tekniğidir. Bara bölme yöntemi iki bara bulunan transformatör merkezlerinde fiderleri uygun baralara dağıtarak baralar arasındaki bağlantının kesilmesi suretiyle uygulanmaktadır. Bara bölme yoluyla şebeke konfigürasyonunda yapılan değişiklikler neticesinde her ne kadar kısa devre akımları sınırlandırılabilse de N-1 güvenliğinde bozulmalar ve güç kayıplarında artışlar söz konusu olabilmektedir. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak amacıyla sistem eşdeğer empedansını yükseltmenin bir sonucu olarak güç kayıpları da artmaktadır. Kısa devre akımları ile güç kayıpları arasında bulunan bu çıkar çatışması nedeniyle iki amaç arasında bir denge noktasının bulunması gerekmektedir. Bu doğrultuda çalışmamız kapsamında bara bölme optimizasyonu probleminin amaçları kısa devre akımları ve aktif güç kayıpları olarak seçilmiş ve N-1 güvenliği probleme kısıt olarak eklenmiştir. Problemin çözümünde Pareto-optimal kavramını Genetik Algoritmayla birleştiren kısıtlı NSGA-II algoritması çok amaçlı bara bölme optimizasyonu problemini çözmek için kullanılmıştır. Oluşturulan matematiksel model ve kullanılan algoritma IEEE RTS 96-baralı test sisteminde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen yaklaşımın kısa devre akımlarını gerektiği kadar sınırlandırma, güç kayıplarının aşırı yükselmesini önleme ve N-1 güvenliğini sürdürme açısından şebekenin güvenli çalışma topolojilerini elde etmede başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Çok amaçlı optimizasyon, Bara bölme optimizasyonu, Sezgi-Üstü algoritma, NSGA-II, Kısıtlı optimizasyon, Kısa devre akımları, Güç kayıpları, N-1 güvenliği.

Abstract

The electrical energy transmission system lasted to expand in order to compensate for growing energy demand, leads to a variety of security problems. The decreasing system equivalent impedance in the result of the new investments integrated into the network causes to raise the short-circuit currents. It is a crucial problem, which taking remedial action is a necessity, for the short-circuit currents to be occurred exceed the circuit-breaker capacity. One method used to contain short-circuit currents is to perform the bus splitting technique. The bus splitting method is implemented through distributing feeders to appropriate buses and disconnect the zero-impedance line between buses in substations. Even if the short-circuit currents are restricted thanks to alterations in the network configuration by using bus splitting, the violation of the N-1 security and the growth of the power losses might occur. Increasing the system equivalent impedance in order to limit the short-circuit currents results in greater power losses. A balance between power losses and short-circuit currents should be found out due to the conflict of interest between these objectives. The objective function is created with short-circuit currents and active power losses and N-1 security is implemented as a constraint in this study. The constrained NSGA-II algorithm integrating Pareto-optimality concept into Genetic Algorithm is performed to solve the multi-objective bus splitting optimization problem. Mathematical model and algorithm created are implemented to the RTS 96-bus test system. The results show that the proposed method is successive in obtaining the secure topological frameworks of the network in terms of restricting the short-circuit currents, preventing the over increase of the power losses and maintaining the N-1 security.

Keywords: Multi-objective optimization, Bus splitting optimization, Meta-Heuristics, NSGA-II, Constrained optimization, Short-Circuit currents, Power losses, N-1 security.

1 Giriş

İletim sisteminin güvenilir ve ekonomik işletimi, araştırmacıların yoğun olarak çalıştığı çözümleri zor bir optimizasyon problemidir. Enerjiye olan talebin artmaya devam etmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla oluşan belirsizlikler, güç sistemi işletiminde baş edilmesi gereken yeni zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Tüketim miktarında artışın gerçekleştiği bölgelere gerek arazi şartlarının uygun olmaması gerek tüketim artış hızının yatırım

süresinden çok daha kısa olması sebebiyle enerjiyi transfer etmek giderek zorlaşmaktadır. Bu problemlerin sonuçlarını hafifletebilmek için mevcut iletim alt yapısının hem teknik hem de mali anlamda en ekonomik şekilde işletilmesi gerekmektedir. Bara bölme tekniğiyle şebeke topoloji optimizasyonu karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmek için kullanılan etkili bir yaklaşımdır.

Bara bölme optimizasyonu (BBO) İletim Sistemi Operatörlerinin (İSO) sıklıkla karşılaştığı problemler olan kısa devre akımlarını sınırlandırmada [1] ve N-1 güvenliğini

*Yazışılan yazar/Corresponding author

sürdürmede [2] kullanılmıştır. N-1 güvenliği, iletim sisteminde hali hazırda bulunan N adet ekipmandan (iletim hattı, transformator, ototransformator vb.) 1 tanesinin herhangi bir nedenle servis harici olması durumunda hiçbir tüketicinin bu durumdan etkilenmemesi kuralıdır. İletim hatlarının servis harici edilmesi mantığına dayalı olan Optimal İletim Anahtarlaması (OIA) problemi, N-1 güvenliğini sürdürürken kısa devre akımlarını sınırlandırmak [3] ve işletme maliyetlerini düşürmek [4] amaçlarıyla kullanılmıştır. BBO ile OIA tekniklerinin entegre edildiği Şebeke Topoloji Optimizasyonu (ŞTO) problemi 80'li yıllardan itibaren lineer programlama tekniği kullanılarak işletme maliyetlerini düşürmek amacıyla kullanılmaktadır [5]-[8]. Mali kazanç sağlarken güvenlik kriterlerinin de dikkate alındığı ŞTO problemi [9],[10] çalışmalarında Benders ayrıştırma yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmalarda N-1 güvenlik kriterine dikkat ederek üretim dağılımının optimize edilmesi amaçlanmış ve Doğru Akım Optimal Güç Akışı (DAOGA) yöntemi kullanılmıştır. Literatürde uygulanan yöntemler incelendiğinde genel olarak, ŞTO probleminde kısa devre akımlarını sınırlandırmanın amaçlanmadığı, aktif güç kayıplarının hesaba katılmadığı ve DA güç akışı eşitliklerinin kullanıldığı görülmektedir.

ŞTO probleminde Doğru Akım (DA) güç akışlarıyla yapılan ihmallerin önüne geçebilmek için [11]'de yapılan çalışmada Alternatif Akım Optimal Güç Akışı (AAOGA) ikinci derece konik programlama yöntemiyle birlikte kullanılmıştır. Ayrıca ŞTO problemi Dinamik Termal Oran problemiyle birleştirilerek mevcut iletim altyapısının daha verimli kullanılması amaçlanmıştır [12]. Güvenlik kısıtlı üretim planlaması problemi, OIA [13],[14] ve BBO [15] teknikleriyle birleştirilerek sistem güvenliğinin artırılması ve maliyetlerin azaltılması amaçlanmıştır. Bahsedilen diğer çalışmalarda uygun bara dağılımı yapıldıktan sonra ilgili kesicilerin servis harici edilerek işletilmesi söz konusuysen, [15]'de yapılan çalışmada kuplaj kesicilerin servis harici olması durumunda iletim sisteminde çökmelerin yaşanmaması için uygun bara dağılımının önceden yapılmış olması ve kuplaj kesicilerin normalde serviste bırakılması yaklaşımı uygulanmıştır.

Sezgi-üstü (meta-sezgisel) algoritmalar özellikle konveks olmayan geniş çaplı optimizasyon problemlerinde araştırmacılar tarafından yoğun şekilde kullanılmaktadır [16]. Kombinasyonel ve konveks olmayan yapıya sahip BBO probleminin çözümünde deterministik yöntemlerin kullanılması, yerel optimal noktalara takılma ve bellek yetersizliği gibi problemlerle karşılaşılmasına neden olabilmektedir [17]. Bu nedenle sezgi-üstü algoritmalar uygulama basitliği, türevsiz işleyiş, esneklik ve yerel optimalden kaçınma avantajlarıyla araştırmacıların ilgisini çekmektedir[16]. Bu doğrultuda güç sisteminde güç akış problemlerini çözmek [18], enerji merkezi uygulamalarında ekonomik yük dağıtım problemiyle başa çıkmak [19], enerji verimliliğini artırmak [20] ve esnek alternatif akım iletim sistemi teçhizatlarının optimal yerleşimi sağlamak [21] gibi çeşitli alanlarda sezgi-üstü algoritmalar kullanılmaktadır.

Farklı mühendislik alanlarında karşılaşılan gerçek problemlerin çözüme kavuşmasını sağlayan yüzlerce sezgi-üstü algoritma bulunmaktadır [22]. Tek amaçlı optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanan ve evrim kavramından ilham alan Genetik Algoritma (GA) [23], sezgi-üstü algoritmalar arasında en çok tercih edilen algoritmalarındandır. Çok amaçlı problemlerle başa çıkabilmek için GA geliştirilerek NSGA [24] ismiyle yayınlanmıştır. NSGA algoritmasının eksiklerinin

giderilmesiyle ortaya çıkarılan NSGA-II algoritması [25] güç sisteminin çeşitli alanlarında kullanılmıştır. Bu alanlar arasında artan enerji talebini karşılayabilmek ve arz güvenliğini iyileştirmek amacıyla uygulanan iletim sisteminin genişletilmesi problemi [26]-[32], iletim sisteminde meydana gelen arızalar nedeniyle oluşacak maliyetin minimize edilmesi ve aşırı yüklenen iletim hatlarını rahatlatmak için arıza sonrası üretim dağılımını yeniden yapılandırma ve yük atma işlemlerini optimize etme yaklaşımı [33], generatör, transformator kademesi ve şönt kapasitörleri kontrol ederek gerilim bozulmalarını ve güç kayıplarını minimize etme işlemi [34], iletim sisteminin transfer kapasitesini artırmak, güç kayıplarını azaltmak ve gerilim regülasyonunu sağlamak amacıyla Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (EAAİS) cihazlarının kullanımı [35]-[38], dağıtık enerji kaynaklarının optimal yerleşimi [39], batarya depolama sisteminin şebekeye entegrasyonu [40] ve iletim hatlarında planlı bakım programlarının optimizasyonu [41] bulunmaktadır.

BBO probleminin çözümünde kısa devre akımlarını sınırlandırma amacıyla [1],[42] ve kısa devre akımlarını sınırlandırırken N-1 güvenliğini sürdürme amaçlarıyla [43], [44] sezgi-üstü algoritmalar kullanılmıştır. Ancak bu çalışmalarda toplama ve ϵ -kısıtlama teknikleri kullanılarak amaç fonksiyonu tek amaca indirgenmiş olup, Pareto-optimal kümeyi keşfetmeye yönelik olan NSGA-II yaklaşımı kullanılmamıştır.

Genişleyen iletim sisteminin bir sonucu olarak arıza esnasında meydana gelen kısa devre akımları yükselmekte ve kesicilerin akım kesme kapasitelerini aşmaktadır. Meydana gelebilecek aşırı kısa devre akımlarını sınırlandırmak için İSO'lar çift baralı Transformator Merkezlerinde (TM) fiderleri uygun baralara dağıtarak kuplaj kesiciyi açmak suretiyle iki bara arasındaki yakın elektriksel irtibatı sonlandırır. Yapılan bu topolojik değişimle sistem empedansı artırılarak kısa devre akımları sınırlandırılır. Ancak bara dağılımı yapılmasıyla birlikte iletim sisteminde meydana gelen güç kayıplarının yükselmesi ve oluşan arızalara karşı sistemin göstereceği direncin azalması sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Kısa devre akımlarını sınırlandırırken hem güç kayıplarının aşırı yükselmesini önleyecek hem de sistemin statik güvenliğini sürdüreceği topolojinin elde edilmesi oldukça karmaşık bir kombinasyonel optimizasyon problemidir. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak için uygulanan bara bölmeler, sistemde gerçekleşen güç kayıplarını artırdığı için bu iki amaç arasında çıkar çatışması yaşanmaktadır. Başka bir ifadeyle, kısa devre akımlarını BBO yöntemi ile minimize etmek güç kayıplarını maksimuma çıkarmak anlamına gelir. Dolayısıyla her iki amacın makul ölçüde iyi olacağı bir topolojinin elde edilmesi gerekmektedir. NSGA-II tekniğiyle elde edilen Pareto-optimal kümesi birbirini bastıramamış makul çözümler seti sunmakta ve kullanıcıların bu kümenin içerisinde sistem için daha iyi olan çözümü seçmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışma kapsamında amaç fonksiyonu güç kayıplarını ve kısa devre akımlarını minimize edecek Pareto-optimal kümenin NSGA-II tekniği kullanılarak elde edilmesine yönelik stratejiyle oluşturulmuştur. Ayrıca, sistemin N-1 güvenliği problemin kısıtı olarak tanımlanmış ve dolayısıyla problemin çözümünde kısıtlı NSGA-II yöntemi kullanılmıştır. Oluşturulan algoritma BBO problemini çözmek üzere IEEE RTS 96-baralı test sisteminde kullanılmış ve etkili sonuçlar alınmıştır. Bara dağılımı optimizasyonunun N-1 güvenliğini sürdürürken kısa devre akımları ve güç kayıplarını sınırlandırma açısından

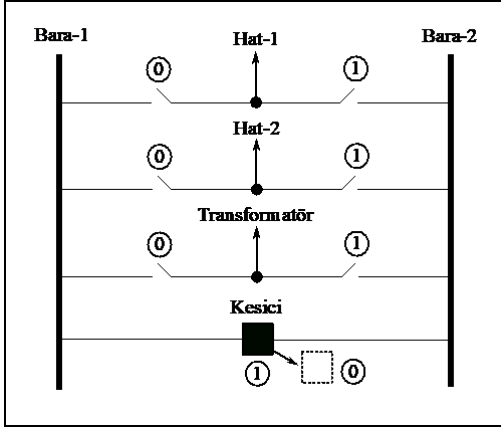
çözülmesi ile NSGA-II algoritmasının ilk defa böyle bir problemde kullanılması bu çalışmanın katkılarıdır.

Bölüm 2’de çok amaçlı BBO probleminin matematiksel modeli sunulmaktadır. Bölüm 3’te BBO probleminin çözümünde kullanılan kısıtlı NSGA-II algoritması açıklanmaktadır. Bölüm 4’te IEEE RTS-96 test sisteminde gerçekleştirilen analiz sonuçları verilmektedir. Son olarak Bölüm 4’te çalışma kapsamında elde edilen bulgular değerlendirilmekte ve Bölüm 5’te sonuçlar paylaşılmaktadır.

2 Çok amaçlı BBO problemi

BBO, ikili (binary) ve kombinyonel bir optimizasyon problemidir. Amaç fonksiyonunda optimize edilmek istenen problem ne olursa olsun çift baralı TM’lerde hangi fiderin hangi baraya bağlanacağı 0 ve 1 ikili koduyla ifade edilmektedir. Fiderlerin uygun baralara dağıtılmasıyla birlikte amaç fonksiyonunda belirlenen problemleri minimize eden uygun topolojinin elde edilmesi istenmektedir.

Şekil 1’de iki barası bulunan bir TM’de fiderlerin bara-1’e bağlanma durumu 0 koduyla ve bara-2’ye bağlanma durumu da 1 koduyla ifade edilmiştir. Eğer herhangi bir fidere 0 kodu atanmışsa ilgili fiderin bara-1 ayırıcısı kapalı konumda iken bara-2 ayırıcısı açık konumda olmaktadır. Ayrıca iki bara arasındaki irtibatı sağlayan kuplaj kesici için 1 ve 0 ikili kodları kullanılmıştır. Eğer kesici için 1 kodu geçerliyse iki bara arasında elektriksel irtibat kurulmuş olur ve bu nedenle bara dağılımının topolojik açıdan bir etkisi olmaz. Böyle bir durum söz konusu olduğunda yalnızca kuplaj fideri üzerinden geçen akım miktarı değişmektedir. Ancak kuplaj kesici için 0 kodu uygulanıyorsa iki bara arasındaki irtibat koparılarak topolojik değişim gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 1. İki baralı bir TM örneği.

Figure 1. An example substation having two buses.

2.1 Matematiksel model

Çalışmamız kapsamında oluşturulan çok amaçlı BBO probleminin amaçları kısa devre akımlarını (f_1) ve yüke bağlı aktif güç kayıplarını (f_2) [34] minimize etmektir. Bu iki hedef doğaları gereği birbirini etkileyen özelliklere sahiptir. Sistem eşdeğer empedansının kısa devre akımlarını sınırlandırmak için artırılması lazımken, yüke bağlı güç kayıplarını düşürmek için azaltılması gerekir. Dolayısıyla çıkar çatışması bulunan hedeflerden nispeten makul çözümlerin seçilebilmesi oldukça önemli olduğu için amaçlar arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Pareto-optimal kümenin elde edilmesiyle birlikte güç sistemi için hangi çalışma noktasının daha faydalı ve dengeli olduğu sistem uzmanı tarafından seçilebilmektedir.

İndisler:

- b, l : Sırasıyla transformatör merkezi ve hat indisleri,
- i : Bara indisi. 0 olması durumu bara-1’i, 1 olması durumu bara-2’yi temsil etmektedir,
- c : N-1 analizi kapsamında uygulanan kısıt indisi.

Listeler:

- N_b : TM b’de bulunan hat listesi,
- K : Kuplaj kesici bulunan TM listesi,
- N_c : Kısıt uygulanacak hat listesi.

Parametreler:

- B : Güç sisteminde bulunan toplam transformatör merkezi sayısı,
- N : Toplam hat sayısı,
- P_l^{Ter} : İletim hattı l ’nin termik kapasitesi, İletim hattı l üzerinden geçebilecek maksimum aktif güç akışı (iletim hattının röleler vasıtasıyla servis harici edileceği sınır değer),
- R_l : l iletim hattının direnci,
- τ : Güç sisteminde bulunan kesicilerin açma yapabileceği maksimum kısa devre akımı, Kısa devre akım sınırını aşan akımların oluştuğu bara dağılımlarının amaç fonksiyonundaki maliyetini yükseltmek için kullanılan sabit bir katsayı,
- m : Kısıt analizinde kullanılan sabit bir sayı,
- n : Büyük bir sayı,
- TD : Henüz bara dağılımı yapılmadan önce mevcut güç sisteminde yapılan N-1 analizi performansı.

Değişkenler:

- β_l : TM’de bulunan bir hat fiderinin hangi baraya bağlı olduğunu temsil eden ikili kod,
- β_{gd} : TM’de bulunan bir üretim veya tüketim fiderinin hangi baraya bağlı olduğunu temsil eden ikili kod,
- z_b : b . TM’de kuplaj kesicinin açık/kapalı konumunu temsil eden ikili kod,
- $\sigma_{b,i}$: b . TM’nin i . barasında hesaplanan toplam üç faz kısa devre akımı,
- I_l^2 : l . İletim hattından geçen akım miktarı,
- $P_{c,l}$: c . arıza sonrası, l . iletim hattından geçen aktif güç,
- f : Temel durumda Newton Raphson güç akışı sonucu. (Eğer yakınsama problemi olursa ilgili topoloji büyük M sayısı ile cezalandırılmaktadır).

$$\min. f_1 = \sum_{b:1}^B \frac{\sigma_{b,i}}{2m + m * \text{sgn}(\tau - \sigma_{b,i})}, \forall i, (A) \quad (1)$$

$$\min. f_2 = \sum_{l:1}^N I_l^2 R_l, (MW) \quad (2)$$

BBO probleminin amaç fonksiyonları Eşitlik (1) ve (2)'de verilmiştir. Eşitlik (1)'de verilen $\sigma_{b,i}$ terimi i. barada hesaplanan toplam üç faz kısa devre akımını temsil etmektedir [45]. Eşitlik (1)'de güç sisteminde bulunan baralarda hesaplanan üç faz kısa devre akımlarının önceden belirlenmiş sınır değeri aşması durumunda f_1 fonksiyonunun değeri yükselmektedir. Bu nedenle f_1 fonksiyonunu minimize edebilmek için baralarda hesaplanan toplam kısa devre akımının belirlenen sınır değeri geçmemesi gerekir. Belirtmek gerekir ki diğer kısa devre arıza türlerinin de amaç fonksiyonuna aynı şekilde dahil edilmesi mümkündür. Sonuç olarak kısa devre akımlarını belirlenmiş sınır değerinin altında tutarak kısa devre amaç fonksiyonu minimize edilmeye çalışılır. Diğer taraftan Eşitlik (2)'de iletim hatlarındaki aktif güç kayıpları toplamının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Belirtilen bu amaç fonksiyonları aşağıda verilen kısıtlar çerçevesinde değerlendirilmektedir.

Kısıtlar;

$$N_b \geq 4 \rightarrow z_b \in K, \forall b \quad (3)$$

$$\rho = 2 \leq \sum_{l:1}^{N_b} \beta_l \leq N_b - 2, \forall b \quad (4)$$

$$(\rho \rightarrow z_b = 0) \wedge (\neg \rho \rightarrow z_b = 1), \forall b \quad (5)$$

$$\varepsilon = \sum_{l:1}^N \frac{P_l}{P_l^{Ter}} x \frac{100}{n_l} + \sum_{c:1}^{N_c} \sum_{l:1}^N \frac{P_{c,l}}{P_l^{Max}} x \frac{100}{n_l}, l \neq c \quad (6)$$

$$(P_l < P_l^{Ter} \rightarrow n_l = n) \wedge (P_l \geq P_l^{Ter} \rightarrow n_l = 1) \quad (7)$$

$$(P_{c,l} < P_l^{Max} \rightarrow n_l = n) \wedge (P_{c,l} \geq P_l^{Max} \rightarrow n_l = 1) \quad (8)$$

$$\varepsilon \leq TD \quad (9)$$

$$(f > 0 \rightarrow f_1, f_2 = M) \wedge (f = 0 \rightarrow f_1, f_2) \quad (10)$$

Bir TM'de bara bölme işleminin uygulanabilmesi için ilgili TM'nin 2 baraya, 1 kuplaj kesiciye ve en az 4 iletim hattına sahip olması gerekir. Bara bölme işleminden sonra her barada en az iki hat bulunmalı ki sistemin arz güvenliği sürdürülebilir. Aksi takdirde bir baraya sadece 1 iletim hattı bağlanacak ve ilgili barada bulunan üretim ve tüketim birimleri radyal kalacaktır. Eşitlik (3) te verilen kısıt ile bara bölmeye uygun TM'lerin seçilmesi sağlanmaktadır.

Eşitlik (4) ve (5)'te bara bölme işleminin gerçekleşmesi için gerekli şartlar temin edilmiştir. Bara bölme işleminin gerçekleşmesi için her iki barada da en az iki iletim hattının bulunması gerekmektedir ve bu durum Eşitlik (4) ile ifade edilmiştir. Eğer baralarda yeterince iletim hattı bulunuyorsa ilgili TM'de bulunan kuplaj kesici z_b servis harici edilmektedir. Aksi halde kuplaj kesici serviste tutularak ilgili bara dağılımı yapılsa bile topolojik değişime neden olmayacaktır. Diğer taraftan bir barada iletim hattı bulunmadan üretim veya tüketim birimi bağlanırsa bu eşitlikler sayesinde kuplaj kesici kapalı kalacağı için topolojik bir probleme yol açmamaktadır.

Eşitlik (6-8)'de iletim sistemin arz güvenliği performansı (N-1) statik açıdan değerlendirilmektedir. Temel durumda iletim hatlarının termik kapasitelerinin (P_l^{Ter}) üzerinde çalıştırılması uygun değildir. Ancak N-1 durumunda iletim hatlarının geçici süreyle termik sınır üzerinde yüklenmesi mümkündür. Dolayısıyla N-1 durumunda iletim hattından geçen yük, termik sınırın üzerinde olsa bile P_l^{Max} değerini aşmıyorsa, sistemin arz

güvenliğinin olduğu kabul edilir. Ancak ε performans değerinde temel durum yüklenmelerinin genel skora etkisi Eşitlik (6)'nın birinci bölümünde dahil edilmiştir. Diğer yandan N-1 durumunda bir iletim hattından geçen yük maksimum kabul edilebilir sınırı aşıyorsa, ilgili sistemde arz güvenliği olmadığı kabul edilir ve bu durum Eşitlik (6)'nın ikinci bölümünde yansıtılmıştır. Eşitlik (7) ve (8)'de iletim hatlarından geçen yükün temel durumda termik sınırın üzerinde olması ve N-1 durumunda maksimum sınırı aşması halinde n_l değişkeni 1'e eşitlenerek ε performans değerinin yükseltilmesi sağlanmaktadır. Dolayısıyla ε performans değerinin küçültülebilmesi için iletim hatlarındaki yüklenmelerin sınır değeri aşmayacak şekilde azaltılması gerekmektedir.

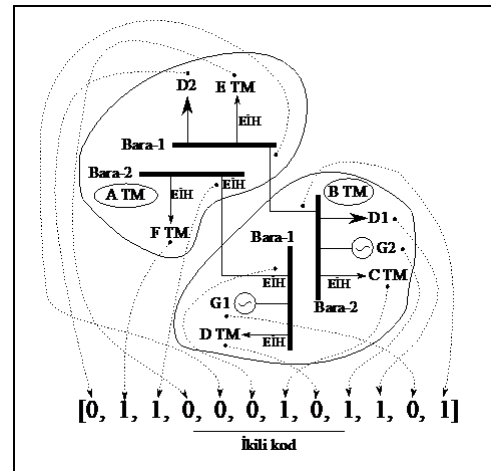
Çalışma kapsamında sistemin N-1 performansı probleme kısıt olarak eklenmiştir ve doğru akım güç akışı tekniğinden faydalanılmıştır. Güç sisteminde aktif güç kayıpları ile kısa devre akımları arasında bir denge noktası belirlemeye çalışırken aynı zamanda N-1 güvenliğinin sürdürülmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda Eşitlik (9) ile bara dağılımı yapıldıktan sonra hesaplanan N-1 performansının ilgili güç sisteminde henüz topolojik değişim yapılmadan önce gerçekleştirilen N-1 performansından (TD) küçük veya eşit olması amaçlanmaktadır. Bu sayede kısa devre akımları ve aktif güç kayıpları sınırlandırılırken mevcut N-1 güvenlik seviyesinin de sürdürülmesi sağlanmaktadır.

Topoloji değişiminden sonra sistemde birbiriyle elektriksel bağlantısı tamamen kopmuş ada bölgeler oluşması durumunda temel durum güç akışı yakınsamayacaktır. Bu durum aynı zamanda reaktif güç rezervinin yeterli olmayacağı bara dağılımları için de geçerlidir. Bu tür topolojileri büyük bir sayı ile cezalandırmak amacıyla Eşitlik (10)'da verilen denklem kurulmuştur. Buna göre temel durum güç akışı başarısız olursa amaç fonksiyonlarına büyük M sayısı atanmaktadır.

2.2 BBO probleminde ikili kod mimarisi

BBO probleminin çözümünde elde edilmek istenen karar değişkenleri ikili kod ile temsil edilmektedir. TM'lerde bulunan fiderlerin hangi baraya bağlanacağı, ilgili fideri temsil eden ikili kodun 0 veya 1 değerlerini almasıyla belirlenir. Sezgi-üstü algoritma bu ikili kodları değiştirerek daha iyi bir bara dağılımını keşfetmeye çalışmaktadır.

Şekil 2'de A ve B TM'lerin bara dağılımlarını temsil eden ikili kod mimarisi gösterilmektedir.



Şekil 2. Bara dağılımına karşılık gelen ikili kod mimarisi.

Figure 2. Binary code design representing bus layout.

İkili kod mimarisinde A TM'nin fider sırası "D2" yükü, "A-F" Enerji İletim Hattı (EİH), "A-B" EİH, "A-E" EİH ve "A-B" EİH şeklinde oluşturulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi ilgili fiderin ikili kod mimarisindeki konumu bulunduğu baraya göre değişmemektedir. Örneğin ikili kod mimarisinin birinci ikili kodu 0 yerine 1 olursa, A TM'deki "D2" yükü bara-1'den bara-2'ye aktarılacaktır. Benzer şekilde, 7. ikili kod 1'den 0'a dönüştürülürse B TM'nin "B-C" hat fideri bara-2'den bara-1'e alınacaktır.

Açıklanan ikili kod mimarisi NSGA-II algoritmasının popülasyonunda bulunan her bir bireyin yapısını oluşturmaktadır. Bir bireyin uzunluğunu karar değişkeni miktarı belirlemektedir. Yukarıda verilen örnek gösterimde bireyin uzunluğu 12'dir. Eğer TM'lerin toplam 100 fideri bulunursa, bir bireyin uzunluğu da 100 olmaktadır. Çok amaçlı sezgi-üstü algortmada bulunan bu bireylerin ikili kod bilgileri her yenilemede değiştirilerek, kısıtlara uyması şartıyla amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi hedeflenmektedir.

3 Kısıtlı NSGA-II algoritması (Constrained non-dominated sorted genetic algorithm-II)

Çok amaçlı optimizasyon problemleri uygulama basitliği nedeniyle sıklıkla toplama ve ϵ -kısıtlama yöntemleriyle çözümlenmektedir[43],[44]. Toplama yönteminde problemdeki her bir amaç çeşitli katsayı ve matematiksel operatörler kullanılarak toplanır. Uygulaması oldukça basit olmasına rağmen amaçlara atanan katsayıları uygun şekilde ayarlamak oldukça zordur. Diğer taraftan, ϵ -kısıtlama yönteminde amaçlar kabul edilebilir sapmalara imkân verilerek kısıta dönüştürülür ve yalnızca en önemli görülen amacın amaç fonksiyonunda kalması sağlanır. Burada da hangi amacın daha önemli olduğunu belirlemek ve kabul edilebilir sınır değerler tanımlamak kolay değildir. Ancak bu zorlukların yanı sıra her iki yöntemin en önemli dezavantajı yalnızca bir adet çözüm üretmesidir. Bu yöntemler her çalıştırıldığında kabul edilebilir çözüm kümesinin yalnızca bir noktasına temas edecektir ve muhtemelen her çalıştırmada farklı bir çözüm sunacaktır.

Pareto-optimal kavramı çok amaçlı problemlerde sıklıkla kullanılan bir diğer yaklaşımdır. Pareto tekniğinde uygulanan yöntem iş birliği ve ortak karar alma mekanizmasıdır. Örneğin bir bara dağılımı kısa devre akımlarını azaltıyorken aktif güç kayıplarını da en azından yükseltmiyorsa, bu topoloji kabul edilebilir bir iyileşme sağlamış demektir. Pareto tekniğinin toplama ve ϵ -kısıtlama yaklaşımlarına göre önemli avantajları bulunmaktadır. Pareto-optimal sonuçta bütün amaçlar için birbirini bastıramamış bir çıktı üretilerek uygulanması mümkün olan seçenekler kümesi elde edilir. Böylece kullanıcı bu sonuç kümesinin içinden ihtiyacını karşılayan çözümü çekebilmektedir. Ayrıca amaçların kısıta çevrilmesi veya toplanması söz konusu olmadığı için hassas katsayı ayarlamalarına ihtiyaç kalmamaktadır.

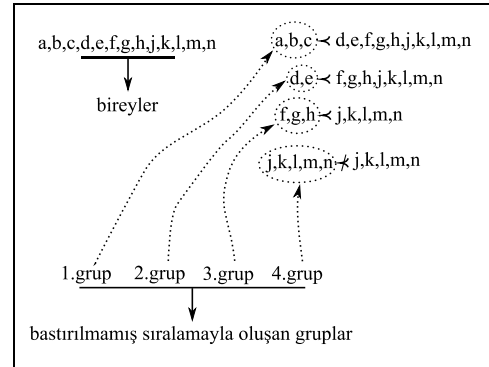
NSGA-II algoritması pareto-optimal tekniğine uygun olarak tasarlanmış bir sezgi-üstü algortmadır. Hızlı bastırılmamış sıralama (fast non-dominated sort) ve yığılma mesafesi (crowding distance) algoritma içeriğinde sunulan etkili tasarımlardır. Bastırılmamış sıralama işlemiyle çözüm kümesi içerisinde birbirine üstün gelemeyen bireylerle bastırılmamış bir grup veya cephe (front) elde edilir. Örneğin bastırılmamış grup içerisinde bulunan bireylerden birisi kısa devre açısından daha iyiyken diğeri güç kayıpları açısından daha iyi olabilir. Bastırılmamış gruplar içerisindeki çeşitliliği sürdürmek amacıyla da yığılma mesafesi tekniği geliştirilmiştir. Yeni bir

popülasyon oluşturulurken aynı grupta bulunan bastırılmamış bireyler arasından bir seçim yapılacak ise yığılma oluşmayan bölgedeki bireylerin sonraki iterasyonlara aktarılmasıyla genetik çeşitlilik sürdürülmüş olmaktadır.

3.1 Hızlı bastırılmamış sıralama (Fast non-dominated sort)

Amaç fonksiyonunda birbirine karşı üstün gelemeyen çözümlerin aynı gruba aktarıldığı sıralama mantığına bastırılmamış sıralama denir. Bu sıralama yaklaşımında iş birliği kavramı işletilmektedir.

Şekil 3'te bastırılmamış sıralama işleyişinin nasıl gerçekleştiği gösterilmektedir. Amaç fonksiyonlarını minimize etmek için oluşturulmuş a, b, c, d, e, f, g, h, j, k, l, m, n bireylerinin performansları birbirleriyle karşılaştırılarak bastırılmamış gruplar oluşturulmaktadır. Örneğin "a, b, c" bireyleri birbirlerini bastıramazken popülasyonun diğer bireylerini bastırarak 1. grubu oluşturmuştur. Şunu belirtmek gerekir, bir bireyin performansı minimize edilmek istenen amaçlardan en az biri için diğerinden daha iyiyse ve diğer amaçlarda da en azından daha kötü değilse, ilgili birey diğerine baskın gelmiş demektir. Ancak bir birey bir amaçta diğerinden daha iyiyken başka bir amaçta daha kötüyse, bu iki birey birbirini bastıramamış demektir. Aynı mantık çerçevesinde "d, e" bireyleri 2. grubu, "f, g, h" bireyleri 3. grubu ve "j, k, l, m, n" bireyleri 4. grubu oluşturarak sıralanmıştır. Bu sıralamalar sonraki bireylerin oluşturulması esnasında kullanılarak elitist bir işleyiş sağlanmaktadır.



Şekil 3. Hızlı bastırılmamış sıralama örneği.

Figure 3. An example of the fast non-dominated sort.

Şekil 4'te verilen hızlı bastırılmamış sıralama sözde-kodu incelendiğinde öncelikle 1.grubun (cephenin) oluşturulduğu ve bu esnada popülasyonda bulunan bireylerle ilgili bastırılma verilerinin tutulduğu görülmektedir.

Daha sonra elde edilen baskılama verileri kullanılarak diğer grupların bireyleri oluşturulmaktadır. Hızlı bastırılmamış sıralama ile ilgili temel hususlar aşağıda verildiği gibi açıklanabilir (parantez içinde verilen numaralar sözde-kod içinde verilen satır numaralarını temsil etmektedir):

- Birinci gruba dahil edilecek bir bireyin, popülasyonda bulunan başka bir birey tarafından bastırılmamış olması gerekir. Birinci grubu birbirini bastıramamış ve başka bir birey tarafından da bastırılmamış bireyler oluşturmaktadır,
- 1.grup bireyleri 1-19.satırlar arasında verilen yaklaşımla elde edilir. 6-19. Satırlar arasında popülasyonda bulunan tüm bireyler birbirleriyle karşılaştırılır,
- Birinci grup oluşturulurken bir bireyin hangi bireyleri bastırabildiği liste halinde tutulur (11.satır). Ayrıca bir bireyin kaç kere bastırıldığı bilgisi de kayda geçirilir

(14.satır). Bu bilgiler diğer grupları oluşturmak için kullanılır. 15-19. satırlar arasında bastırılma sayısı 0 olan bireylerle 1. grup oluşturulur,

- Diğer grupların oluşturulması aşamasında (21. satır ile başlar) birinci grubu oluşturan bireylerin bastırıldığı bireyler arasında başka bir birey tarafından daha az sayıda bastırılmış olanlar ikinci grubu oluşturur. Bu durumu Şekil 3'te verdiğimiz örnek üzerinden açıklayalım. Örnekte 1. grubu a,b ve c bireyleri oluşturmaktadır. Yani 24. satırdaki for döngüsü teker teker a,b ve c'yi seçecektir. Diyelim ki a seçilmiş olsun, bu durumda 25. satırda bulunan ikinci for döngüsüne girilir ki bu döngüde a bireyinin bastırıldığı bireyleri teker teker seçecektir. Aslında a bireyi popülasyonda 1.gruba giremeyen tüm bireyleri bastırmıştır ve bu nedenle b ve c dışındaki tüm bireyler ikinci grubu oluşturmaya adaydır. Ancak 26. satıra dikkat edilirse her döngüde sırası gelen bireyin 14. satır ile oluşturulmuş bastırılma sayısı 1 azaltılmaktadır. Başka bir ifadeyle 24.satır ile başlayan for döngüsü bittiğinde (a,b ve c seçilerek 3 döngü gerçekleşecektir) 1.gruba dahil olmayan diğer bireylerin bastırılma sayıları 3'er puan azaltılmış olacaktır. Şekil 3'teki örnekte a, b ve c bireyleri, d ve e bireylerini bastırmıştır ancak d ve e bireyleri hem birbirlerini bastıramamış hem de başka bir birey tarafından bastırılmamıştır. Başka bir ifadeyle d ve e bireylerinin toplam bastırılma sayıları 3'tür. Dolayısıyla 1. grup ile başlatılan döngü bittiğinde d ve e bireylerinin bastırılma sayısı 3 puan azalacağı için 0'a düşecektir. Sonuç olarak d ve e bireyleri bastırılma sayıları 0'a düştüğü için 2. gruba dahil edilmiş olacaktır,
- İkinci grup oluşturulduktan sonra 24. satırdaki for döngüsü bu sefer 2. grup elemanlarına göre döndürülmektedir. 1.grupta yapılan işlemlerin aynısı yapılarak 3. grup üyeleri elde edilmektedir ve tüm gruplar oluşuncaya kadar, başka bir ifadeyle popülasyondaki her bireyin bastırılma sayısı 0'a düşene kadar bu işlemler devam etmektedir.

```

1 gruplar = [[]] → Grupların (cephelerin) kayıt edileceği liste
2 for birey in P: → P:Popülasyonda bulunan tüm bireyler
3 #Bireyin bastırıldığı çözümler liste olarak tutulur
4 birey.bastırılmış_çözüm = []
5 birey.say = 0 → Bireyi bastırılan çözümlerin sayısı
6 for diğer_birey in range(P):
7     if birey < diğer_birey:
8         #Eğer birey diğer_birey çözümünü bastırırsa
9         #Bireyin bastırıldığı çözümler listesine /
10        #diğer_birey çözümünü ekle
11        birey.bastırılmış_çözüm.append(q)
12        elif diğer_birey < birey:
13            #birey çözümünü bastırılan çözüm sayısını 1 artır
14            birey.say = birey.say + 1
15        if birey.say = 0:
16            #Eğer bireyi bastırabilen başka bir çözüm yoksa /
17            #birey birinci gruba (cepheye) dahil edilir.
18            birey.sıra = 1
19            gruplar[1].append(birey)
20        i = 1 → Grup (cephce) sayısı
21        while len(gruplar[i]) ≠ 0:
22            #Bir sonraki grup (cephce) üyelerinin saklanacağı liste
23            diğer_gruplar = []
24            for birey in gruplar[i]:
25                for diğer_birey in birey.bastırılmış_çözüm:
26                    diğer_birey.say = diğer_birey.say - 1
27                    if diğer_birey.say = 0:
28                        #Bu birey bir sonraki grubun (cephenin) üyesidir
29                        diğer_birey.sıra = i+1
30                        diğer_gruplar.append(diğer_birey)
31            i = i + 1
32            gruplar.append(diğer_gruplar)

```

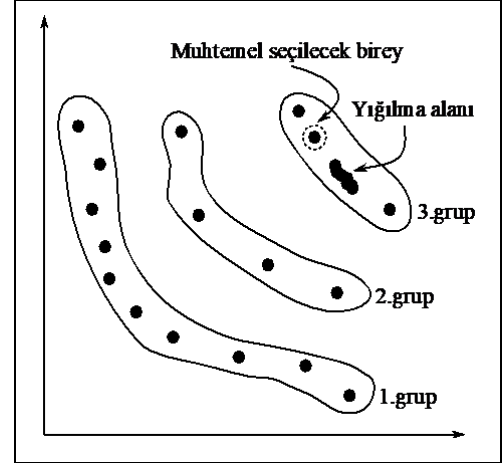
Şekil 4. Hızlı bastırılmamış sıralama sözde-kodu.
Figure 4. Pseudo-code of fast non-dominated sort.

3.2 Yığılma mesafesi (Crowding distance)

Genetik Algoritmanın çalışma düzeninde güçlü olan bireyler sonraki jenerasyonların üretilmesinde daha baskın karakteristik göstermektedir. Seçim prosedüründe güçlü olan bireyler, başka bir ifadeyle amaç fonksiyonu daha düşük olanlar, sonraki nesilleri oluşturmada başroldeyir. NSGA-II'de seçim prosedürü grup sıralamasına göre kolaylıkla yapılabilir. Ancak, aynı grupta bulunan iki bireyden birini seçmek söz konusu olursa, bu durumda yığılma mesafesi kavramı devreye girmektedir.

Şekil 3'te verilen tasarımı kullanarak yığılma mesafesinin çalışma mantığı daha net anlaşılabilir. İterasyon sonunda (seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri tamamlandıktan sonra) 1. gruba "o" bireyinin eklendiğini varsayalım. Yeni popülasyonda 1., 2. ve 3. grupların bulunacağı aşıkardır. Ancak yeni bir üye girdiği için 4. grubun tamamının yeni popülasyonda bulunması mümkün değildir. Böyle bir durumda 4. grupta bulunan üyelerden hangilerinin yeni popülasyonda bulunacağı yığılma mesafesiyle belirlenmektedir. Popülasyondaki çeşitliliği sürdürmek amacıyla yığılmanın olduğu tarafta bulunmayan bireylerin seçilmesi sağlanmaktadır. Yığılma mesafesi hesaplanırken grup içerisindeki birinci ve sonuncu üyenin doğrudan yığılma bölgesine uzak olduğu kabul edilmektedir.

Şekil 5'te bastırılmamış gruplar ve yığılma alanı gösterilmektedir. Görüldüğü gibi 1. grup üyelerinin hiç birisi birbirini bastıramazken diğer grupları tamamen bastırmaktadır. Aynı durum 2. ve 3. grup için de geçerlidir. Sonraki popülasyonlar 1. gruptan başlanarak oluşturulur. Ancak yeni jenerasyonun nüfusu 3. grupta bulunan üyelerin tamamını almaya yetmiyorsa yığılma alanı dışında kalan bireylerin alınması tercih edilmektedir. Bu yaklaşım yoluyla popülasyon çeşitliliği sürdürülmektedir.



Şekil 5. Pareto-gruplar ve yığılma alanı.

Figure 5. Pareto-fronts and crowded area.

Yığılma mesafesinin hesaplanma mantığı Şekil 6'da verilen sözde-kod ile açıklanmaktadır. Bir grupta bulunan elemanların yığılma mesafesi, optimize edilmeye çalışılan tüm amaçlar dikkate alınarak yapılmaktadır. Örneğin sözde-kod üzerinde gösterilen m ifadesi toplam amaç sayısını ifade etmekte olup, bu çalışma kapsamında m'in değeri 2'dir (kısa devre ve güç kaybı). Başlangıçta yığılma mesafesi hesaplanacak gruptaki tüm elemanların mesafeleri sıfırlanır. Daha sonra herbir amaç için gruptaki elemanlar performansına göre sıralanır. Sıralama sonrasında grubun birinci ve sonuncu elemanına büyük bir sayı

atanarak yığılma mesafesi hesabının dışında tutulur. Son olarak geriye kalan grup elemanlarının tamamı için yığılma mesafesi hesaplanır. Seçim sürecinde sonraki jenerasyonu oluşturmak için seçilecek bireyler aynı grupta (cephede) ise yığılma mesafesi daha yüksek olanlar seçilmektedir.

```

u = len(F) → u: F. gruptaki toplam çözüm sayısı.
for i in range(u):
    F.mesafe[i] = 0 → Başlangıçta mesafeler sıfırlanır.
m = Toplam Amaç Sayısı
for i in range(m):
    #Her bir amaç için grup elemanları sıralanır.
    F = sort(F.amaç[m])
    #Gruptaki birinci ve sonuncu elemana büyük sayı atanır.
    F.mesafe[1] = F.mesafe[u] = ∞
    #Diğer grup elemanları için yığılma mesafesi hesaplanır.
    fmax = max(F.amaç[m])
    fmin = min(F.amaç[m])
    for j in range(u-1):
        F.mesafe[j] = F.mesafe[j+1] + (F.amaç[j+1]-F.amaç[j-1]) / (fmax-fmin)
    
```

Şekil 6. Yığılma mesafesi sözde-kodu.

Figure 6. Pseudo-code of crowding distance.

3.3 Kısıt entegrasyonu

Kısıt bulunan tek amaçlı optimizasyon problemlerinde kısıt şartlarını sağlamayan sonuçların derhal elenmesi söz konusu değildir. Çünkü hem kısıtlı optimizasyon problemlerinde elde edilmek istenen sonucun kısıt sınırına yakın olması muhtemeldir hem de çözüm uzayında kısıt bariyerlerini kısıtlı sonuçları dikkate almadan geçmek pek mümkün değildir.

Tek amaçlı problemlerde kısıtlarla başa çıkabilmek amacıyla kullanılan basit ama etkili bir yöntemin üç karar durumu söz konusudur[25];

- Eğer çözümler kısıtları sağlıyorsa amaç fonksiyonu açısından daha iyi olan çözümü seç,
- Eğer çözümler arasında kısıtları sağlamayanlar varsa kısıtları sağlayan uygun çözümleri seç,
- Eğer çözümler kısıtları ihlal ediyorsa daha az ihlalde bulunan çözümü seç.

Çok amaçlı optimizasyon probleminde benzer mantığa dayanarak kısıtlarla baş etmek mümkündür. Buna göre çok amaçlı problemlerde uygulanacak üç karar durumu aşağıda verilmiştir[25];

- Eğer çözümler kısıtları sağlıyorsa baskın gelen çözümü seç,
- Kısıtları sağlamayan çözümlerin olması durumunda kısıtları sağlayan çözümü seç,
- Çözümlerde kısıt ihlali söz konusuysa daha az ihlal edeni seç.

Görüldüğü üzere tek amaçlı ile çok amaçlı optimizasyon problemlerinde kısıtlarla baş ederken kullanılan yöntemdeki tek fark baskın gelme kavramıdır.

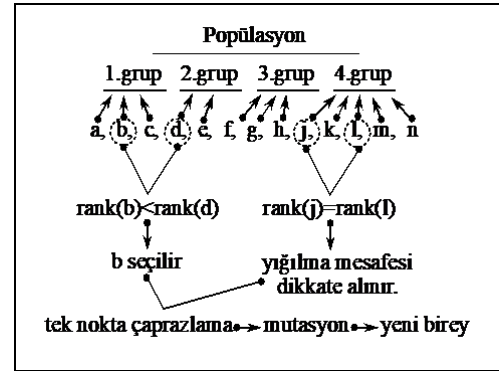
3.4 Genetik operatörler

Sezgi-üstü algoritmaların kullandığı iki temel davranış vardır: Birincisi, çözüm uzayında henüz araştırılmamış bölgeleri bulmak amacıyla kullanılan keşfetme safhasıyken; ikincisi, umut vadeden bölgelerin yerel minimum noktalarını bulmak için oluşturulan faydalanma safhasıdır. Evrim teorisinden ilham alan GA, keşfetme ve faydalanma safhalarını işletmek için doğal seçim kavramını, çaprazlama ve mutasyon işlemlerini kullanmaktadır. Doğal seçim ve çaprazlama operatörleriyle

mevcut bölgelerin yerel optimalleri elde edilmeye çalışılırken, mutasyon yaklaşımıyla henüz bulunmamış bölgelerin keşfedilmesi hedeflenir.

Mevcut popülasyonu kullanarak yeni jenerasyonu oluştururken seçme, çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanır. Bu çalışma kapsamında seçim yöntemi olarak turnuva yaklaşımı kullanılmıştır. Yeni jenerasyonu oluştururken bir grup içerisinde uygun olan bireyi seçebilmek için kullanılan yığılma mesafesi yöntemi seçim prosedüründe de kullanılmaktadır.

Şekil 7’de turnuva yönteminin gereği olarak popülasyon içerisinde rastgele seçilen bireylerin karşılaştırılması örneklendirilmiştir. Pareto-Gruplar arasında 1. grupta bulunan “b” bireyi ile 2. grupta bulunan “d” bireyi karşılaştırıldığında sıralaması daha düşük olduğu için “b” bireyi seçilir. Ancak aynı grupta bulunan iki bireyin karşılaştırılması durumunda bireylerin yığılma alanına olan uzaklıkları dikkate alınır.



Şekil 7. Seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemi.

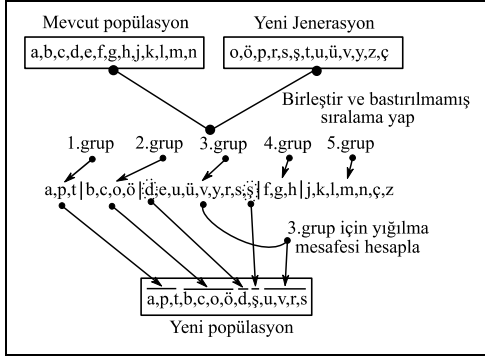
Figure 7. Selection, crossover and mutation operation.

Yığılma yaşanan bölgeye uzak olan birey seçilerek genetik çeşitliliğin sürdürülmesi sağlanır. Çalışmamız kapsamında seçilen bireylere tek nokta çaprazlama tekniği ve mutasyon işlemi uygulanarak yeni birey elde edilir.

3.5 Popülasyon güncelleme

Popülasyon tabanlı sezgisel algoritmalar her yinelemede mevcut popülasyonlarını iyileştirerek değiştirmeyi amaçlar. NSGA-II algoritmasında mevcut popülasyonu güncelleyebilmek için geliştirilmiş birçok bilimsel yaklaşım bulunmaktadır.

Şekil 8’de NSGA-II algoritmasının kullandığı tekniklerin nasıl işlediği gösterilmektedir. Mevcut popülasyona Şekil 7’de gösterilen seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemi uygulanarak yeni bir jenerasyon üretilir. Daha sonra mevcut popülasyon ile yeni üretilen popülasyon birleştirilir. Normalde belirlenen popülasyon boyutunun iki katına sahip yeni bir nesil üretilmiş olur. Bu nesilde Şekil 3’te gösterilen hızlı bastırılmamış sıralama yapılarak Pareto-front dediğimiz gruplar elde edilmektedir. Daha sonra 1. gruptan başlanarak yeni popülasyon oluşturulmaya başlanır. Şekil 8’de verdiğimiz örnekte 1. ve 2. grup üyelerinin tamamı yeni popülasyona eklenir. Ancak 3. grupta bulunan üyelerin tamamını eklemek, popülasyon boyutu açısından mümkün değildir. Böyle bir durumda Şekil 5’te gösterilen yığılma mesafesi kavramı dikkate alınarak 3. grup içerisindeki uygun bireyler yeni popülasyona eklenir. Sonuç olarak mevcut popülasyon değiştirilerek performansı daha iyi olan bireylerin eklendiği yeni popülasyon üretilmiş olmaktadır.

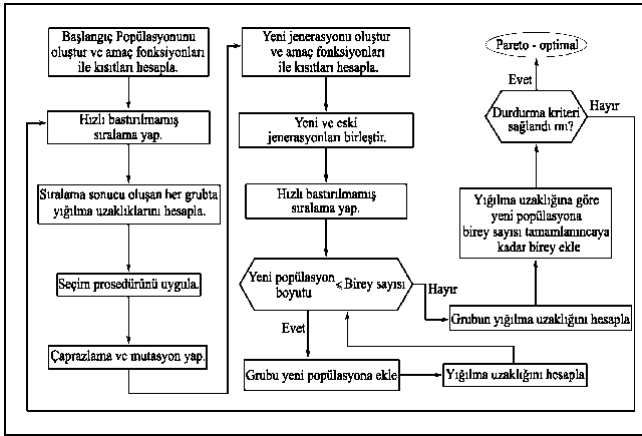


Şekil 8. Popülasyon güncelleme.

Figure 8. Population updating.

3.6 NSGA-II algoritması

Şekil 9'da NSGA-II tekniğinin işleyişini ortaya koyan genel algoritma yapısı gösterilmektedir. Tamamen rastgele bir düzenle oluşturulan başlangıç popülasyonu amaç fonksiyonları ve kısıtlar açısından değerlendirilir. Sonra her yinelemede tekrar edilmesi gereken ana döngü başlar. Mevcut popülasyona hızlı bastırılmamış sıralama yapılır. Probleminizdeki kısıtlar söz konusu olduğu için hızlı bastırılmamış sıralama yapılırken kısıt entegrasyonu başlığı altında ifade edilen yaklaşım uygulanır. Bastırılmamış sıralamayla elde edilen gruplar içerisindeki bireylerin önem derecesini belirleyebilmek için yığılma mesafeleri hesaplanır. Popülasyondan rastgele seçilen bireyler turnuva yaklaşımı kapsamında grup derecesi ve yığılma mesafesi açısından değerlendirilerek sonraki jenerasyonu oluşturmak üzere çaprazlama ve mutasyon işlemlerine tabi tutulur. Meydana gelen yeni nesil amaç fonksiyonları ve kısıtlar açısından değerlendirilir.



Şekil 9. NSGA-II algoritması.

Figure 9. NSGA-II algorithm.

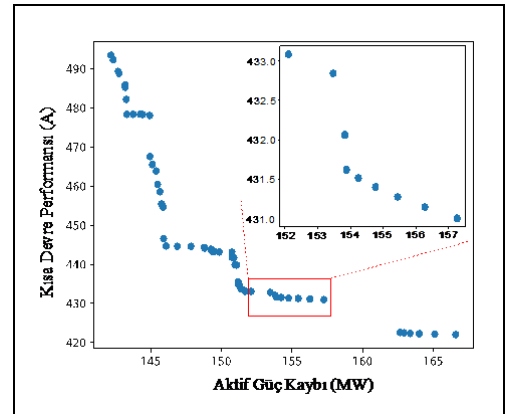
Yeni jenerasyonun oluşmasıyla birlikte algoritma iki adet popülasyona sahip olur ve bu nesilleri birleştirir. Belirlenen popülasyon boyutunun iki katı kadar bir nüfus elde edilmiş olur. Bu büyük popülasyona hızlı bastırılmamış sıralama yapılarak gruplar belirlenir. Yeni popülasyonu oluşturmak için önem derecesine göre 1. sıradan başlanarak gruplar popülasyona eklenir. Eğer gruptaki elemanların tamamının eklendiği durumda popülasyon boyutu aşılabarsa, yığılma mesafesi dikkate alınarak yığılma alanına uzak olan bireylerin yeni popülasyona eklenmesi sağlanır. Durdurma kriteri sağlanana kadar devam eden bu iteratif süreç sonunda Pareto-optimal çözüm elde edilir.

4 Benzetim sonuçları

Bölüm 2'de açıklanan BBO problemi IEEE RTS 96-baralı test sisteminde [45],[46] 3. Bölümde açıklanan kısıtlı NSGA-II tekniğiyle çözülmüştür. Test sisteminde en az 4 iletim hattı bulunan tüm baraların çift baralı olduğu ve bu baralar arasında kuplaj kesicisi bulunduğu varsayılmıştır. Analizlerde 64-bit, 2.60 GHz. ve 16 GB RAM özelliklerine haiz PC kullanılmıştır. Yapılan analizlerde popülasyon boyutu 200, jenerasyon sayısı 1000, çaprazlama oranı 0.8 ve mutasyon oranı 0.02 seçilmiştir. Eşitlik-1'de verilen ifadede yer alan m sabiti ise 400 seçilmiştir. Bu durumda Eşitlik-1'in paydası, i. barada hesaplanan toplam üç-faz kısa devre akımı limit değeri aşmıyorsa $1200(2m+m)$, aşılıyorsa $400(2m-m)$ olacaktır.

BBO problemi iki farklı durumda değerlendirilmiştir. Probleme kısıt olarak eklenen N-1 analizinin Pareto-optimal sonuca etkisini gözlemleyebilmek amacıyla birinci durumda N-1 kısıt probleminden kaldırılırken, ikinci durumda ilgili kısıt eklenmiştir. Problemin çözümünde Python programlama dili ile PSSE (versiyon 35.2) yazılımı kullanılmıştır. NSGA-II yöntemiyle problemin çözüm süresi birinci durumda 22.46 sa. iken ikinci durumda 26.56 sa. olmuştur.

Durum-1: Şekil 10'da N-1 kısıtını dikkate almadan, başka bir ifadeyle, hangi topoloji oluşursa oluşsun arz güvenliği açısından uygun olduğu varsayılan çözüm sonuçları sunulmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde kısa devre akımları ve aktif güç kayıpları arasındaki çıkar çatışması açıkça görülmektedir. Ancak bazı konfigürasyonlarda kısa devre akımlarında kayda değer bir değişim olmamasına rağmen güç kayıplarının yükseldiği görülmektedir. Rakamlarla ifade etmek gerekirse, kısa devre performansı 431.62 A iken aktif güç kayıpları 153.88 MW'tır ve kısa devre performansının 431.00 A'e düşmesiyle güç kayıplarının 157.26 MW'a çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla kısa devre akımları %0.14 oranında azalırken güç kayıpları %2.2 oranında artmaktadır. Bu anlamda analiz sonuçları kısa devre akımları ile güç kayıpları arasında belirlenecek bir denge noktasının sistem yöneticisi açısından önemli faydalar sağlayacağı aşıkardır.



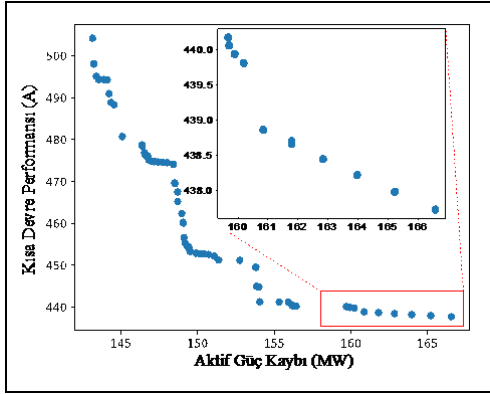
Şekil 10. N-1 kısıtı dikkate alınmadan elde edilen Pareto-optimal küme.

Figure 10. Pareto-optimal front obtained without considering N-1 constraint.

Diğer taraftan, elde edilen Pareto-optimal kümede görülen boşluklara ada durumu önleme kısıtının neden olduğu düşünülmektedir. Eşitlik (10)'da temel durumda aktif güç akışının yakınsamaması durumu, oluşturulan topolojide birbiriyle elektriksel bağlantısı kalmamış adaların oluşma

durumunu da ifade etmektedir. Böyle bir topolojinin oluşması halinde amaç fonksiyonları büyük bir katsayıyla cezalandırıldığı için Pareto-optimal kümedeki ilgili boşlukların oluşmasına neden olduğu öngörülmektedir.

Durum-2: Şekil 11'de N-1 analizinin kısıt olarak eklendiği Pareto-optimal sonuç gösterilmektedir. Bu senaryoda Pareto-optimal kümede görülen boşlukların birinci senaryoda olduğu gibi temel durum güç akışının yakınsamadığı durumların oluşması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir.



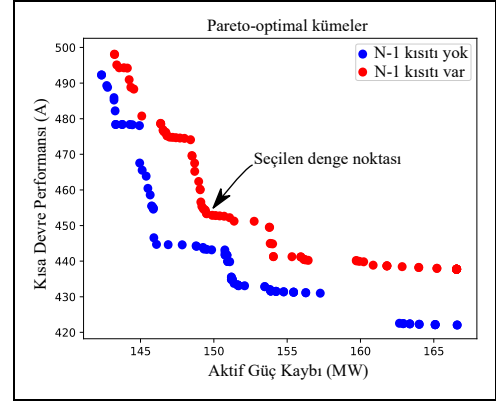
Şekil 11. BBO probleminin Pareto-optimal küme çözümü.

Figure 11. Pareto-optimal front solution of the Bus Splitting Optimization problem.

N-1 analizinin kısıt olarak eklenmediği senaryoda kısa devre performansı 422 A seviyesine kadar indirilebilirken N-1'in dahil edildiği durumda 437 A düzeyine kadar azaltılabilmektedir. Kısa devre performansının 438.86 A ve aktif güç kayıplarının 160.87 MW olduğu topoloji ile kısa devrenin 437.72 A ve kayıpların 166.56 MW çıktığı bara düzeninin karşılaştırılmasıyla, belirli bir seviyeden sonra kısa devre akımlarının önemli ölçüde azalmamasına rağmen aktif güç kayıplarının ciddi şekilde yükseldiği görülmektedir. Dolayısıyla kısa devre akımlarını minimize etmek uğruna aktif güç kayıplarını gereğinden fazla yükseltmenin önüne geçmek amacıyla kullanılan NSGA-II algoritmasının önemi açıkça görülmektedir.

Şekil 12'de çözüm kümesine N-1 analizinin etkisini görebilmek için daha önce açıklanan Şekil 10 ve 11'in birleştirildiği format sunulmaktadır. N-1 kısıtının çözüm kümesini özellikle kısa devre amacı bakımından yukarı doğru taşıdığı açıkça görülmektedir. Kısa devre akımlarını sınırlandırmak amacıyla yapılan bara bölme işlemlerinin arz güvenliğini tehlikeye sokması nedeniyle N-1 kısıtının dikkate alındığı senaryoda nispeten daha sınırlı iyileştirmelerin elde edildiği görülmektedir.

Pareto-optimal çözüm kümesinde iletim sistemi operatörünün ihtiyacını karşılayan konfigürasyonu seçebilme esnekliği bulunmaktadır. Eğer kısa devre akımları sistemde bulunan kesicilerin akım kesme kapasitesinin altına çekilmişse, güç kayıplarını daha fazla yükseltmemek adına ilgili bölgedeki bir çözümün seçilmesi gerekir. Örneğin, RTS 96-baralı test sisteminde herhangi bir bara dağılımı yapılmışken baralarda hesaplanan en büyük 3 faz kısa devre akımı 18.39 kA'dır. Bu test sisteminde izin verilebilir kısa devre akım sınırının 15 kA olduğunu varsayalım. Pareto-optimal kümede kısa devre performansı bu sınır değerinin altında olan topolojilerin tamamı kullanılmak üzere seçilebilir.



Şekil 12. Pareto-optimal çözümlerin N-1 kısıtının olması ve olmaması durumlarına göre karşılaştırılması.

Figure 12. The comparison of the Pareto-optimal solutions according to whether being N-1 constraint.

Bu doğrultuda güç kayıplarını da dikkate alacak olursak iki amaç arasındaki bir denge noktasından çözüm seçmenin makul olacağı aşikardır. Elde edilen Pareto-optimal kümenin denge noktasından seçilmiş bir bara dağılımı örneği Şekil 13'te gösterilmektedir. Şekil-13 incelendiğinde "115", "123", "220", "315", "316", "318", "320" ve "321" No.lu trafo merkezlerinde fiderlerin uygun baralara dağıtılarak baralar arasında bulunan kuplaj kesicilerin servis harici edildiği görülmektedir. Örneğin "115" No.lu trafo merkezinde Bara-1'e "116" ve "121" No.lu iletim hattı fiderleri, 155 MW'lık bir üretim fideri ve 348.7 MW'lık bir tüketim fideri verilirken, Bara-2'ye "121" ve "124" No.lu hat fiderleri ile 5 adet 12 MW'lık üretim fideri bağlanmıştır. Şekil 13'te gösterdiğimiz ve detaylarını açıkladığımız konfigürasyonda, baralarda hesaplanan en büyük kısa devre akımı 14.98 kA'dır. Bu noktada hesaplanan kısa devre performansı 454.91 A iken aktif güç kayıpları 149.36 MW'tır. Şekil 12 incelendiğinde kısa devre akımlarını sınırlandırırken aktif güç kayıplarının 165 MW'ı aşabileceği görülmektedir. Dolayısıyla kısa devre akımlarını yeterince sınırlandırırken aktif güç kayıplarını da dikkate alınmanın önemi ortaya çıkmaktadır.

BBO probleminde kısıt olarak kullanılan N-1 performansı da İSO'ların dikkat ettiği önemli bir göstergedir. Tablo 1'de RTS 96-baralı test sisteminde bara düzeni yapılmadan önce meydana gelen sistem kısıtları gösterilmektedir. Örneğin "123" ve "217" No.lu baralar arasında bulunan 200 MVA taşıma kapasitesine sahip iletim hattında herhangi bir arıza meydana gelmeden önceki temel durumda gerçekleşen güç akışı "217" No.lu baradan "123" No.lu baraya doğru 109 MW'tır. Ancak "121" ve "325" No.lu baralar arasında bulunan EİH'nin herhangi bir nedenle servis harici olması durumunda "123-217" No.lu EİH'nin "123" No.lu baradan "217" No.lu baraya doğru 218.2 MW yükleneceği görülmektedir. "123-217" No.lu EİH için bu yüklenme oranı termik yüklenme sınırının %109.1'ine denk gelmektedir. Bu noktada tekrar belirtmekte fayda var ki doğru akım güç akışı eşitlikleri kullanıldığı için ilgili EİH'den geçen reaktif güç miktarı hesaplanmamıştır.

Çalışmamız kapsamında BBO probleminin çözümünden elde edilen konfigürasyonun N-1 performansının temel durumda elde edilen performanstan daha iyi olması amaçlanmıştır. Tablo 2'de Şekil 13'te gösterilen bara dağılımının N-1 performansı gösterilmektedir. Tablo 2 incelendiğinde kısıt sayısı azaltılarak N-1 performansının iyileştirildiği görülmektedir.

Tablo 1. Bara bölme optimizasyonu yapılmadan önce RTS 96-baralı test sisteminde N-1 performansı.

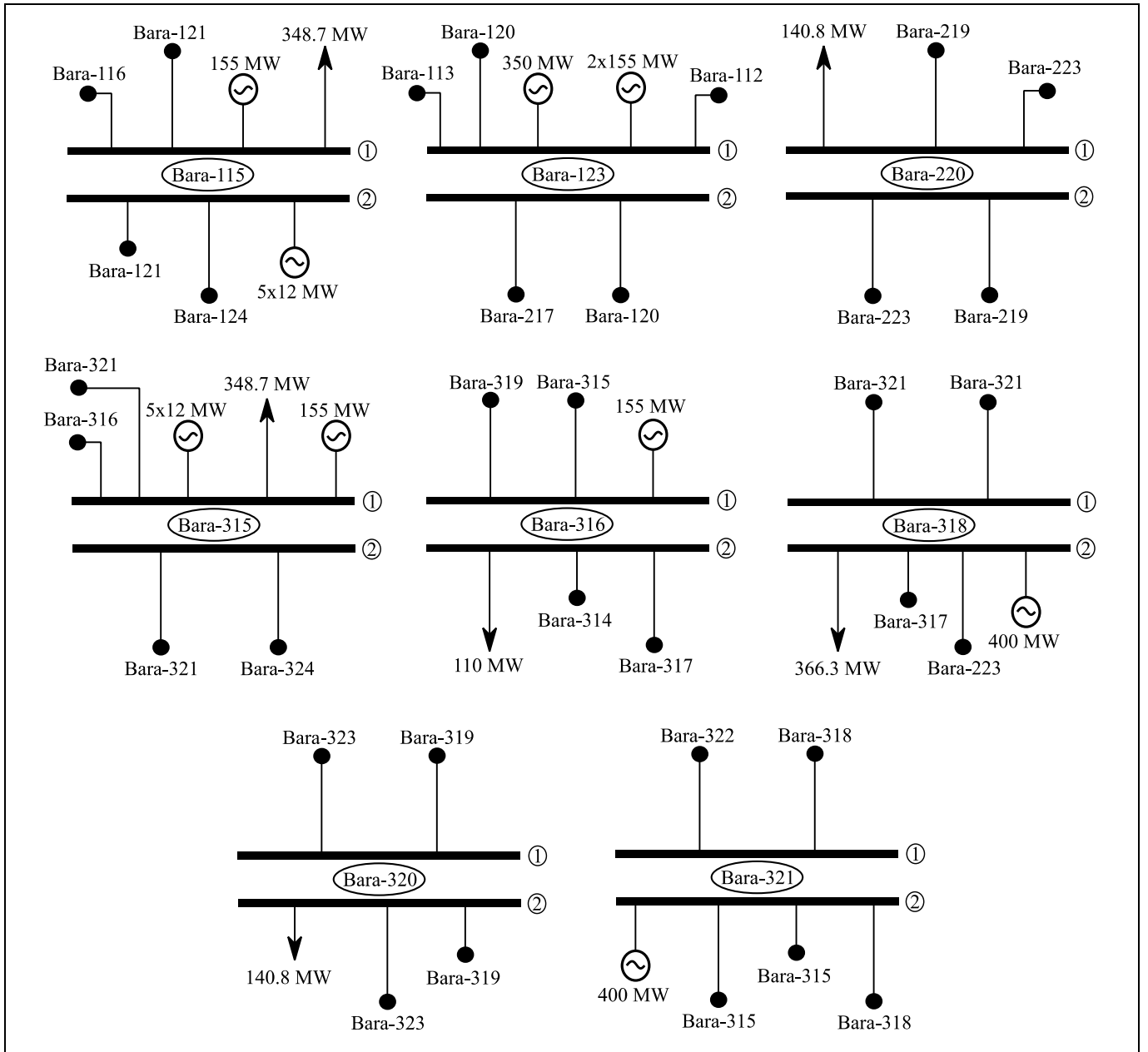
Table 1. N-1 performance in the RTS 96-bus test system before being implemented the bus splitting optimization.

Arızalı Hat	İzlenen Hat	Termik Sınır	Arıza Öncesi Güç Akışı	Arıza Sonrası Güç Akışı	Yüzdesele Yükleme
121-325	123-217	200 MVA	-109.0 MW	218.2 MW	%109.1
216-217	221-222	200 MVA	-60.0 MW	-239.5 MW	%119.8
217-222	221-222	200 MVA	-60.0 MW	-299.9 MW	%150.0
323-325	123-217	200 MVA	109.0 MW	218.2 MW	%109.1

Tablo 2. RTS 96-baralı test sisteminde Şekil 13'te verilen konfigürasyonun N-1 performansı.

Table 2. N-1 performance of the configuration in the RTS 96-bus test system given in Figure 11.

Arızalı Hat	İzlenen Hat	Termik Sınır	Arıza Öncesi Güç Akışı	Arıza Sonrası Güç Akışı	Yüzdesele Yükleme
216-217	221-222	200 MVA	-40.0 MW	-228.1 MW	%114.1
217-222	221-222	200 MVA	-40.0 MW	-300.0 MW	%150.0



Şekil 13. Pareto-öptimal kümeden elde edilen örnekle bara dağılımı.

Figure 13. An example bus layout obtained from Pareto-optimal front.

Tablo-1'de arıza olması durumunda aşırı yüklenmeye neden olan 4 iletim hattı bulunurken ("121-325", "216-217", "217-222" ve "323-325"), Tablo-2'de riskli kısıt sayısı 2'ye düşürülmüştür ("216-217" ve "217-222"). Tablolar incelendiğinde yeni konfigürasyonda yapılan N-1 analizi sonucuna göre arıza meydana gelmesi durumunda oluşacak aşırı yüklenmelerin şiddeti bakımından da iyileşme olduğu görülmektedir. Örneğin Tablo 1'de en problemlili arıza türü olan "217-222" No.lu EİH'nin servis harici olmasıyla "221-222" No.lu EİH'nin %150 yükleneceği görülürken, şiddet bakımından ikinci sırada bulunan "216-217" No.lu EİH'nin servis harici olması durumu "221-222" No.lu EİH'de %119.8 yüklenme meydana getirmektedir. Ancak optimizasyon algoritmasından elde edilmiş olan bara dağılımı üzerinde gerçekleştirilmiş N-1 analizinin sunulduğu Tablo 2'den görüleceği üzere en şiddetli arıza türünün yüklenme oranı yine %150 olsa da ikinci sırada bulunan arıza tipinin %114.1 oranında aşırı yüklenmeye neden olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen yeni konfigürasyonda kısa devre akımlarının sınırlandırılmasının yanı sıra sistemde bulunan kısıtların hem miktarı hem de şiddeti düşürülmüştür.

5 Sonuçlar

İSO'lar iletim sisteminde arz güvenliğini sürdürmek amacıyla çift baralı TM'lerde fiderleri uygun baralara dağıtarak hem aşırı kısa devre akımlarını sınırlandırmayı hem de N-1 güvenliğini sürdürmeyi amaçlamaktadır. Kombinasyonel, ikili ve lineer olmayan bu problemin karar değişkeni sayısı yükseldikçe çözüm uzayı da üstel olarak büyümektedir. Dolayısıyla optimizasyon algoritmaları kullanılmadan yapılan analizlerle böylesine zorlu bir problemin çözümü oldukça zordur. Üstelik bu problemde çözümlenmek istenen amaçlar arasında çıkar çatışması varsa tek amaçlı sezgi-üstü algoritmalarından da başarılı sonuçlar elde etmek mümkün olmayabilir. Bu nedenlerle çalışmamız kapsamında çok amaçlı problemleri çözmek amacıyla tasarlanan ve Pareto-optimalite kavramını Genetik Algoritma tekniğiyle birleştiren NSGA-II yaklaşımı çok amaçlı BBO problemini çözmek amacıyla kullanılmıştır.

BBO probleminin amaçları kısa devre akımlarını ve aktif güç kayıplarını minimize etmek üzere tasarlanmıştır. İSO'lar hangi amacı öncelikli buluyorsa Pareto-optimal kümeden ihtiyacına uygun çözümü seçebilme imkânı bulunmaktadır. Aynı zamanda problemin kısıtı olarak sistemin N-1 performansı tanımlanmıştır. Dolayısıyla elde edilen çözümde statik açıdan sistemin ihtiyacı olan konfigürasyon ortaya konulmaktadır. Örneğin RTS 96-baralı test sisteminde herhangi bir bara dağılımı yapılmamışken sistemde 18.39 kA üç faz kısa devre akımı hesaplanan bara bulunmaktadır. Çalışmamız kapsamında bu test sisteminde bulunan kesicilerin 15 kA kesme kapasitesine sahip olduğu varsayılmış ve elde edilen Pareto-optimal küme içerisinde bu özelliğe sahip bir bara dağılımı seçilmiştir. Pareto-optimal küme içerisinde kısa devre akımlarının minimize edildiği çözümler de bulunmaktadır ancak kısa devre akımlarını sınırlandırırken aktif güç kayıplarını artırdığımız için Pareto-optimal kümenin her iki amacı da makul ölçüde karşılayan bir denge noktasından uygun bara dağılımı seçilmiştir. Elde edilen bara dağılımı sadece kısa devre akımlarını sınırlandırmakla kalmamış aynı zamanda N-1 performansında da iyileşme göstermiştir. Herhangi bir bara düzeni oluşturulmadan önce N-1 durumunda termik yüklenme kapasitesine göre %150, %119.8, %109.1 ve %109.1 olmak üzere 4 adet kısıt bulunurken, bara dağılımı yapıldıktan

sonra %150 ve %114.1 olmak üzere 2 kısıt oluşmaktadır. Görüldüğü üzere uygun bara dağılımının elde edilmesiyle güç sisteminde meydana gelen kısıt sayısı azaltılmıştır.

NSGA-II tekniği sınırlarını çizdiğimiz BBO probleminde Pareto-optimal kümenin elde edilmesi bakımından oldukça başarılı sonuçlar sunmaktadır. Ancak çözüm süresini azaltmak amacıyla mevcut BBO problemine çalışmaya devam edilmesi gerekir. Ayrıca, gelecek çalışmalarda güvenlik kısıtlı ünite taahhüt problemiyle çalışmamız kapsamında sunulan BBO problemi entegre edilebilir.

6 Conclusions

Transmission System Operators purpose both restricting the short-circuit currents and maintaining N-1 security by distributing feeders to suitable buses in the substations having two buses. The solution space grows exponentially as the amount of the decision variables of this problem that has combinatorial, binary and non-linear property increases. Therefore, it is quite tough to deal with such a challenging problem with fulfilled analyzes without to be benefitted from an optimization algorithm. Furthermore, if there are conflict of interest among the objectives of this problem, obtaining successful solutions might not be possible even by using single objective Meta-heuristics. Hence, in order to solve the BBO problem in this study, NSGA-II method designed to solve multi-objective problems and combined the Pareto-optimality concept and Genetic Algorithm technique is implemented.

The BBO problem in this paper is designed to minimize the short-circuit currents and active power losses. It is possible to choose a suitable solution according to which objective that TSOs prioritize from the Pareto-optimal set. In addition, the N-1 performance of the transmission system is determined as the constraint of the problem. Therefore, configuration that the system needs in terms of static analysis is presented in the obtained solution. To illustrate, when it is not performed a bus layout in the RTS 96-bus test system, there is a busbar for which a three-phase short-circuit current of 18.39 kA is calculated in the system. Within the scope of our study, it is assumed that the breakers in this test system have a breaking capacity of 15 kA and a bus layout with this feature is selected from the obtained Pareto-optimal front. There are also solutions in which the short-circuit currents are minimized in the Pareto-optimal set, but since we increase the active power losses while restricting the short-circuit currents, the appropriate bus layout has been chosen from a balance point that reasonably meets both objectives of the Pareto-optimal front. The bus layout achieved from optimization process not only reduced the short-circuit currents, but also improved the N-1 performance. Before any busbar arrangement is created, there are 4 constraints, 150%, 119.8%, 109.1% and 109.1%, according to the thermal load capacity in the N-1 case, while after the bus distribution is made, there are 2 constraints, 150% and 114.1%. As can be seen, the number of constraints in the power system has been reduced by implementing the appropriate bus layout.

NSGA-II technique offers quite successful solutions in terms of acquiring Pareto-optimal front in the BBO problem designed in this study. However, it is necessary to continue to study on the BBO problem in order to reduce the solution time. In the future studies, the BBO problem presented in this paper can be integrated with security constrained unit commitment problem.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Erdi DOĞAN fikrin oluşması, literatür taraması, matematiksel modelin ve algoritmanın kurulması, sunulan şekillerin tasarlanması, program kodlarının yazılması, benzetim çalışmalarının yürütülmesi ve elde edilen bulguların değerlendirilmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Namchoat S, Hoonchareon N. "Optimal bus splitting for short-circuit current limitation in metropolitan area". *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, Thailand, 15-17 May 2013.
- [2] Nasrolahpour E, Ghasemi H, Khanabadi M. "Optimal transmission congestion management by means of substation reconfiguration". *Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, Iran, 15-17 May 2012.
- [3] Yang Z, Zhong H, Xia Q, Kang C. "Optimal transmission switching with short-circuit current limitation constraints". *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), 1278-1288, 2016.
- [4] Hedman KW, O'Neill RP, Fisher EB, Oren SS. "Optimal transmission switching with contingency analysis". *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1577-1586, 2009.
- [5] Bacher R, Glavitsch H. "Network topology optimization with security constraints". *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(4), 103-111, 1986.
- [6] Mazi A, Wollenberg BF, Hesse MH. "Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching". *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(3), 258 - 264, 1986.
- [7] Wrubel JN, Rapcienski SMPS, Lee KL. "Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications". *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(1), 415 - 421, 1996.
- [8] Jacqueline G, Luiz R, Machado JB. "A study of the use of corrective switching in transmission systems". *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(1), 336-341, 1999.
- [9] Heidarifar M, Ghasemi H. "A network topology optimization model based on substation and node-breaker modeling". *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(1), 247 - 255, 2016.
- [10] Heidarifar M, Doostizadeh M, Ghasemi H. "Optimal transmission reconfiguration through line switching and bus splitting". *IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition*, National Harbor, MD, USA, 27-31 July 2014.
- [11] Heidarifar M, Andrianesis P, Ruiz P, Caramanis MC, Paschalidis IC. "An optimal transmission line switching and bus splitting heuristic incorporating AC and N-1 contingency constraints". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107278>.
- [12] Xiao R, Xiang Y, Wang L, Xie K. "Power system reliability evaluation incorporating dynamic thermal rating and network topology optimization". *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6000-6012, 2018.
- [13] Khodaei A, Shahidehpour M, Kamalinia S. "Transmission switching in expansion planning". *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3), 1722-1733, 2010.
- [14] Hedman KW, Ferris MC, O'Neill RP, Fisher EB, Oren SS. "Co-optimization of generation unit commitment and transmission switching with N-1 reliability". *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(2), 1052 - 1063, 2010.
- [15] Zhou Y, Zhu H. "Bus split sensitivity analysis for enhanced security in power system operations". *51st North American Power Symposium*, Wichita, KS, USA, 13-15 October 2019.
- [16] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. "Grey wolf optimizer". *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61, 2014.
- [17] Sherali HD, Driscoll PJ. "Evolution and state-of-the-art in integer programming". *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124(1-2), 319-340, 2000.
- [18] İşcan S, Kaplan O, Lokman G. "Güç sisteminde meta-sezgisel algoritmalarla güç kaybı ve gerilim kararlılığı optimizasyonu". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(2), 199-209, 2021.
- [19] Güvenç U, Battal O. "Coyote optimization algorithm to solve energy hub economic dispatch problem". *International Journal of Technological Sciences*, 12(1), 10-19, 2020.
- [20] Gümüş ET, Sarıgüzel C, Turan M, Yalçın MA. "Genetik algoritmalar kullanılarak transformatörde kademe ayarı ile enerji verimliliği iyileştirme". *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 2486-2495, 2020.
- [21] Alcan Y, Öztürk A, Dirik H, Demir M. "Güç şebekelerinde minimum kayıpları sağlayan STATCOM konumunun ve değerinin belirlenmesinde farklı sezgisel algoritmaların karşılaştırılması". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(5), 550-558, 2017.
- [22] Hussain K, Mohd Salleh MN, Cheng S, Shi Y. "Metaheuristic research: a comprehensive survey". *Artificial Intelligence Review*, 52(4), 2191-2233, 2019.
- [23] Holland JH. "Genetic algorithms". *Scientific American*, 267(1), 66-72, 1992.
- [24] Srinivas N, Deb K. "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms". *Evolutionary Computation*, 2(3), 221-248, 1994.
- [25] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197, 2002.
- [26] Kamarposhti MA, Kabalci E. "Optimal transmission expansion planning considering distributed generations by using non-dominated sorting genetic algorithm-ii (NSGAIi)". *Journal of Power Technologies*, 101(1), 70-77, 2021.
- [27] Hu Y, Bie Z, Ding T, Lin Y. "An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning". *Applied Energy*, 167, 280-293, 2016.
- [28] Xiaoming W, et al. "Multi-objective transmission network planning based on multi-objective optimization algorithms". *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, Beijing, China, 26-28 November 2017.
- [29] Arabali A, Ghofrani M. "A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation". *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 3003-3011, 2014.

- [30] Eliassi M, Seifi H, Haghifam MR. "Multi-objective value-based reliability transmission planning using expected interruption cost due to transmission constraint". *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 23(8), 1468-1489, 2013.
- [31] Correa-Florez CA, Salcedo AS, Panesso AF. "Multi-objective transmission expansion planning considering uncertainty in wind power and demand". *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition-Latin America*, Morelia, Mexico, 20-24 September 2016.
- [32] Correa CA, Bolanos R, Sanchez A, Garces A, Molina A. "Multiobjective transmission planning with security constraints". *IEEE EuroCon 2013*, Zagreb, Croatia, 1-4 July 2013.
- [33] Sadees M, Vijayakumar K, Roselyn JP. "MOGA based congestion management in deregulated power systems". *International Journal of Control Theory and Applications*, 9(15), 7081-7093, 2016.
- [34] Hernandez YR, Hiyama T. "Minimization of voltage deviations, power losses and control actions in a transmission power system". *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, Curitiba, Brazil, 8-12 November 2009.
- [35] Belazzoug M, Boudour M. "FACTS placement multiobjective optimization for reactive power system compensation". *7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, Amman, Jordan, 27-30 June 2010.
- [36] Benabid R, Boudour M, Berizzi A, Bovo C, Ilea V. "Multi-objective optimization of static var compensator in the presence of secondary voltage regulation using NSGA-II". *IEEE International Energy Conference and Exhibition*, Florence, Italy, 9-12 September 2012.
- [37] Nguyen TT, Yousefi A. "Multi-Objective approach for optimal location of TCSC using NSGA II". *International Conference on Power System Technology*, Zhejiang, China, 24-28 October 2010.
- [38] Wartana IM, Singh JG, Ongsakul W, Buayai K, Sreedharan S. "Optimal placement of UPFC for maximizing system loadability and minimize active power losses by NSGA-II". *International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE)*, Pattaya, Thailand, 28-30 September 2011.
- [39] Wartana IM. "A multi-objective problems for optimal integration of the DG to the grid using the NSGA-II". *International Conference on Quality in Research*, Lombok, Indonesia, 10-13 August 2015.
- [40] Moeini A, Kamwa I, de Montigny M, Lenoir L. "Application of battery energy storage for network vulnerability mitigation". *IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, Dallas, TX, USA, 3-5 May 2016.
- [41] Li G, Shi D. "Risk-based maintenance schedule of transmission line using multi-objective evolutionary algorithm". *IEEE Power Engineering and Automation Conference*, Wuhan, China, 8-9 September 2011.
- [42] del Castillo MY, Song H. "Tabu search based topology modification for reduction of fault current level in power systems". *International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and International Symposium on Advanced Intelligence Systems*, Kobe, Japan, 20-24 November 2012.
- [43] Doğan E, Yörükeren N. "Optimal bus layout in transmission system by using meta-heuristic approaches". *Electric Power Components and Systems*, 48(12-13), 1390-1400, 2020.
- [44] Doğan E, Yörükeren N. "Binary pathfinder algorithm for bus splitting optimisation problem," *IET Generation, Transmission and Distribution*, 14(26), 6613-6638, 2020.
- [45] ILLINOIS Information Trust Institute. "IEEE 96-RTS test system". <https://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/ieee-96-rts-test-system> (27.07.2021).
- [46] Grigg C, et al. "The IEEE reliability test system-1996". *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3), 1010-1020, 1999.