

## GİRİŞ

Güç sisteminde bir arıza oluştuğunda, maddi kayıp ve can kaybı oluşmasını önlemek için, arızalı kısmın/bölgenin sistemden en kısa zamanda ayrılması sağlanmalıdır. Arıza giderildikten sonra, arızaya neden olan etkeni belirleyebilmek için arıza yeri bulunmalıdır. Arıza yeri tespiti için, yakın ya da uzak baradan ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılır. Temel arıza yeri tespiti için, yıllar içerisinde birçok çalışma geliştirilmiştir [1-3]. İlk çalışmalar ağırlıkla, yürüyen dalga algoritmalarını baz almıştır [4-7]. Yürüyen dalga algoritmaları arıza tipi, arıza dirençleri, arıza başlangıç açıları ve kaynak empedansları gibi değişkenlerden etkilenmeyecek şekilde geliştirilmiştir. Ancak yüksek örnekleme frekansı gereksinimi, örnekleme penceresi seçiminde karşılaşılan zorluklar, arıza yeri ve uzak baradan yansıyan dalgaların birbirlerinden ayırt edilmesinde yaşanan zorluklar, yeni algoritma çalışmalarına zemin oluşturmıştır [8].

Yürüyen dalga algoritmalarında yaşanan zorluklar, tek bara ve iki bara ölçümlerini kullanan empedansa dayalı algoritmaları ön plana çıkarmıştır [9, 10]. Empedansa dayalı algoritmalar, basit olarak hat empedansını gerçek ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılmasında baz alarak arıza yerini tespit etmeyi amaçlar [11].

Tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalar basit, az maliyetli, uzak baranın etkilerinin arıza yeri tespiti sonuçlarını değiştirmeyeceği algoritmalarlardır. Ancak arıza yeri bulma doğruluğu, iki bara ölçümlerini kullanan algoritmaların altındadır [12, 13].

İki bara ölçümlerini kullanan algoritmalar, daha düşük arıza yeri tespiti hata oranına sahiptir, özel uygulamalar için (seri kapasitör, FACTS, transpoze olmamış hatlar gibi) daha kolaylıkla adapte edilebilirler [14-19].

Elektrik enerjisi talebinde, süregelen artış ve iletim hattının termal limitlerine kadar enerji transferi gerekliliği, iletim sistemlerinde hızlı gelişmelere yol açmıştır [20]. Bu durum, iletim hatlarında güç transferi kabiliyetini, iletim kayıplarını, güç sistemi kararlılığını ve gerilim kontrolünü iyileştirme amacıyla, seri kapasitörler kullanımı

gerekliliğini doğurmuştur [21]. Ancak iletim hatlarında kullanılan seri kapasitör, temel arıza yeri bulma algoritmalarının arıza yerini yüksek hata ile tespit etmesine yol açmaktadır. Bunun nedeni, seri kapasitör ve seri kapasitöre paralel bağlı, doğrusal olmayan MOV'dur [22].

MOV ve seri kapasitörün, arıza durumundaki davranışlarından dolayı, seri kapasitörlü iletim hatları için özel algoritmalar geliştirilmiştir. Seri kapasitörlü iletim hatları için fazörel [3, 8, 14, 23-27], yürüyen dalga teorisi [28, 29] ve zaman domeni hat modeline dayalı [30-33] algoritmalar bulunmaktadır. Bu algoritmalara ek olarak hibrit yapay zeka uygulamaları [34-42] da vardır.

Empedansa dayalı algoritmalarla genel örnekler verilerek, bu algoritmaların güç sistemlerindeki çalışma karakteristiğini görmek ve buna bağlı olarak kaynak empedansları, hat empedansı, arıza direnci, arıza tipi, arıza uzaklığı gibi değişkenlerinden doğacak etkiler yorumlanmıştır. Yapılan uygulamalar ile algoritmaların bu değişkenler altında gösterdiği hata oranları hesaplanarak, hangi sistemlerde ve hangi şartlarda kullanılabileceği, algoritmaların bu test sistemlerindeki sonuçları baz alınarak anlaşılır. Bölüm 1'de, sayısal koruma ve arıza analizinin temel konuları ele alınmıştır. Bölüm 2'de ise, yaygın olarak kullanılan temel bir ve iki bara ölçümelerini kullanan algoritmalar teorik olarak verilmiştir, Bölüm 3'te bu algoritmalar, farklı test sistemlerinde denenmiştir. Bölüm 4'te seri kapasitörlü iletim hatlarında, arıza yeri tespiti için kullanılan algoritmaların genel özellikleri verilmiştir. Bölüm 5'te ise, seri kapasitörlü iletim hatlarında kullanılmak üzere geliştirilen frekans domeninde çalışan performansa dayalı bir algoritma sunulmuştur. Ayrıca geliştirilen algoritma Bölüm 5.1'de, genel arıza yeri bulma algoritmaları ile bir test sisteminde denenerek, seri kapasitörlü iletim hatlarında kullanılmak üzere bir algoritma geliştirmenin gerekliliği ispat edilmiştir. Bölüm 5.2'de ise, seri kapasitörlü iletim hatları için geliştirilen algoritmalar ile performansa dayalı algoritma farklı arıza tipi, farklı arıza direnci ve farklı arıza yeri değişkenlerinde, bir test sisteminde karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

## 1. SAYISAL KORUMADA TEMEL KAVRAMLAR

İletim hatlarında, arıza yerini belirlemek için, temel olarak bir veya iki baradan alınan gerilim ve akım ölçümleri, iletim hattı bilgileri bilinmelidir. Buradan da anlaşılacağı gibi arıza yerinin tespit edilebilmesi için ilk adım baradan okunan akım ve gerilim verilerini irdelemektir.

### 1.1. Ayırık İşaretlerin Fazörel Gösterimi

Empedans tabanlı arıza yeri bulma algoritmaları, fazörel akım ve gerilim değerlerine ihtiyaç duyarlar. Baralardan okunan akım ve gerilim değerleri, zaman domenindedirler. Bu verilerin, empedans tabanlı algoritmalarda kullanılabilmesi için öncelikle frekans domenine dönüştürülmeleri gerekmektedir. Fazörel dönüşüm için, öncelikle örnekleme tanımının bilinmesi gerekir. Baradan alınan akım ve gerilim analog işaretlerinin, süreksiz özellikteki ayırık işaretlere dönüştürülmesi gerekmektedir, bu duruma örnekleme denilmektedir. Bu şekilde sinüzoidal dalga, örnekleme aralıklarıyla tanımlanarak işlem ve hafıza kullanımı azaltılır, böylece veriyi kullanan röle ve bilgisayar gibi işlemcilerin veri yükü azalır. Örnek olarak belirtilmesi gerekilirse,  $y(t)$  sürekli işareti için;

$$y(t)=Y_m\sin(2\pi f_0t+\varphi) \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de  $f_0$  işaretin frekansıdır. k. örnek için Denklem (1.1)'den yola çıkarak Denklem (1.2) elde edilir;

$$y(k) = Y_m\sin(2\pi f_0(k\Delta t + \varphi)) \quad (1.2)$$

$\Delta t$  örnekleme aralıklarıdır,  $f_s=1/\Delta t$  ise örnekleme frekansını belirtir. Faz farkı  $2\pi$  ve katları olan iki örnek arasında bir fark yoktur. Ayrıca örnekleme frekansı seçilirken, örnekleme frekansının, işaretin frekansının iki katına eşit veya daha büyük olması gerekmektedir [43]. Bu durum sağlanmazsa, örneklenmiş işarete analog işarete olmayan düşük frekans bileşeni ortaya çıkar. Bu aliasing hatası olarak bilinir.

Arıza yeri tespiti için geliştirilen algoritmalarından empedans tabanlı olanlarında, örneklenmiş akım ve gerilim değerlerinin fazörel olarak hesaplanması gerekir. Ayrıca arıza tespiti algoritması simetrik bileşenleri kullanıyorsa, genellikle zaman domenindeki veriler frekans domenine çevrilir, daha sonra fazörel veriler simetrik bileşenlere çevrilir.

Fazörel dönüşüm basitçe, Eşitlik (1.1)'de genel olarak verilen sinüzoidal dalga şekline sahip bir fonksiyonun, maksimum değeri ( $Y_m$ ) ve açısını ( $\varphi$ ) elde etmek olarak açıklanabilir;

$$\bar{Y} = \sqrt{2}Y\sin(\omega_s t + \varphi) = Ye^{j\varphi} \quad (1.3)$$

Zaman domenindeki işaretleri, fazörel domende ifade etmek için kullanılabilecek farklı yöntemler vardır. İki örnek yöntemi, üç örnek yöntemi, türev yöntemi ve Fourier dönüşümü bu yöntemlere örnek olarak verilebilir. Bu yöntemlerden, Fourier dönüşümü daha sıklıkla kullanılır.

Fourier dönüşümü, sürekli bir işaretin zaman ve frekans domeni arasında ki bağıntıyı açıklarken, arıza yeri algoritmaları gibi uygulamalarda süreksiz bir işaret irdelenir. Bu durumlar için ayrık Fourier dönüşümü kullanılır;

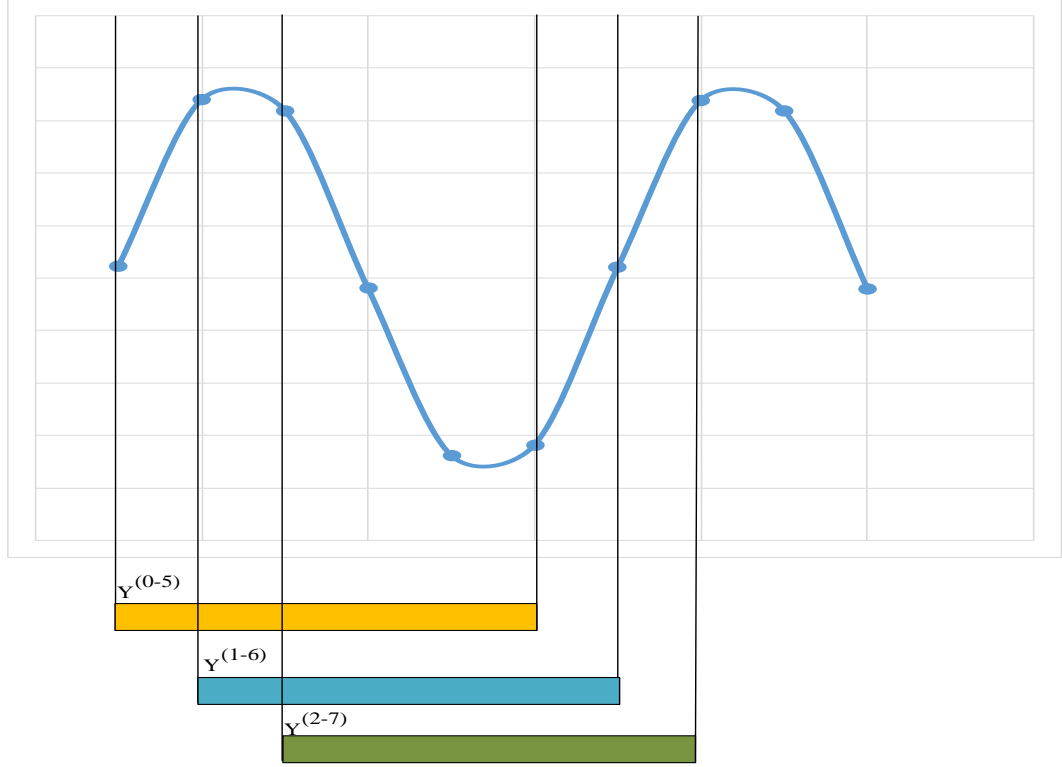
$$y(k \Delta t) = \sum_{k=0}^{N-1} Y(h\omega) e^{jk\omega \Delta t} \quad (1.4)$$

Burada  $\Delta t$  örnekleme adımı,  $h$  harmonik derecesi,  $k$  asal sayı ve bu işaret bir periyotta  $N$  sayıda örneklenmiştir. Ayrık örnekleme için tam periyot veya yarım periyot fazör gösterimi kullanılabilir. Bu tezde, tam periyot fazör gösterimi kullanılmıştır;

$$Ye^{-j\varphi} = \frac{2Y_1}{\sqrt{2N}} = \frac{2}{\sqrt{2N}} \sum_{k=0}^{N-1} y(k \Delta t) e^{-jk2\pi/N} \quad (1.5)$$

Tam periyot fazörel gösterim, Denklem (1.5) yardımıyla yapılır. Anlaşılacağı üzere, bu gösterim sadece bir periyotluk veriyi fazörel çevirmek içindir. Belli bir örnekleme aralığında, fazörel gösterimi kullanmak için yinelenen Fourier ifadesi kullanılmalıdır. Ayrık Fourier dönüşümünde, belirli bir pencere için yapılan fazörel

dönüşümdeki ilk veriyi çıkarıp yerine bu periyodu takip eden örneği alırsak, yeni bir pencere oluşturmuş oluruz. Bu ekle ve çıkarma işlemini, toplam örnek sınırına kadar devam ettirebiliriz. Yenilenen Fourier ifadesi, oluşan yeni pencere ile verisi çıkarılan pencereyi karşılaştırarak örnek dizisinin fazörel gösterimini çıkarır. Yenilenen Fourier ifadesinin gösterimi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Yenilenen Fourier ifadesi

$y(k \Delta t) = y_k$  ve  $\frac{2\pi}{N} = \theta_s$  olarak alınırsa Denklem (1.5)’de ki Y fazörel işareti;

$$Y = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_k e^{-jk\theta_s} \quad (1.6)$$

Denklem (1.6)’da başlangıç örneği M ise;

$$Y^{(M, (M+N-1))} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=M}^{M+N-1} y_k e^{-jk\theta_s} \quad (1.7)$$

1 periyodu 6 örnekle örneklenen bir işaretin, 0. (ilk örnek 1. olarakta alınabilir) örnekten başlanarak ilk pencerede 5. örneğe kadar olan örneklerin fazörel gösterimi Denklem (1.8)'de gösterilmiştir.

$$Y^{(0,5)} = \frac{\sqrt{2}}{6} (y_0 + y_1 e^{-j\theta_s} + y_2 e^{-j2\theta_s} + y_3 e^{-j3\theta_s} + y_4 e^{-j4\theta_s} + y_5 e^{-j5\theta_s}) \quad (1.8)$$

İkinci ve üçüncü penceredeki örnekleri kullanarak işaretin fazörel değeri;

$$Y^{(1,6)} = \frac{\sqrt{2}}{6} (y_1 e^{-j\theta_s} + y_2 e^{-j2\theta_s} + y_3 e^{-j3\theta_s} + y_4 e^{-j4\theta_s} + y_5 e^{-j5\theta_s} + y_6 e^{-j6\theta_s}) \quad (1.9)$$

$$Y^{(2,7)} = \frac{\sqrt{2}}{6} (y_2 e^{-j2\theta_s} + y_3 e^{-j3\theta_s} + y_4 e^{-j4\theta_s} + y_5 e^{-j5\theta_s} + y_6 e^{-j6\theta_s} + y_7 e^{-j7\theta_s}) \quad (1.10)$$

Şeklinde alınan toplam örnek sayısına kadar, yeni pencereler oluşmaya devam edecektir. Her yeni pencerede oluşacak değişimi bulmak için;

$$Y^{(1,6)} - Y^{(0,5)} = \frac{\sqrt{2}}{6} (y_6 e^{-j6\theta_s} - y_0) \rightarrow Y^{(1,6)} = Y^{(0,5)} + \frac{\sqrt{2}}{6} (y_6 e^{-j6\theta_s} - y_0) \quad (1.11)$$

$$Y^{(2,7)} - Y^{(1,6)} = \frac{\sqrt{2}}{6} (y_7 e^{-j7\theta_s} - y_1 e^{-j\theta_s}) \rightarrow Y^{(2,7)} = Y^{(1,6)} + \frac{\sqrt{2}}{6} (y_7 e^{-j7\theta_s} - y_1 e^{-j\theta_s}) \quad (1.12)$$

$$Y^{(M+1,M+N)} = Y^{(M,M+N-1)} + \frac{\sqrt{2}}{N} (y_{M+N} - y_M) e^{-jM\theta_s} \quad (1.13)$$

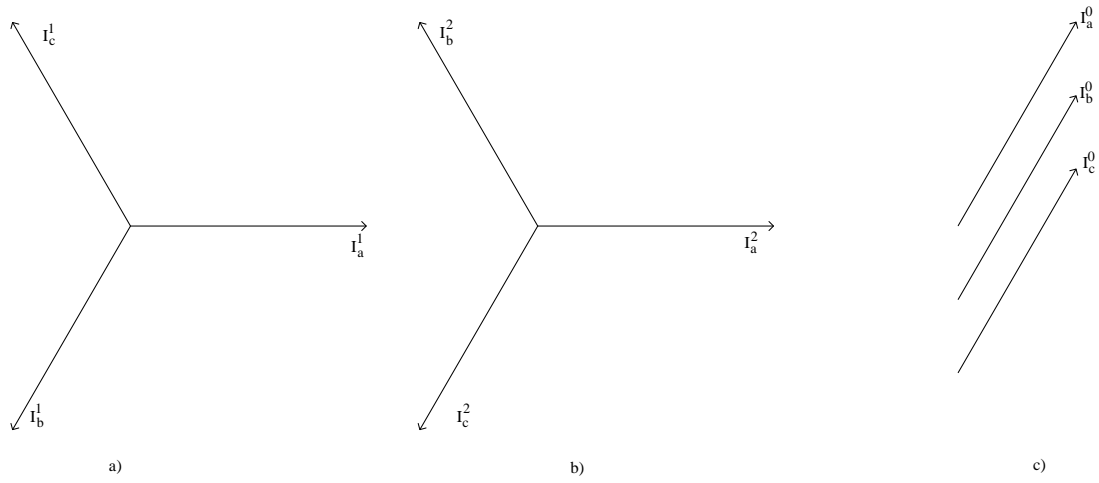
Genel bir ifade ile yazılırsa, M (başlangıç örneği) ve N (1 periyodun örnekleme sayısı) cinsinden gösterilirse, Denklem (1.13) kullanılarak, akım ve gerilimin fazörel değerleri, toplam örnekleme sayısı için ilk periyoda eklenen her örneğe bağlı olarak yinelenen şekilde çıkartılabilir.

## 1.2. Arıza Tipinin Belirlenmesi

Bütün arıza tiplerinde arıza yeri tespitinin sadece faz bileşenleri ile yapılması genel olarak mümkün değildir. Faz bileşenlerini kullanan arıza yeri algoritmaları, özellikle toprak arızalarında simetrik bileşenlerden de faydalanırlar. Bunun dışında, sadece simetrik bileşenleri kullanarak arıza analizi yapan algoritmalar da bulunmaktadır. Bu

nedenle arıza yeri tespiti algoritmalarına giriş yapmadan önce simetrik bileşenlerin bilinmesi gerekir.

Simetrik bileşenler, dengeli olmayan faz değerlerinin üç farklı simetrik bileşen (pozitif, negatif ve sıfır) ile değiştirilmesi durumudur. Pozitif bileşen 1 indisi, negatif bileşen 2 indisi ve sıfır bileşen 0 indisi ile gösterilir. Pozitif ve negatif simetrik bileşenlerden farklı olarak, sıfır simetrik bileşenlerin arasında açı farkı yoktur ve bazı dengeli olmayan arıza tipleri incelendiğinde bu bileşenler ile karşılaşılır. Şekil 1.2’de pozitif, negatif ve sıfır bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Simetrik bileşenlerin gösterimi a) pozitif bileşenler b) negatif bileşenler c) sıfır bileşenler

a, b, c fazlarının gerilim ve akımlarının pozitif, negatif ve sıfır bileşenler cinsinden matris formatında gösterimi aşağıda ki gibidir [44];

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

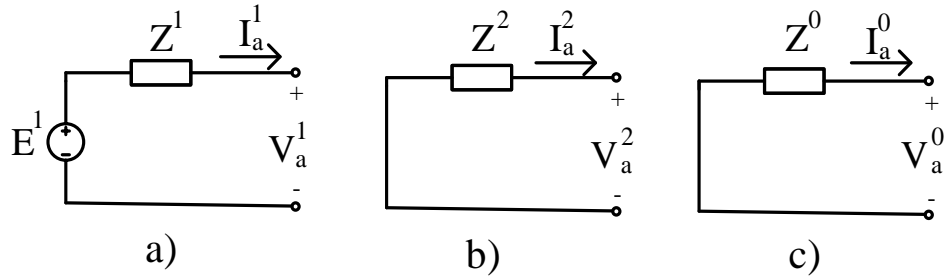
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Denklem (1.14) ve Denklem (1.15)’de tanımlanan  $\alpha$  ve  $\alpha^2$ ;

$$\begin{aligned}\alpha &= 1\angle 120^\circ = -0,5 + j0,8666 \\ \alpha^2 &= 1\angle 240^\circ = -0,5 - j0,8666\end{aligned}\quad (1.16)$$

şeklindedir.

Simetrlili bileşen uygulanan bir devrede, farklı simetrlili bileşen akımların akmasına neden olan empedanslara simetrlili bileşen empedansı denir. Şekil 1.3 te eşdeğer simetrlili bileşen devrelerinde verilmiştir.



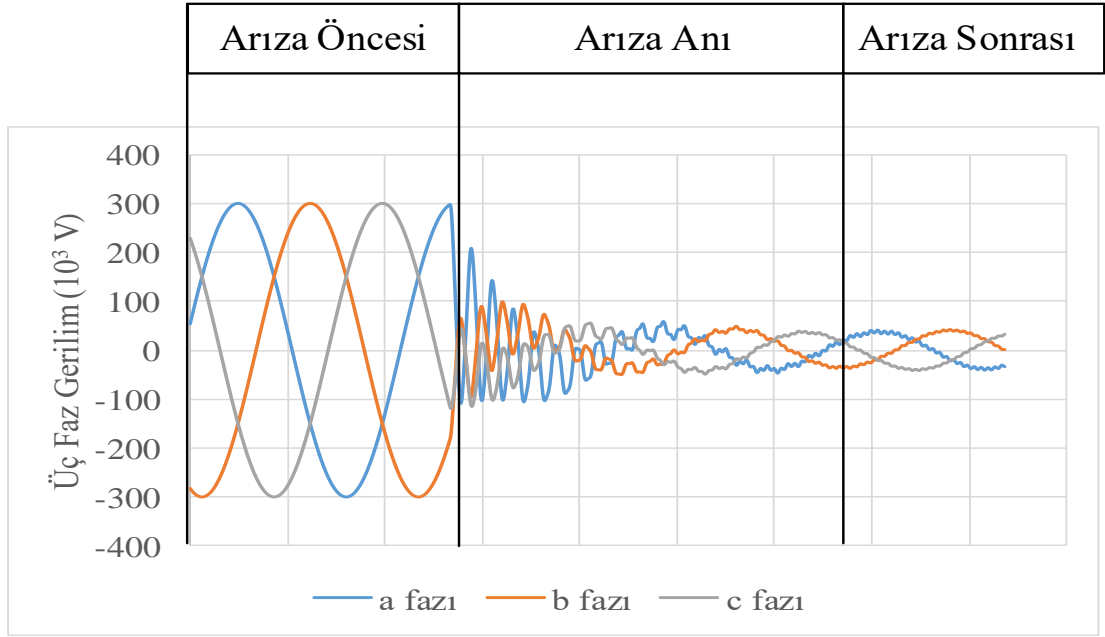
Şekil 1.3. Şebekenin a) pozitif bileşen devresi b) negatif bileşen devresi c) sıfır bileşen devresi

Şekil 1.3 baz alınarak empedansa bağlı simetrlili bileşen matrisi;

$$\begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E^1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^1 & 0 \\ 0 & 0 & Z^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Arıza yeri bulma algoritmaları, genel olarak arıza sonrasındaki akım ve gerilim verilerini kullanırlar. Bu nedenle arıza öncesi ve sonrası verilerinin ayrımının yapılması gerekir. Bu ayrıma ek olarak, arıza anında özellikle akımın sinüsoidal yapısında bozulmalar meydana gelebilir, bu bozulmalar algoritmanın doğru çalışmasını engeller. Algoritmanın hesaplamalar için kullanacağı kısım, bir geçici durum monitörü ile belirlenir. Arıza öncesi, arıza anı ve arıza sonrası durum Şekil 1.4’de verilmiştir.





Şekil 1.4. Arıza öncesi, arıza anı ve arıza sonrası durum

Temel bir geçici durum monitörü, fazörel akım veya gerilim verilerini bir önceki periyottaki veriler (veya bir önceki yarım periyottaki veriler) ile karşılaştırarak kullanıcı tarafından belirlenen kabul edilebilir bir bozulma limiti dışındaki bozulmuş verileri belirler ve diğer verilerden ayırır.

Bozulmuş verileri ayıkladıktan sonra yapılması gereken, arıza sonrası kısmın belirlenerek verilerin kullanılan algoritmaya uygun hale getirilmesidir. Arıza sonrası durumu tespit etmenin en temel yollarından biri, toplam hat empedansı ile baradan alınan gerilim ve akımdan elde edilen empedansın karşılaştırılması şeklindedir. Eğer bu hesaplanan empedans, toplam hat empedansından küçük değerde ise arızadan sonraki durum olduğu anlaşılır. Ancak bu empedans hesabı, iletim sistemleri üç fazlı olduğundan arıza tipi dikkate alınarak yapılır.

Tablo 1.1’de hesaplanan empedanslarla, iletim hattının pozitif empedansı karşılaştırıldığında hem arıza sonrası veri olup olmadığı hem de sistemdeki arıza tipi belirlenir.

Tablo 1.1. Arıza tiplerine göre pozitif bileşen empedans eşitlikleri [10]

Arıza Tipi	Pozitif Bileşen Empedans Eşitliği
a fazı - toprak	$V_a / I_a + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1)}{3Z_L^1} 3I_a^0$
b fazı - toprak	$V_b / I_b + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1)}{3Z_L^1} 3I_a^0$
c fazı - toprak	$V_c / I_c + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1)}{3Z_L^1} 3I_a^0$
a-b veya a-b-t	$V_{ab}/I_{ab}$
b-c veya b-c-t	$V_{bc}/I_{bc}$
c-a veya c-a-t	$V_{ca}/I_{ca}$
a-b-c	$V_{ab}/I_{ab}$ veya $V_{bc}/I_{bc}$ veya $V_{ca}/I_{ca}$

Arıza yeri bulma algoritmalarında, eşitlikler genellikle arıza tipine göre değil referans alınan bara (S barası) ve uzak uçtaki bara (R barası) verileri olarak ayrılır. Bu nedenle algoritmalarda geçen  $V_S$ ,  $I_S$ ,  $V_R$ ,  $I_R$  sırasıyla S barası gerilim ve akımı, R barası gerilim ve akımı arıza tipine göre değişir. Örnek olarak bir a fazı – toprak arızası  $V_S$ ,  $I_S$ ,  $V_R$ ,  $I_R$  sırasıyla Denklem (1.18), Denklem (1.19), Denklem (1.20), Denklem (1.21) denklemleri ile ifade edilir;

$$V_S = V_a \quad (1.18)$$

$$I_S = I_a + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1)}{3Z_L^1} 3I_a^0 \quad (1.19)$$

$$V_R = V_a \quad (1.20)$$

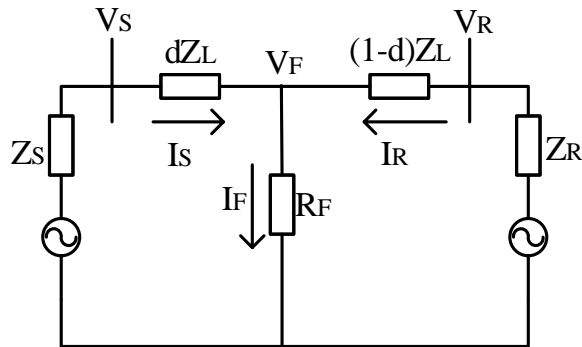
$$I_R = I_a + \frac{(Z_L^0 - Z_L^1)}{3Z_L^1} 3I_a^0 \quad (1.21)$$

Denklem (1.18) ve Denklem (1.19)'de verilen  $V_a$ ,  $I_a$ ,  $I_a^0$  değerleri S barasından alınan ölçümlere göre hesaplanmış, Denklem (1.20) ve Denklem (1.21) de verilen  $V_a$ ,  $I_a$ ,  $I_a^0$  değerleri ise R barasından alınan ölçümlere göre hesaplanmıştır.

## 2. İLETİM HATLARINDA EMPEDANSA DAYALI ARIZA YERİ BULMA ALGORİTMALARI

İletim hatlarında arıza yeri bulma algoritmaları, genel olarak iki kısma ayrılabilir. Bunlar tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalar ve iki bara ölçümlerini kullanan algoritmalar.

Tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalar, tek bir referans baradan alınan veriler yardımıyla ve dolayısıyla daha az veri ile arıza yerini belirlerler. Ancak kullandığı veri sınırlı olduğundan, iki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarından daha fazla hata payları vardır. Buna rağmen, arıza yeri ve uzak bara arasındaki etkenlerden (seri kapasitör, admitans etkileri gibi), bu algoritmaların doğruluğunu etkilemez, bu yüzden referans alınan baraya yakın oluşan arızalarda arıza yeri bulma isabeti daha yüksektir. İki bara ölçümlerini kullanan algoritmaların doğruluğu yüksektir ve arıza yeri uzaklığından tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalar kadar etkilenmezler, ancak her baradan senkronize ölçüm alması gerektiğinden maliyeti yüksektir.



Şekil 2.1. İletim hattında arıza eşdeğer devresi

Arıza yerinin tespitine yönelik geliştirilen algoritmaları tanımlamak için Şekil 2.1’de gösterilen iletim hattı arıza eşdeğer devresi kullanılacaktır. Bu devrede  $V_S$  (V),  $I_S$  (A),  $V_R$  (V),  $I_R$  (A) sırasıyla referans ve uzak bara gerilim ve akım değerleridir.  $d$  (%) arıza noktası,  $Z_L$  ( $\Omega$ ) toplam hat empedansı ve  $V_F$  (V),  $I_F$  (A),  $R_F$  ( $\Omega$ ) sırasıyla arıza noktasındaki gerilim ve akım ve arıza direncidir.  $Z_S$  ( $\Omega$ ) ve  $Z_R$  ( $\Omega$ ) ise sırasıyla referans ve uzak baradan görülen thevenin empedanslarıdır.

Arıza yeri bulma algoritmaları, arıza yerini belirli bir sapma ile tespit ederler. Bu sapmaya hata oranı, yüzde hata, arıza yeri hatası gibi tanımlamalar yapılır. Bu hata oranı hesabında, aşağıda belirtilen IEEE PC37.114 standardı baz alınmıştır [9];

$$\% \text{arıza yeri hatası} = \frac{|\text{hesaplanan değer} - \text{gerçek değer}|}{\text{toplam hat uzunluğu}} \times 100$$

## 2.1. Tek Bara Ölçümlerini Kullanan Arıza Yeri Bulma Algoritmaları

### 2.1.1. Basit reaktans algoritması

S barasından bakıldığında,  $V_S$  aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$V_S = dZ_L I_S + R_F I_F \quad (2.1)$$

Algoritmanın amacı,  $R_F I_F$  çarpımının etkilerini azaltmaktır. Bunun için Denklem (2.1) deki eşitliğin iki kısmının,  $I_S$  değerine bölünüp, imajiner kısımlarını ele almak gereklidir. Ancak  $I_F$ ,  $R_F$  ve  $d$  bu eşitliğin bilinmeyenleridir, eşitliğin çözülebilir olması için  $(I_F R_F)/I_S$  kısmının omik olduğu varsayılmalıdır.

$$\text{Im}(V_S/I_S) = \text{Im}(dZ_L) \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'den  $d$  çekildiğinde [8-10];

$$d = \text{Im}(V_S/I_S)/X_L \quad (2.3)$$

$X_L$  hat empedansının imajiner bileşenidir.

Bu algoritmanın doğruluğu,  $I_F$  ve  $I_S$  akımlarının aynı açıda veya  $R_F$  değerinin sıfır olmasına bağlıdır.

### 2.1.2. Takagi algoritması

Takagi metodu, güç akışı ve arıza direncinin etkilerini azaltarak basit reaktans algoritmasını geliştirmeyi amaçlar. Ancak algoritma, bu geliştirme için arıza öncesi akıma ( $I_{\text{önce}}$ ) ihtiyaç duyar.

$$I_{\text{süp}} = I - I_{\text{önce}}$$

Arıza anındaki akımdan, arıza öncesi akımı çıkartılarak elde edilen süperpozisyon akımının eşleniği Denklem (2.1) deki eşitliğin iki tarafı ile çarpılırsa;

$$V_S I_{süp}^* = d Z_L I_S I_{süp}^* + R_F I_F I_{süp}^* \quad (2.4)$$

Denklem (2.4), imajiner bir eşitliğe dönüştürülürse [1, 3, 8-10];

$$d = \text{Im}(V_S I_{süp}^*) / \text{Im}(Z_L I_S I_{süp}^*) \quad (2.5)$$

Denklem (2.5) ile Denklem (2.4) karşılaştırıldığında  $R_F I_F I_{süp}^*$  kısmının omik olarak alındığı görülür. Bunun nedeni bu algoritma için  $I_F$  ve  $I_{süp}^*$ 'ın aynı açıya sahip olduğu varsayılmasıdır. Bu varsayım homojen sistemler için geçerlidir, ancak bunun dışındaki sistemlerde bu iki akımın arasındaki açı arttıkça hata oranı da artacaktır.

### 2.1.3. Geliştirilmiş Takagi algoritması

Toprak arızalarında, Takagi algoritmasındaki süperpozisyon akımı yerine sıfır bileşen akımını ( $3I_S^0$ ) kullanarak, arıza öncesi akım ihtiyacının kaldırılması amaçlanmıştır. Hatta bu algorithmada, kaynak empedansları biliniyorsa açı doğrulama işlemi de yapılabilir [9, 10];

$$d = \frac{\text{Im}(V_S (3I_S^0) e^{-jT})}{\text{Im}(Z_L I_S (3I_S^0) e^{-jT})} \quad (2.6)$$

T açısı aşağıda belirtildiği şekilde elde edilir;

$$\frac{I_F}{3I_R} = \frac{Z_S^0 + Z_L^0 + Z_R^0}{(1-d)Z_L^0 + Z_R^0} = \left| \frac{I_F}{3I_R} \right| \angle T \quad (2.7)$$

## 2.2. İki Bara Ölçümlerini Kullanan Arıza Yeri Bulma Algoritmaları

### 2.1.1. Basit arıza gerilimi eşitliği algoritması

Şekil 2.1'de arıza noktasındaki arıza gerilimine iki baradan da bakıldığında;

$$V_F = V_S - d Z_L I_S \quad (2.8)$$

$$V_F = V_R - (1-d) Z_L I_R \quad (2.9)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.9) ve Denklem (2.8) birbirine eşittir;

$$V_R - (1-d)Z_L I_R = V_S - dZ_L I_S \quad (2.10)$$

Arıza uzaklığı  $d$ , Denklem (2.10)'dan çekildiğinde [45];

$$d = \frac{V_S - V_R + I_R Z_L}{Z_L (I_S + I_R)} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'den arıza uzaklığı elde edilir.

### 2.1.2. Asimetrik arıza yeri bulma algoritması

Arıza yeri bulma algoritmalarında ölçülen akım ve gerilim değerleri, sadece fazörel olarak değil, fazörel değerleri simetrik bileşenlere ayırarak da kullanılabilirler. Simetrik bileşenler kullanılarak, arıza yeri tespitinde sıfır, pozitif ve negatif bileşenlerin sonuca etkisi dikkate alınmalıdır. Sıfır bileşen değerleri, genellikle kullanılmak istenmez bunun nedeni havai hatlarda sıfır bileşen değerlerinin belirsiz olarak düşünülmesidir. Ayrıca pozitif simetrik bileşenlerde, hattın şönt admitans etkisi daha fazla olduğundan negatif simetrik bileşenlerin kullanımı tercih edilir. Ancak hesaplamaları daha basite indirgediğinden, sıfır bileşen değerleri hesaba katılmadan sadece negatif ve pozitif bileşen değerleriyle arıza yeri bulma metodu daha yaygındır [8]. Bu algoritmada arıza yeri gerilimi eşitliği ve hattın negatif ve pozitif bileşenleri kullanılarak asimetrik arızalar için bir algoritma oluşturulmuştur (pozitif ve negatif hat empedansları eşit alınmıştır);

$$V_S^1 - dZ_L I_S^1 = V_R^1 - (1-d)Z_L I_R^1 \quad (2.12)$$

$$V_S^2 - dZ_L I_S^2 = V_R^2 - (1-d)Z_L I_R^2 \quad (2.13)$$

Denklem (2.12) ve Denklem (2.13) çözülerek Denklem (2.14) ve Denklem (2.15) elde edilir;

$$dZ_L = \frac{(V_S^1 - V_R^1)I_R^2 - (V_S^2 - V_R^2)I_R^1}{I_S^1 I_R^2 - I_S^2 I_R^1} \quad (2.14)$$

$$(1-d)Z_L = \frac{(V_S^1 - V_R^1)I_S^2 - (V_S^2 - V_R^2)I_S^1}{I_S^1 I_R^2 - I_S^2 I_R^1} \quad (2.15)$$

Bu iki empedansın toplamı ile toplam hat empedansı Denklem (2.16) de gösterildiği gibi elde edilir;

$$dZ_L + (1-d)Z_L = Z_L \quad (2.16)$$

Denklem (2.14) ve Denklem (2.15)'i Denklem (2.16)'da yerine koyarak  $Z_L$  elde edilir;

$$Z_L = \frac{(V_S^1 - V_R^1)(I_R^2 + I_S^2) - (V_S^2 - V_R^2)(I_R^1 + I_S^1)}{I_S^1 I_R^2 - I_S^2 I_R^1} \quad (2.17)$$

Denklem (2.17)'yi Denklem (2.14)'te yerine yazarak arıza yeri  $d$  elde edilir [11];

$$d = \frac{(V_S^1 - V_R^1)I_R^2 - (V_S^2 - V_R^2)I_R^1}{(V_S^1 - V_R^1)(I_R^2 + I_S^2) - (V_S^2 - V_R^2)(I_R^1 + I_S^1)} \quad (2.18)$$

Bu arıza yeri bulma algoritması, pozitif ve negatif bileşenleri beraber kullanarak hesaplamaları basitleştirip, yüksek isabet ile arıza yeri tahmininde bulunması amaçlanmıştır, ancak algoritmanın güç sistemlerinde simetrik arıza yeri bulma algoritmalarıyla beraber kullanılmak zorunda olduğu da göz ardı edilmemelidir.

### 2.1.3. Negatif bileşenler ile arıza yeri bulma algoritması

Negatif bileşenler ile arıza yeri bulma algoritması, asimetrik arıza yeri bulma algoritması gibi sadece asimetrik arızalar için geliştirilmiştir ve sadece negatif simetrik bileşenler kullanılarak arıza yeri hesaplayabilmektedir. Negatif bileşen değerlerinin kullanılması ile, arıza öncesi yük, arıza direnci, sıfır bileşen ortak empedansı gibi arıza yeri bulma algoritmalarının hata oranlarını arttıran bileşenlerin etkisi azaltılmış olur.

Sadece negatif bileşenlerin kullanıldığı algorithmada, Denklem (2.13)'e ek olarak bara gerilimleri ölçüm olarak alınmamış, kaynak empedansları yardımıyla hesaplanılarak algorithmaya dahil edilmiştir;



$$-(Z_S^2 + dZ_L^2)I_S^2 = -(Z_R^2 + (1-d)Z_L^2)I_R^2 \quad (2.19)$$

Denklem (2.19)'da d değeri çekilirse [9, 11, 46];

$$d = \frac{-Z_S^2 I_S^2 + Z_R^2 I_R^2 + Z_L^2 I_R^2}{Z_L^2 (I_R^2 + I_S^2)} \quad (2.20)$$

Denklem (2.20), arıza uzaklığını bulmak için yeterlidir ancak bu denklemin çözümü için ikinci bir yöntem de vardır, Denklem (2.19)  $I_R^2$  'nin genliğine eşit olacak hale getirilirse, oluşan bu denklemin kökleri alınarak da çözüm elde edilir.

#### 2.1.4. Simetrik arıza yeri bulma algoritması

Simetrik arızalar, sıfır ve negatif bileşenleri içermediğinden sadece pozitif bileşenlerin irdelenmesi ile sonuca ulaşılabilir. Bu algoritmada, hattın iki ucundan hesaplanan hat empedanslarının uzaklıklardan dolayı genliği farklı olsa da, hattın homojen olduğu durumlarda hesaplanan açılar eşittir. Algoritma, bu eşitliği kullanarak arıza direncini elde etmekte ve buna bağlı olarak sonuca ulaşmaktadır.

Denklem (2.12) deki eşitliğin, iki tarafı da arıza gerilimine eşit olduğundan;

$$V_S^1 - dZ_L I_S^1 - V_F^1 = 0 \quad (2.21)$$

$$V_R^1 - (1-d)Z_L I_R^1 - V_F^1 = 0 \quad (2.22)$$

Arıza akımı, S ve R baralarından ölçülen akımların toplamı olduğuna göre arıza gerilimi;

$$V_F^1 = R_F (I_R^1 + I_S^1) \quad (2.23)$$

Denklem (2.21), Denklem (2.22)'de Denklem (2.23) yerine yazıldığında aşağıdaki iki denklemi elde ederiz;

$$dZ_L = \frac{V_S^1}{I_S^1} - \frac{I_R^1 + I_S^1}{I_S^1} R_F \quad (2.24)$$

$$(1-d)Z_L = \frac{V_R^1}{I_R^1} - \frac{I_R^1 + I_S^1}{I_R^1} R_F \quad (2.25)$$

Kolaylık olması açısından, Denklem (2.24) ve Denklem (2.25) aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$dZ_L = (a_1 + b_1 R_F) + j(a_2 + b_2 R_F) \quad (2.26)$$

$$(1-d)Z_L = (c_1 + d_1 R_F) + j(c_2 + d_2 R_F) \quad (2.27)$$

Burada;

$$a_1 = \operatorname{Re} \left[ \frac{V_S^1}{I_S^1} \right], \quad a_2 = \operatorname{Im} \left[ \frac{V_S^1}{I_S^1} \right]$$

$$b_1 = \operatorname{Re} \left[ -\frac{I_S^1 + I_R^1}{I_S^1} \right], \quad b_2 = \operatorname{Im} \left[ -\frac{I_S^1 + I_R^1}{I_S^1} \right]$$

$$c_1 = \operatorname{Re} \left[ \frac{V_R^1}{I_R^1} \right], \quad c_2 = \operatorname{Im} \left[ \frac{V_R^1}{I_R^1} \right]$$

$$d_1 = \operatorname{Re} \left[ -\frac{I_S^1 + I_R^1}{I_R^1} \right], \quad d_2 = \operatorname{Im} \left[ -\frac{I_S^1 + I_R^1}{I_R^1} \right]$$

Denklem (2.26)'da ve Denklem (2.27)'deki empedanslar, arıza noktası ile baralar arasındaki empedanslardır. Eğer bütün iletim hattı, tek bir iletken tipinden oluştuğu varsayılırsa, bu empedansların açıları eşit olacaktır. Eğer bu iki empedansın tanjantı alınırsa;

$$\tan(\theta) = \frac{a_2 + b_2 R_F}{a_1 + b_1 R_F} = \frac{c_2 + d_2 R_F}{c_1 + d_1 R_F} \quad (2.28)$$

Denklem (2.29)'dan iki farklı  $R_F$  değeri elde edilir. Bu  $R_F$  değerleri, Denklem (2.28)'deki eşitliklerden herhangi birinde uygulandığında iki farklı açı elde edilir, hat karakteristikleri bilindiğine göre, hat karakteristiğine yakın olan açı doğru kabul edilir ve bu açıyı sağlayan  $R_F$  değeri baz alınarak işlemler yürütülür.

Artık  $R_F$  bilindiğine göre Denklem (2.26) ve Denklem (2.27)'den arıza uzaklığı elde edilir [11];

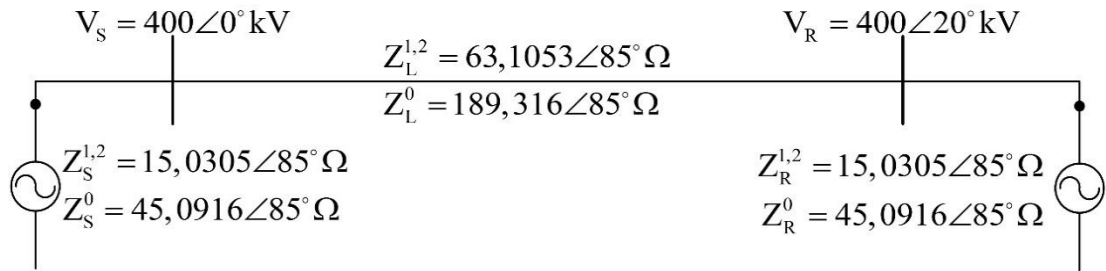
$$d = \frac{(a_1 + b_1 R_F) + j(a_2 + b_2 R_F)}{(c_1 + d_1 R_F) + j(c_2 + d_2 R_F) + (a_1 + b_1 R_F) + j(a_2 + b_2 R_F)} \quad (2.29)$$

### 3. EMPEDANSA DAYALI ARIZA YERİ BULMA ALGORİTMALARININ FARKLI TEST SİSTEMLERİNDE UYGULANMASI

Bölüm 2’de ele alınan algoritmalar bu bölümde homojen, homojen olmayan ve orta uzun iletim hattı modeli (pi eşdeğer devresi) kullanılmış sistemlerde farklı arıza uzaklığı, arıza direnci ve arıza tipleri ile test edilerek, algoritmanın farklı etkenler altındaki hata oranları belirlenecektir. Bu sayede farklı durumlarda ve sistemlerde, hangi arıza algoritmasının kullanılmasının daha uygun olacağının analizi yapılabilecektir. Yapılan testler için, örnekleme frekansı 2 kHz alınarak, arıza anı 0,02 sn ve toplam simülasyon süresi 0,14 sn olarak test sistemleri oluşturulmuştur. Test sistemleri DigSILENT’te modellenip, analiz edilmiş olup, bu analizler sonucunda elde edilen baraların akım ve gerilim değerleri, MATLAB kullanılarak işlenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

#### 3.1. Homojen Test Sistemi

Homojen sistem, kaynak empedanslarının açısının, hat empedansı açısına eşit olma durumu olarak açıklanabilir. [9, 11, 16, 44] kaynaklarına göre uyarlanan test sistemi, Şekil 3.1’de verildiği gibi, Thevenin eşdeğeri ile temsil edilen iki farklı şebekeyi birbirine bağlayan iletim hattını içermektedir.



Şekil 3.1. Homojen test sistemi

Arıza uzaklığının etkisini belirlemek için hat üzerinde yakın baradan seçili uzaklıklarda kısa devreler oluşturulmuş, bu durumlardaki tek bara ve çift baradan akım ve gerilim bilgileri alınmıştır. Bu bilgiler her bir algoritma için kullanılarak,

arıza yeri ve hata oranları yüzdesi hesaplanmıştır. Alınan sonuçlar arıza direnci olmadığı durum için Tablo 3.1’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.1. Homojen test sisteminde farklı uzaklıklardaki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Uzaklığı
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,0461	0,0313	0,0461	0,0461	20 km
	0,1073	0,0775	0,1073	0,1073	40 km
	0,1435	0,1062	0,1435	0,1435	50 km
	0,1835	0,1385	0,1835	0,1835	60 km
	0,2747	0,2140	0,2747	0,2747	80 km
Basit Reaktans Algoritması	0,0288	0,0316	0,0288	0,0288	20 km
	0,0568	0,0786	0,0568	0,0568	40 km
	0,0705	0,1079	0,0705	0,0705	50 km
	0,0840	0,1410	0,0840	0,0840	60 km
	0,1105	0,2188	0,1105	0,1105	80 km
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,0313	-	0,8808	20 km
	-	0,0775	-	1,3621	40 km
	-	0,1062	-	1,5223	50 km
	-	0,1385	-	1,6471	60 km
	-	0,2140	-	1,8218	80 km
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0153	0,0156	0,0153	0,0153	20 km
	0,0062	0,0066	0,0062	0,0062	40 km
	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	50 km
	0,0075	0,0073	0,0075	0,0075	60 km
	0,0254	0,0255	0,0254	0,0254	80 km
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0002	0,0001	0,0001	20 km
	-	0,0003	0,0001	0,0001	40 km
	-	0,0003	0,0001	0,0001	50 km
	-	0,0003	0,0001	0,0001	60 km
	-	0,0002	0,0001	0,0001	80 km
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0161	0,0154	0,0367	20 km
	-	0,0068	0,0064	0,0100	40 km
	-	0,0004	0,0001	0,0002	50 km
	-	0,0073	0,0073	0,0083	60 km
	-	0,0258	0,0253	0,0189	80 km
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,0222	-	-	-	20 km
	0,0317	-	-	-	40 km
	0,0354	-	-	-	50 km
	0,0334	-	-	-	60 km
	0,0225	-	-	-	80 km

Tablo 3.1’de görüldüğü gibi tek baranın ölçümlerini kullanan algoritmalara karşı, iki bara ölçümlerini kullanan algoritmaların doğruluk yüzdesinin daha iyi olduğu

görülmektedir. Geliştirilmiş Takagi algoritması dışındaki algoritmalarda, hata oranının %1'in altında olduğu görülmektedir. Tek bara ölçümlerini kullanan algoritmaların arıza yeri uzaklığı arttıkça hata oranlarının arttığı ancak iki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda ise hata oranlarının arıza uzaklığından bağımsız değiştiği gözlenmektedir.

Tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda, görülebileceği gibi geliştirilmiş Takagi algoritması en kötü sonuçları vermekte ve faz-toprak arıza tiplerinde Takagi algoritması ile aynı sonuçları verdiği için bu test senaryosunda etkisiz kaldığı görülmektedir. Bu test sisteminden geliştirilmiş Takagi algoritmasının, faz-toprak arızası dışındaki arıza tipleri için uygun olmadığı görülmektedir. Takagi algoritması, arıza öncesi akım değerlerini de kullanmasına karşın, basit reaktans yönteminden daha yüksek hata oranlarına sahip olduğu görülmektedir.

İki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda, elde edilen maksimum hata oranı %0,4 değerinin altındadır. En kötü sonuçları, simetrik arıza yeri bulma algoritması ile hesaplanmış olup bu algoritmaya alternatif olarak basit arıza gerilimi eşitliği algoritması kullanılabileceği elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır. Basit arıza gerilimi eşitliği algoritması, simetrik arızalarda en iyi sonuçları elde etmekle beraber diğer iki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarındaki gibi belli arıza tiplerine bağımlı değildir ve fazörel değerleri simetrik bileşenlerine ayırma ihtiyacını da ortadan kaldırır. Asimetrik arızalarda ise, arıza uzaklığına en yakın sonuçları, negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritması ile elde edildiği görülmektedir. Asimetrik arıza yeri bulma algoritması ise genel olarak doğruya yakın sonuçlar verse de elde edilen sonuçlar diğer iki bara ölçümleri kullanan algoritmaların sonuçlarından genel olarak daha fazla hata oranına sahiptir.

Arıza direncinin etkisini belirlemek için, arıza yeri sabit (50 km) tutulup, çeşitli arıza tiplerinde arıza direnç değerleri değiştirilerek her bir algoritma için hata oranları hesaplanmıştır. Arıza dirençleri 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , 20  $\Omega$  ve 30  $\Omega$  olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2. Homojen test sisteminde farklı arıza dirençlerindeki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Direnci
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,0540	0,0616	0,0896	0,0540	1 $\Omega$
	0,0029	0,0006	0,0019	0,0029	10 $\Omega$
	0,0058	0,0020	0,0029	0,0058	20 $\Omega$
	0,0086	0,0039	0,0043	0,0086	30 $\Omega$
Basit Reaktans Algoritması	0,5255	0,3934	0,2287	0,5255	1 $\Omega$
	6,5516	3,6454	2,9816	6,5516	10 $\Omega$
	15,9307	8,1682	6,5516	15,9307	20 $\Omega$
	-	-	-	-	30 $\Omega$
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,0616	-	13,9363	1 $\Omega$
	-	0,0001	-	-	10 $\Omega$
	-	0,0002	-	-	20 $\Omega$
	-	0,0002	-	-	30 $\Omega$
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	1 $\Omega$
	0,0000	0,0002	0,0001	0,0000	10 $\Omega$
	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	20 $\Omega$
	0,0001	0,0002	0,0000	0,0001	30 $\Omega$
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0003	0,0001	0,0001	1 $\Omega$
	-	0,0003	0,0001	0,0001	10 $\Omega$
	-	0,0003	0,0001	0,0001	20 $\Omega$
	-	0,0003	0,0001	0,0001	30 $\Omega$
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0004	0,0001	0,0002	1 $\Omega$
	-	0,0005	0,0002	0,0003	10 $\Omega$
	-	0,0006	0,0002	0,0003	20 $\Omega$
	-	0,0007	0,0002	0,0004	30 $\Omega$
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,1705	-	-	-	1 $\Omega$
	3,5559	-	-	-	10 $\Omega$
	2,2189	-	-	-	20 $\Omega$
	10,6875	-	-	-	30 $\Omega$

Tablo 3.2’de gösterilen sonuçlar, tek bara ölçümlerini kullanan algoritmaların genel olarak sadece çok düşük arıza dirençlerinde kullanılabileceğini göstermektedir. İki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda simetrik arıza yeri bulma algoritması dışında, yüksek arıza dirençlerinde bile sonuca çok yakın değerler elde edebileceği görülmektedir.

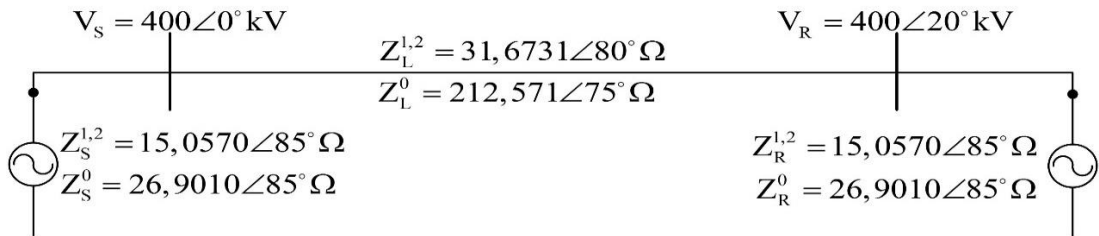
Tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda, genel duruma bakıldığında hata oranlarının genel olarak arıza direnciyle doğrusal olarak arttığı gözlemlenir. Basit reaktans algoritmasında, çok düşük arıza direnci değerlerinde hata oranı kabul edilebilir sınırlar içindedir. Takagi algoritmasının hata oranlarının ne kadar iki bara ölçümüne dayalı algoritmalarından fazla olsa da %0,1 hata oranının altında sonuçlar

elde etmesiyle yüksek doğruluk yakaladığı görülüyor. Geliştirilmiş Takagi algoritmasında ise, elde edilen sonuçlar irdelendiğinde faz-faz-toprak arıza tiplerinde hata oranlarının kabul edilebilir değerlerin çok üstünde olduğu görülmektedir ancak faz-toprak arızalarındaki arıza yerini bulmadaki doğruluğu neredeyse iki bara ölçümünü kullanan algoritmalar kadar yüksektir.

İki bara ölçümlerini kullanan algoritmalarda, pozitif bileşenleri kullanan algoritmaların arıza direnci artışından etkilendiği gözlenmektedir. Bu etki, en çok simetrik arıza yeri bulma algoritmasında gözlenir, algoritmanın formülasyonu sadece pozitif bileşenlerden oluştuğundan arıza direncine karşı hassastır, bu nedenle doğrusal bir artış göstermiş ve hata oranı Takagi algoritmasının bile çok üstünde kalmıştır. Bu algoritmaya ek olarak asimetrik arıza yeri bulma algoritmasında da doğrusal bir artış gözlenmektedir, ancak bu algoritmanın formülasyonu negatif bileşenler ağırlıklı olduğundan etki yok sayılabilecek orandadır. Basit arıza gerilimi eşitliği algoritması ve negatif bileşenler ile arıza yeri bulma algoritmasının verdiği sonuçların arıza direncinden etkilenmediği ve diğer algoritmalar ile kıyaslandığında gerçek değere çok daha yakın sonuçlar elde ettiği görülmektedir.

### 3.2. Homojen Olmayan Test Sistemi

Homojen olmayan test sistemleri, kaynaklar ve hattın açılarının aynı değerde olmadığı sistemlerdir. Bu farklılık baralardan ölçülen akım ve gerilim değerlerinin açı farkının iki bara içinde farklı değerde olmasına yol açar. Bu açılar arası farkın dikkate alındığı algoritmalarda arıza yeri bulma doğruluğunu etkilemezken, diğer algoritmalarda bir sapmaya yol açar. [9, 11, 16, 44] kaynaklarına göre uyarlanan test sistemi, Şekil 3.2’de belirtildiği gibidir.



Şekil 3.2. Homojen olmayan test sistemi

Homojen olmayan test sistemi bir veya iki baradan alınan ölçüm değerlerini kullanan algoritmalar için ilk olarak 20 km, 40 km, 50 km, 60 km, 80 km arıza yeri uzaklıkları



için test edilmiştir. Tablo 3.3’de bu arıza uzaklıklarındaki farklı arıza tiplerine göre hata oranları yüzde olarak verilmektedir.

Tablo 3.3. Homojen olmayan test sisteminde farklı uzaklıklardaki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Uzaklığı
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,0279	0,0058	0,0279	0,0279	20 km
	0,0443	0,0067	0,0443	0,0443	40 km
	0,0514	0,0073	0,0514	0,0514	50 km
	0,0584	0,0080	0,0584	0,0584	60 km
	0,0723	0,0105	0,0723	0,0723	80 km
Basit Reaktans Algoritması	0,0170	0,0058	0,0170	0,0170	20 km
	0,0246	0,0068	0,0246	0,0246	40 km
	0,0274	0,0075	0,0274	0,0274	50 km
	0,0298	0,0083	0,0298	0,0298	60 km
	0,0340	0,0109	0,0340	0,0340	80 km
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,0057	-	0,2184	20 km
	-	0,0066	-	0,2626	40 km
	-	0,0072	-	0,2739	50 km
	-	0,0079	-	0,2833	60 km
	-	0,0104	-	0,3065	80 km
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0005	0,0017	0,0005	0,0005	20 km
	0,0007	0,0006	0,0007	0,0007	40 km
	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	50 km
	0,0005	0,0009	0,0005	0,0005	60 km
	0,0005	0,0026	0,0005	0,0005	80 km
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0138	0,0163	0,0189	20 km
	-	0,0052	0,0064	0,0072	40 km
	-	0,0012	0,0004	0,0004	50 km
	-	0,0033	0,0067	0,0076	60 km
	-	0,0172	0,0260	0,0307	80 km
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0025	0,0003	0,0012	20 km
	-	0,0011	0,0005	0,0009	40 km
	-	0,0001	0,0000	0,0000	50 km
	-	0,0015	0,0007	0,0008	60 km
	-	0,0043	0,0005	0,0011	80 km
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,0032	-	-	-	20 km
	0,0023	-	-	-	40 km
	0,0865	-	-	-	50 km
	0,0047	-	-	-	60 km
	0,0010	-	-	-	80 km

Sistemdeki açı farkı etkisini, en çok negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritmasında gösterdiği, hata oranının artmasından anlaşılmaktadır. Diğer yöntemlerde, değişimler gözlemlense de genel duruma bakıldığında beklenenin aksine bir önceki test

sisteminden daha iyi sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun nedenleri olarak bu senaryonun arıza dirençsiz olması, hat ve kaynak empedansları büyüklükleri ve açıları verilebilir.

Tek bara ölçümüne dayalı algoritmalarda, hata oranları beklenildiği gibi arıza yeri ile doğru orantılı olarak bir artış göstermektedir. Basit reaktans yöntemi, genel olarak en iyi sonuçlara sahip, Takagi yöntemi ise arıza öncesi akımı kullanmasına rağmen hata oranı az olsa da diğer algoritmalarından daha fazla yanılma payına sahiptir. Geliştirilmiş Takagi algoritması ise, tek bara ölçümüne dayalı algoritmalarda faz-toprak arıza tipinde en iyi sonucu vermektedir.

İki bara ölçümüne dayalı algoritmalarda, uzaklığa bağlı bir hata oranı artışı gözlenmektedir. Asimetrik arızalarda, basit arıza gerilimi eşitliği algoritması ve asimetrik arıza yeri bulma algoritması yüksek doğruluk oranı ile sonuca ulaşmaktadır. Simetrik arızalarda ise, genel olarak sonuçlar incelendiğinde bu arıza tipinde, simetrik arıza yeri bulma algoritması yerine basit arıza gerilimi eşitliği algoritmasının kullanılmasının hem düşük hata oranlarına sahip olması, hem de her arıza tipinde kullanılması nedeniyle daha uygun olacağı görülmektedir. Negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritması, tek bara ölçümüne dayalı algoritmalar ile karşılaştırıldığında daha düşük hata oranıyla arıza yeri tespiti yaparken diğer iki bara ölçümüne dayalı algoritmalar ile karşılaştırıldığında gerçek değere daha uzak arıza yeri tespiti gerçekleştirmektedir.

Algoritmaların, homojen olmayan test sisteminde arıza direncine göre davranışlarını incelemek, için 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , 20  $\Omega$  ve 30  $\Omega$  değerlerinde ki arıza dirençleri ile farklı arıza tiplerinde algoritmalar denenerek sonuçları karşılaştırıldı. Hata oranları yüzde cinsinden Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. Homojen olmayan test sisteminde farklı arıza dirençlerindeki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Direnci
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,0103	0,1553	0,0229	0,0103	1 $\Omega$
	0,0086	1,1844	0,0043	0,0086	10 $\Omega$
	0,0181	3,3014	0,0086	0,0181	20 $\Omega$
	0,0291	5,1816	0,0132	0,0291	30 $\Omega$

Tablo 3.4.(Devam) Homojen olmayan test sisteminde farklı arıza dirençlerindeki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Direnci
	abc	at	bc	bct	
Basit Reaktans Algoritması	1,1245	0,4300	0,5440	1,1245	1 $\Omega$
	14,9103	4,8806	6,3806	14,9103	10 $\Omega$
	-	-	-	-	20 $\Omega$
	-	-	-	-	30 $\Omega$
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,0030	-	16,9799	1 $\Omega$
	-	1,2123	-	-	10 $\Omega$
	-	0,0001	-	-	20 $\Omega$
	-	0,0001	-	-	30 $\Omega$
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	1 $\Omega$
	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	10 $\Omega$
	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	20 $\Omega$
	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	30 $\Omega$
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0012	0,0004	0,0004	1 $\Omega$
	-	0,0152	0,0004	0,0006	10 $\Omega$
	-	0,0017	0,0005	0,0008	20 $\Omega$
	-	0,0019	0,0006	0,0009	30 $\Omega$
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0001	0,0000	0,0000	1 $\Omega$
	-	0,0087	0,0000	0,0001	10 $\Omega$
	-	0,0002	0,0001	0,0001	20 $\Omega$
	-	0,0002	0,0001	0,0001	30 $\Omega$
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,4290	-	-	-	1 $\Omega$
	5,3881	-	-	-	10 $\Omega$
	5,4728	-	-	-	20 $\Omega$
	9,0800	-	-	-	30 $\Omega$

Test senaryosu, basit reaktans algoritmasının sadece çok düşük arıza direnci durumlarında çalışabildiğini kanıtlayarak, arıza direnci ile doğrusal olarak hata oranlarının arttığını göstermiştir. Buna ek olarak, homojen test sistemiyle karşılaştırıldığında, bir önceki senaryoda sadece negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritması üzerinde görülen açı farkı etkisi, Takagi algoritması üzerinde hata oranının artmasına yol açmıştır. Bir önceki senaryoda, arıza direncinin dikkate alınmaması ve Takagi algoritmasının açı eşitliğini kullanarak arıza direncini teorik olarak elemesi, iki senaryo arasındaki Takagi algoritmasının sonuç değişimine neden olur.

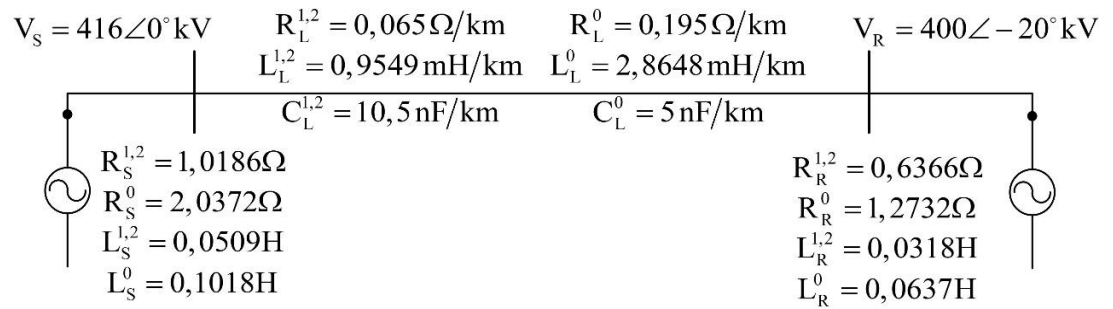
Tek bara ölçümüne dayalı algoritmaları, bu sistemlerde kullanabilmek için Takagi algoritmasını ve faz-toprak arızalarında ise geliştirilmiş Takagi algoritmasının kullanılması gerekmektedir. Takagi algoritması faz-toprak arızalarında yüksek hata

oranı verirken, geliştirilmiş Takagi algoritması ise sadece faz-toprak arızalarında gerçek arıza uzaklığına yakın değerler elde edebilmektedir. Ancak buna rağmen hata oranları %1'in üstünde olmaktadır.

İki bara ölçümüne dayalı algoritmaların ise, simetrik arıza yeri bulma algoritması dışında doğruluk oranları yüksektir. Basit arıza gerilimi eşitliği algoritması, bütün arıza tipi ve arıza dirençlerinde maksimum %0,0002 hata oranı ile bu test senaryosunun en düşük hata oranını elde etmiştir.

### 3.3. Homojen Olmayan Test Sistemi (Orta Uzun Hat Modeli - Pi Eşdeğer Devresi)

Bu test sisteminde, iletim hattının kapasitif etkisi ihmal edilmemiş olup, orta uzunlukta iletim hattı modeli (pi eşdeğer devresi) baz alınarak hat modeli oluşturulmuştur [11]. Bu test sisteminin başlıca amacı, admitans etkisinin algoritmalara etkisini irdelemektir. Algoritmalar farklı hat modelleri için geliştirilebilecek olsa da, bu durum formülasyon kısmını daha karmaşık hale getirecek, sistemden ek bilgiler talep ederek hesaplama yükünü arttıracaktır. Bunun için doğru sonuca en az hata oranıyla ulaşan ve arıza direnci, hat modeli gibi değişkenlerden minimum seviyede etkilenecek bir metoda ulaşmak arıza yeri bulma algoritmalarının temel amacıdır. Test sistemi Şekil 3.3'te verilmiştir, test sisteminde iletim hattı 100 km olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Homojen olmayan test sistemi (pi modeli)

Bu test senaryosundaki temel amaç, özellikle tek bara ölçümlerini kullanan algoritmaların uzaklığa bağlı olarak hattın admitansından ne düzeyde etkileneceği ve buna bağlı olarak hata oranlarının değişimini gözlemlemektir. Değerlendirme sonuçları Tablo 3.5'te verilmiştir. Test sistemi, ilk önce 20 km, 40 km, 50 km, 60 km

ve 80 km uzaklıklarında farklı arıza tipleri için analiz edilmiş ve her bir algoritma için bu durumlar değerlendirilmiştir.

Tablo 3.5. Homojen olmayan test sisteminde (orta uzun hat modeli - pi eşdeğer devresi) farklı uzaklıklardaki farklı arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Uzaklığı
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,0025	0,0041	0,0025	0,0025	20 km
	0,0272	0,0015	0,0272	0,0272	40 km
	0,2755	0,1423	0,2755	0,2755	50 km
	0,0969	0,0965	0,0969	0,0969	60 km
	0,2581	0,2775	0,2581	0,2581	80 km
Basit Reaktans Algoritması	0,0173	0,0041	0,0173	0,0173	20 km
	0,0045	0,0010	0,0045	0,0045	40 km
	0,2379	0,2210	0,2379	0,2379	50 km
	0,0668	0,0929	0,0668	0,0668	60 km
	0,2119	0,2666	0,2119	0,2119	80 km
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,0041	-	-	20 km
	-	0,0012	-	-	40 km
	-	0,1463	-	-	50 km
	-	0,0964	-	-	60 km
	-	0,2786	-	-	80 km
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0828	0,0886	0,0828	0,0828	20 km
	0,0474	0,0798	0,0474	0,0474	40 km
	0,1055	0,1428	0,1055	0,1055	50 km
	0,0246	0,0184	0,0246	0,0246	60 km
	0,0709	0,0915	0,0709	0,0709	80 km
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0256	0,0621	0,0692	20 km
	-	0,0240	0,0197	0,0158	40 km
	-	0,0043	0,0016	0,0001	50 km
	-	0,0235	0,0183	0,0175	60 km
	-	0,0336	0,0640	0,0704	80 km
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0622	0,0683	0,0923	20 km
	-	0,0474	0,1382	0,2731	40 km
	-	0,2870	0,1005	0,2217	50 km
	-	0,0350	0,0223	0,0362	60 km
	-	0,0268	0,0659	0,0728	80 km
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,0319	-	-	-	20 km
	0,0135	-	-	-	40 km
	0,2787	-	-	-	50 km
	0,0559	-	-	-	60 km
	0,0973	-	-	-	80 km

Daha önceki test sistemleri ile karşılaştırıldığında, bu test sisteminde, hat admitansı pi eşdeğer devre modeli baz alınarak modellenmiştir. Bu admitans, Şekil 3.3 ile de anlaşılacağı gibi uzaklığa bağlı bir etkidir. Özellikle tek bara ölçümüne dayalı

algoritmelerde uzaklık arttıkça hata oranları artışından admitansın etkisi gözlenebilmektedir. İki bara ölçümüne dayalı algoritmelerde ise bu etki uzaklıklığa bağlı olarak gözlenmez ancak diğer test sistemlerindeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında genel bir hata oranı artışı ile etki anlaşılmaktadır.

Tek bara ölçümüne dayalı algoritmelerde, Takagi algoritması ve geliştirilmiş Takagi algoritması arıza uzaklığı arttıkça arıza yeri sonuçlarının doğruluğu basit reaktans algoritmasının sonuçlarının doğruluğundan daha düşük seviyede kalmaktadır. Basit reaktans algoritmasının arıza dirençsiz, sadece arıza uzaklığı değişimine bağlı bu senaryoda iletim hattının kapasitif admitansından en az seviyede etkilendiği bu gözleme dayanarak söylenebilir.

İki bara ölçümüne dayalı algoritmelerde, hata oranı genel olarak düşük olsa da negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritmasının gerçek arıza yeri uzaklığına daha yakın sonuçlara ulaştığı gözlenmektedir. Negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritmasının Bölüm 3.2'den homojen olmayan sistemlerde diğer iki bara ölçümüne dayalı algoritmelerden daha yüksek hata oranına sahip olduğu Tablo 3.3'ten gözlemlenebilir. Ancak Tablo 3.5'teki sonuçlara göre sadece negatif bileşenleri kullanan algoritma hat admitansından daha az etkilenmiştir.

Algoritmaların, homojen olmayan pi eşdeğer devreli test sisteminde arıza direncine göre davranışlarını incelemek için, 50 km arıza uzaklığında 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$ , 20  $\Omega$  ve 30  $\Omega$  değerlerindeki arıza dirençleri ile farklı arıza tiplerinde algoritmelerden elde edilen sonuçları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Homojen olmayan pi eşdeğer devreli test sisteminde farklı arıza dirençlerindeki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Direnci
	abc	at	bc	bct	
Takagi Algoritması	0,2472	0,0716	0,2542	0,2472	1 $\Omega$
	0,6616	0,3655	0,3900	0,6616	10 $\Omega$
	1,1415	0,7160	0,6616	1,1415	20 $\Omega$
	1,5352	1,0060	0,6108	1,5352	30 $\Omega$

Tablo 3.6.(Devam) Homojen olmayan pi eşdeğer devreli test sisteminde farklı arıza dirençlerindeki çeşitli arıza tipleri için hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Direnci
	abc	at	bc	bct	
Basit Reaktans Algoritması	1,1049	0,8592	0,4434	1,1049	1 $\Omega$
	10,5801	6,1480	5,7863	10,5801	10 $\Omega$
	-	-	-	-	20 $\Omega$
	-	-	-	-	30 $\Omega$
Geliştirilmiş Takagi Algoritması	-	0,1120	-	-	1 $\Omega$
	-	0,0230	-	-	10 $\Omega$
	-	0,0888	-	-	20 $\Omega$
	-	0,1385	-	-	30 $\Omega$
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	0,0597	0,1230	0,0794	0,0597	1 $\Omega$
	0,0045	0,0335	0,0070	0,0045	10 $\Omega$
	0,0119	0,0031	0,0045	0,0119	20 $\Omega$
	0,0197	0,0087	0,4422	0,0197	30 $\Omega$
Negatif Bileşenler ile Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,0032	0,0044	0,0058	1 $\Omega$
	-	0,0071	0,0072	0,0121	10 $\Omega$
	-	0,0094	0,0074	0,0139	20 $\Omega$
	-	0,0101	0,0700	0,0139	30 $\Omega$
Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	-	0,2343	0,0742	0,1538	1 $\Omega$
	-	0,0156	0,0021	0,0073	10 $\Omega$
	-	0,0263	0,0093	0,0535	20 $\Omega$
	-	0,0385	0,3134	0,0685	30 $\Omega$
Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması	0,5487	-	-	-	1 $\Omega$
	0,9691	-	-	-	10 $\Omega$
	5,8025	-	-	-	20 $\Omega$
	14,0705	-	-	-	30 $\Omega$

Test senaryosu, hem hattın kapasitesini hem de arıza direncini dikkate almasıyla algoritmalarda genel olarak diğer test sistemlerine göre bir hata oranı artışına yol açmıştır.

Tek bara ölçümünü kullanan algoritmaların, sonuçları incelendiğinde basit reaktans yöntemi en düşük arıza direncinde bile %1 değerini aşarak, bu test senaryosunun algoritma üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Basit reaktans algoritmasının, bu senaryo için kullanımı yüksek hata oranlarına neden olurken, Takagi yöntemi de %1 hata oranını aştığı görülmektedir. Sadece geliştirilmiş Takagi algoritması, yüksek doğruluk oranını korumaktadır.

Bölüm 3.2’de negatif bileşenli arıza yeri bulma algoritmasının, homojen olmayan sistemlerde arıza yeri bulma sonucundaki isabet oranının düştüğü görülmektedir, ancak Tablo 3.6’da görüldüğü gibi iletim hattının admitansından en az seviyede

etkilendiği gözlenmektedir, ayrıca bu senaryodaki en düşük hata oranları da bu algoritma ile elde edilmiştir. Asimetrik arızalarda, basit arıza gerilimi eşitliği algoritması ve asimetrik arıza yeri bulma algoritması genel duruma bakıldığında birbirine yakın ve yüksek isabetli sonuçlar verirken, simetrik arızalarda basit arıza gerilimi eşitliği algoritmasının simetrik arıza yeri bulma algoritmasına üstün geldiği görölmektedir.



#### 4. SERİ KAPASİTÖRLÜ İLETİM HATLARINDA ARIZA YERİ TESPİTİ

Arıza yeri tespiti, iletim hatlarının işlevsel ve güvenilir olabilmesi için önemli etkenlerdendir. Bölüm 2’de, çoğunlukla kullanılan arıza yeri bulma algoritmaları verilmekte, Bölüm 3’teki simülasyon sonuçları incelendiğinde test sistemindeki en küçük bir değişimin bile bu algoritmaların sonuçlarını ne derece etkileyebildiği görülmektedir. Seri kapasitör gibi, iletim hatlarında sıklıkla kullanılan bir etken söz konusu olduğunda bu algoritmalar kullanılamaz duruma gelecektir.

Seri kapasitörler, iletim hatlarında güç transferi kabiliyetini, geçici transient kararlılığını ve hat kayıplarını iyileştirirler [47, 48]. Seri kapasitörler, metal oksit varistör (MOV) ile birlikte kullanılırlar. MOV, seri kapasitöre paralel bağlanır ve değişken omik direnç etkisi gösterir. MOV’un kullanım amacı, seri kapasitörün üzerinde oluşabilecek aşırı gerilimlerden seri kapasitörü korumaktır. Gerilim yükselmesi durumunda, MOV’un üzerindeki direnç düşerek seri kapasitörden geçecek akımı kendi üstüne alır. MOV lineer olmayan bir bileşendir, MOV’un bu lineer olmayan karakteristiği arıza yeri bulma algoritmalarını doğrudan etkiler ve standart yöntemler kullanıldığında arıza yeri bulma algoritmalarında yüksek hatalı sonuçlara neden olur. İletim hatlarında seri kapasitör kullanımı durumunda, seri kompanzasyonun etkileri ve bunun sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Seri kompanzasyonun etkileri ve sonuçları [20]

Seri Kompanzasyonun Etkileri	Seri Kompanzasyonun Etkilerinin Yol Açağı Sonuçlar
Seri kompanzasyon noktasında ani hat empedansı değişimi	
Aşırı gerilim koruması için MOV kullanılması	-Düşük arıza akımı: empedans=kapasitif reaktans -Aşırı arıza akımı: empedans=paralel kapasitif reaktans + MOV direnci
Gerilim değişimi	Gerilim faz açısının 90°’den fazla değişmesi
Akım değişimi	Akım faz açısının 90°’den fazla değişmesi
Alt harmonik frekans	Hat endüktif reaktansı ve seri kapasitör birleştirilmesi sonucunda üretilir
Dengesiz hat empedansı	Yüklenme veya transpoze olmama durumlarından oluşan dengesiz durumu daha da arttırır

Seri kapasitörlü sistemlerde, arıza analizi yapabilmek için birçok algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmalarından bazıları, arıza öncesi değerleri kullanarak [8], MOV karakteristiğine ihtiyaç duyarak [24] veya sadece simetrik bileşenleri kullanarak [14, 25] arıza yerini tespit etmeye çalışırlar.

Seri kapasitörlü sistemlerde arıza yeri bulma algoritmalarını üç ana başlık altında ifade edebiliriz; yürüyen dalga teorisine dayalı algoritmalar, zaman domenine dayalı hat modeli kullanan algoritmalar ve fazör ölçüm birimine (phasor measurement unit) (PMU) dayalı algoritmalar. Bu üç ana başlık dışında bu genellemeler içinde sayılabilecek ancak işleyiş yapısı olarak daha karmaşık olan ve öğrenme temeline dayanan yapay zeka uygulamaları da vardır. Seri kompanze edilmiş iletim sistemleri için kullanılan bazı algoritmalar ve özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Seri kompanze edilmiş iletim sistemleri için kullanılan bazı algoritmalar ve özellikleri [20]

Makale	Rapor Edilen Algoritma Tipi	Veri Gereksinimi	Dikkate Alınan Test Durumları	Giriş Değişkenleri	Seri Kapasitörün Dikkate Alınma Durumu
Novosel (1996) [49]	Tek baradan alınan ölçümlere dayalı				
	a)Fazörel yaklaşım	1 Periyot	12	-Üç faz akımlar -Boşluk ani akımı -MOV geriliminin koruma tepe değeri	-Goldsworthy (1987) [55] Doğrusallaştırılmış SC-MOV modeli
	b)DDA (Deterministic Differential Approach) yaklaşımı	1 Periyot	12	-Hat akımları	-DDA tabanlı zaman domeninde kompensatör gerilim tahmini
	c)ANN yaklaşımı	1 Periyot veya daha fazlası	12	-Standartlaştırılmış hat akım örnekleri -Hat akımları farkı	-ANN tabanlı kompensatör gerilim tahmini
Girgis (1998) [50]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot veya daha fazlası	Az	-Üç faz akım ve gerilim	-Kalman filtresi tabanlı kompensatör gerilim tahmini
Ghassemi (1998) [51]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	Az	-Gerilim ve akımlar	-Goldsworthy (1987) [55] SC-MOV modeli
Saha (1999) [24]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	1,25 Periyot	1944	-Arıza tipi -Üç faz akım ölçümleri -Üç faz yerel (referans bara) arıza öncesi akım değerleri -Üç faz gerilimleri	-Kapasitör öncesi veya sonrasında oluşabilecek arıza durumu için, iki ayrı algoritma arıza empedansının tahmini için kullanılır

Tablo 4.2.(Devam) Seri kompanze edilmiş iletim sistemleri için kullanılan bazı algoritmalar ve özellikleri [20]

Makale	Rapor Edilen Algoritma Tipi	Veri Gereksinimi	Dikkate Alınan Test Durumları	Giriş Değişkenleri	Seri Kapasitörün Dikkate Alınma Durumu
Sadeh (2000) [30]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	8	-Üç faz akım ve gerilim ölçümleri	-Kapasitör öncesi veya sonrasında oluşabilecek arıza durumu için, iki ayrı algoritma arıza empedansının tahmini için kullanılır
Chi-Shan (2002) [23]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	500	-Üç faz akım ve gerilim ölçümleri (iki baradan)	- Seri kapasitör için bir hesaplama gerektirmiyor -Kapasitör pozisyonundan bağımsız
Cheong (2004) [52]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	5 Periyot (arıza sonrası)	600	-Üç faz akım ve gerilim	Yok
Al-Dabbagh (2005) [53]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	Arıza öncesi ve sonrası veriler	90	-Üç faz akım ve gerilim	-Seri kompanzasyon için bir model belirlendi -Kapasitör koruma seviyesinde akım tabanlı MOV iletimi tahmini uygulanır
Sadeh (2010) [31]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	108	-Üç faz akım ve gerilim	Yok
Yusuff (2011) [38]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	1,5 Periyot arıza sonrası sinyal	60	-Üç faz gerilim	Yok
Ahsae (2011) [32]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	66	-Üç faz akım ve gerilim	Yok
Apostolopoulos (2012) [54]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	200	-Üç faz akım (iki baradan) -Üç faz gerilim (uzak baradan)	-Arıza yeri bulma, iki model bileşen matrisleri ile tanımlandı
Abdelaziz (2013) [27]	-İki baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	az	-Üç faz akım ve gerilim ölçümleri (iki baradan)	-Küçük kareler yöntemi tabanlı SC-MOV modeli
Moravej (2012) [41]	-Tek baradan alınan ölçümlere dayalı	1 Periyot	6280	-Üç faz akım ve gerilim	-Destek vektör regresyonu tabanlı yaklaşım

Yürüyen dalga teorisine dayalı algoritmalar güç sistemi yapılandırmalarından bağımsızdır [23]. Bu nedenle bu algoritmalar seri kapasitörlü iletim hatları için de uygundur. Ayrıca söz konusu algoritmalar, arıza tipinden, arıza direncinden ve arıza başlangıç açısından bağımsız olacak şekilde geliştirilmiştir. Buna ek olarak, iki bara arasındaki senkronizasyon problemini ortadan kaldırmak için, genelde tek baradan alınan ölçümleri kullanılır. Yüksek örnekleme frekansı talebi ve arıza yerinden ve uzak baradan yansıyan dalgaların seçiminde karşılaşılan zorluklar, bu algoritmaların olumsuz özelliklerindendir.

Zamana dayalı hat modelini baz alan algoritmalar, seri kapasitörlü iletim hatları için de geliştirilmiştir. Bu geliştirilmiş algoritmaların bazıları arıza direnci, arıza başlangıç açısı gibi değişkenlerden etkilenmezler. Ancak bu tip algoritmalar yakın ve uzak baradan senkron akım ve gerilim ölçümleri talep ederler.

PMU tabanlı algoritmalar, basit yapıları nedeniyle tercih edilirler, ayrıca güç sisteminin ihtiyacına göre geliştirmeye açık bir yapıları da vardır. Tek veya iki baradan alınan ölçüm değerlerini kullanırlar. Bu algoritmalar doğruluk oranlarını, arıza öncesi veriler, kaynak empedansları, akım tabanlı MOV empedansı değerleri gibi değişkenler kullanılarak arttırılabilirler.

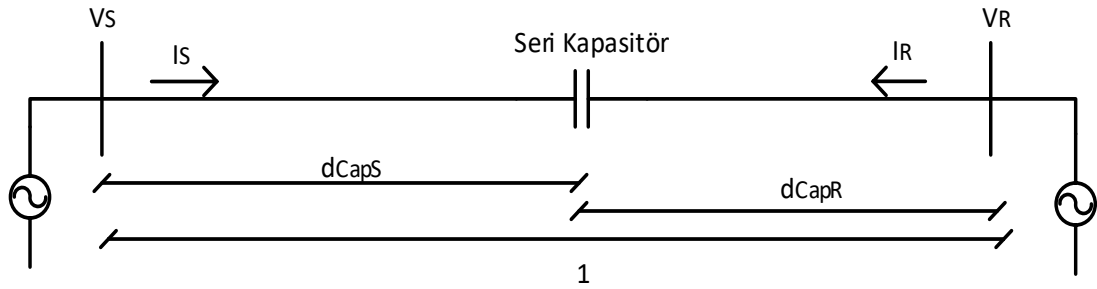
Yapay zeka uygulamaları karar verme, öğrenme ve karşılaştırma gibi insan davranışlarının makineler tarafından da uygulanabilir olmasını amaçlar. Kesinlik, adaptasyon ve gelişim bu tip algoritmaların önemli noktalarındandır. Ancak bu algoritmalar öğrenme zamanı ve belirli miktarda veri tabanı talep eder, ayrıca kompleks yapıdadırlar. Bu algoritmalar, tek veya iki bara verilerini kullanabilir. Arıza yeri tespitinde hibrit teknikler kullanılır. Aşırı öğrenme makinesi, destek vektör regresyonu, adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi ve parçacık sürü optimizasyonu ile dalgacık dönüşümleriyle birlikte kullanılması, hibrit yöntemlere örnek gösterilebilir.

Zaman domeninde, başka bir arıza yeri bulma algoritması da [53] geliştirilmiştir. Bu algoritma ANN algoritması ile karşılaştırıldığında daha iyi arıza yeri tahmini yapmaktadır [20]. Ancak, arıza öncesi ve sonrası verilere bağlı olarak arıza yerini hesaplar.

Bahsedilen algoritmalar incelendiğinde, yüksek miktarda veri ihtiyacı ve uygulaması zor hesaplamalar bulunmaktadır. Daha az formülasyon kullanımı için PMU baz alınarak tasarlanmış ve iki baradan okunan akım, gerilim ölçümleri ve hat bilgileri dışında ek bir değişkene ihtiyacı olmayan bir algoritma, bu tez kapsamında geliştirilmiştir.

## 5. SERİ KAPASİTÖRLÜ İLETİM HATLARI İÇİN PERFORMANSA DAYALI ARIZA YERİ BULMA ALGORİTMASI

Bu tez kapsamında geliştirilen algoritma, iterasyon tabanlı olup, iki baradan alınan gerilim ve akım ölçümleri ve hat karakteristiği bilgisi ile arıza yerini tespit etmektedir. Algoritma, arıza öncesi veriler, akıma dayalı empedans matrisi, kaynak empedansları gibi ek değişkenlerin bilinmesine ihtiyaç duymaz. Seri kompanze edilmiş iletim hattı pi eşdeğer devresi ile modellenmiş olup şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

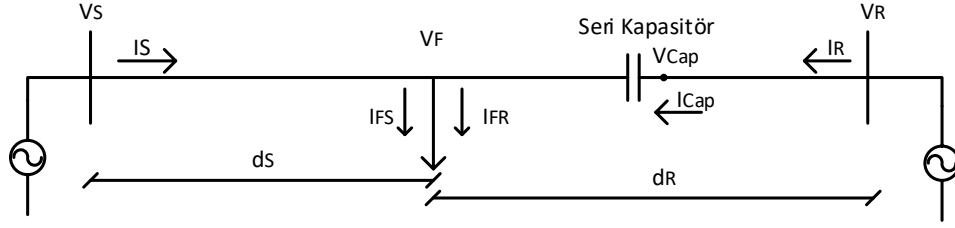


Şekil 5.1. Seri kapasitörlü iletim hattı

Algoritma, bara gerilim ve akımları ( $V_S$ ,  $V_R$ ,  $I_S$ ,  $I_R$ ), seri kapasitörün baralara göre uzaklıkları ( $d_{CapS}$ ,  $d_{CapR}$ ), hat empedansı ( $Z$ ) ve admitansı ( $Y$ ) biliniyor olarak varsayar.

Arızanın oluşum yeri ve kapasitörün konumu dikkate alındığında, iki senaryo durumu bulunmaktadır; arızanın kapasitörden önce veya sonra meydana gelmesi. Bu iki senaryo için de farklı hesaplamalar kullanılması gerekmektedir. Algoritma, bu nedenle iki durumu ilk önce birbirinden bağımsız olarak ele almış ve hesaplamaları gerçekleştirmiş ve daha sonra senaryonun doğruluğunu test etmiştir.

Arızanın seri kapasitör ve referans alınan (S) barası arasında oluştuğu (arızanın seri kapasitör öncesi oluşma durumu) Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Arıza yerinin, S barasına uzaklığı  $d_S$  değişkeni olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Arıza yerinin S barası ve seri kapasitör arasında olma durumu

Arıza yerini tayin etmek için, önce arıza gerilimi ( $V_F$ ) ve arıza akımının ( $I_F$ ) hesaplanması gerekir. Arıza akımı, Şekil 5.2'den de görüleceği gibi referans ve uzak baradan gelen iki akım bileşeninden oluşmaktadır. Arıza gerilimi ve akımın, referans baradan gelen bileşeni sadece referans baranın akım ve gerilim değerleri ele alınarak elde edilir;

$$\begin{bmatrix} V_F \\ -I_{FS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{(Zd_s)(Yd_s)}{2}\right) & (Zd_s) \\ \left((Yd_s) + \frac{(Zd_s)(Yd_s)(Yd_s)}{4}\right) & \left(\left(1 + \frac{(Zd_s)(Yd_s)}{2}\right)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ -I_s \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Daha sonraki adım ise, arıza akımının uzak baradan gelen bileşeninin eldesidir. Bunun için öncelikle arıza noktası ile kapasitör arasındaki empedansı elde etmemiz gerekir. Bu elde etme işlemi için kapasitör öncesindeki gerilim ( $V_{Cap}$ ) ve akım ( $I_{Cap}$ ) değeri hesaplanmalıdır;

$$\begin{bmatrix} V_{Cap} \\ -I_{Cap} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{(Zd_{CapR})(Yd_{CapR})}{2}\right) & (Zd_{CapR}) \\ \left((Yd_{CapR}) + \frac{(Zd_{CapR})(Yd_{CapR})(Yd_{CapR})}{4}\right) & \left(\left(1 + \frac{(Zd_{CapR})(Yd_{CapR})}{2}\right)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ -I_R \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Denklem (5.2) eşitliğinin sonuçlarını kullanarak arıza noktasının gerilim ve akımının, seri kapasitörün gerilim ve akımına bağlı ifadesi elde edilir;

$$\begin{bmatrix} V_F \\ -I_{FR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{(YZ_{Cap-F}(1-d_s-d_{CapR})^2)}{2}\right) & (Z_{Cap-F}(1-d_s-d_{CapR})) \\ \left(\left(Y(1-d_s-d_{CapR})\right) + \frac{(YZ_{Cap-F})(1-d_s-d_{CapR})^3}{4}\right) & \left(1 + \frac{(YZ_{Cap-F})(1-d_s-d_{CapR})^2}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cap} \\ -I_{Cap} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Denklem (5.3)'te verilen matriste,  $V_F$  eşitliğini kullanarak arıza noktası ve seri kapasitör arasındaki empedans hesaplanır;

$$Z_{\text{Cap-F}} = \frac{V_F - V_{\text{Cap}}}{\left[ \frac{Y(1-d_s-d_{\text{CapR}})^2}{2} V_{\text{Cap}} \right] - \left[ (1-d_s-d_{\text{CapR}}) I_{\text{Cap}} \right]} \quad (5.4)$$

Denklem (5.3)'te verilen matriste,  $-I_{\text{FR}}$  eşitliği ve Denklem (5.4)'ta elde edilen empedans kullanılarak arıza akımının uzak uçtan gelen bileşeni elde edilir;

$$I_{\text{FR}} = - \left[ V_{\text{Cap}} \left( (Y(1-d_s-d_{\text{CapR}})) + \frac{Z_{\text{Cap-F}} Y^2 (1-d_s-d_{\text{CapR}})^3}{4} \right) \right] + \left[ \left( 1 + \frac{Z_{\text{Cap-F}} Y (1-d_s-d_{\text{CapR}})^2}{2} \right) I_{\text{Cap}} \right] \quad (5.5)$$

Denklem (5.5) ve Denklem (5.1)'de elde edilen akım değerleri toplanarak arıza akımı değerine ulaşılır;

$$I_F = I_{\text{FR}} + I_{\text{FS}} \quad (5.6)$$

Bu algoritmada, arıza direnci omik olarak varsayılmıştır. Bu varsayıma göre; eğer ele alınan  $d_s$  arıza noktası ise hesaplanan arıza gerilimi ve akımı arasındaki açı farkının sıfır olması gerekir. Ancak algoritma iterasyon tabanlı olduğundan hesaplanan açı farkı tam sıfır olarak elde edilemez, hesaplanan açı farkında belli bir hata oranı olacaktır ( $\varepsilon$ ). Seçilen  $d_s$  uzaklığı arıza noktası ise Denklem (5.7) eşitliğini sağlamalıdır;

$$\text{açı}(V_F) - \text{açı}(I_F) = \min(\varepsilon) \quad (5.7)$$

İki senaryo için de ayrı ayrı bara ( 1. senaryo için referans bara, 2. senaryo için uzak bara) ile seri kapasitör arasındaki uzaklık önceden seçilen bir iterasyon adımı ile arıza noktası için taranır, en küçük hata oranını veren (sıfıra en yakın sonucu elde eden) nokta arıza yeri alınır. Seri kapasitör öncesi arıza durumu için  $d_s$ , kapasitör sonrası durum için  $d_R$  değerleri olarak minimum hatayı veren potansiyel arıza yeri uzaklıkları iki senaryo için de atanır.

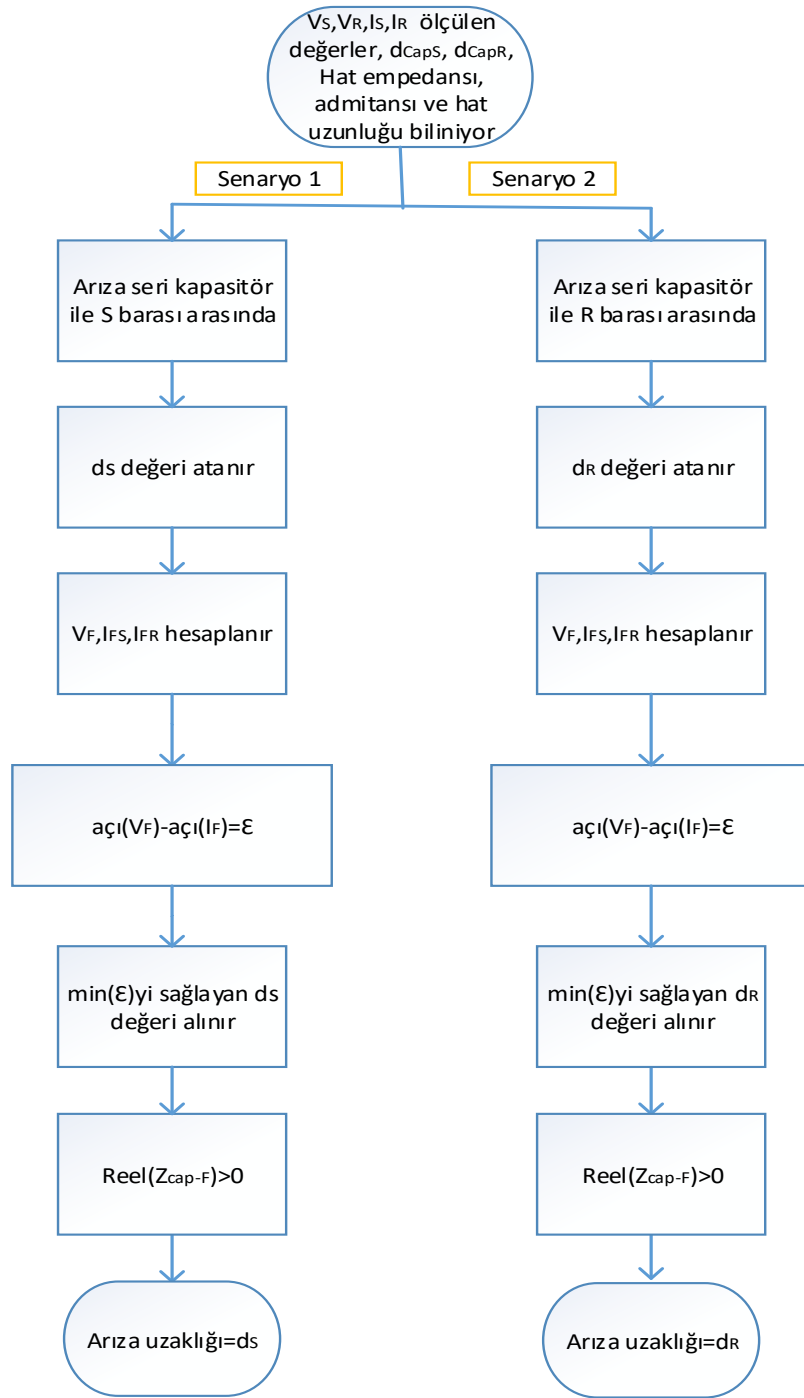
Son olarak, senaryo doğruluğu test edilmelidir. Seri kapasitör ve MOV'un doğrusal olmayan davranışı  $Z_{\text{Cap-F}}$  empedansının omik ve reaktif bileşenin de üzerinden akan akıma bağlı bir değişime yol açmaktadır. Empedansın reaktif bileşeni arıza noktasına bağlı olarak pozitif veya negatif değeri alabilir, ancak omik bileşen pozitif olmak zorundadır, bu şartı sağlayan senaryo doğru olarak alınır;

$$\text{reel}(Z_{\text{Cap-F}}) > 0 \quad (5.8)$$

Denklem (5.8), kapasitör geriliminin ( $V_{\text{Cap}}$ ) arıza geriliminden ( $V_F$ ) daha büyük olması gerektiği gerçeği baz alınarak oluşturulmuştur.

Arızanın kapasitör sonrasında olduğu senaryo için ise R barası referans bara ve S barası uzak bara olarak düşünülür. Bu durum baz alındığında, yukarıda kullanılan denklemler için  $V_S$ ,  $I_S$ ,  $V_R$ ,  $I_R$ ,  $d_{\text{CapS}}$ ,  $d_R$ , değişkenleri sırasıyla  $V_R$ ,  $I_R$ ,  $V_S$ ,  $I_S$ ,  $d_{\text{CapR}}$ ,  $d_S$  ile değiştirilerek 2. senaryoya görede arıza uzaklığı hesaplanır. Alınan performans dayalı algoritmanın akış diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir.





Şekil 5.3. Performansa dayalı alınan algoritmanın akış diyagramı

### 5.1. Algoritmanın Temel Arıza Yeri Bulma Algoritmaları İle Karşılaştırması

Temel algoritmalar, seri kapasitör ve MOV'un etkilerini dikkate almadığı için belli bir hata oranı artışı durumu ortaya çıkacaktır. Ancak bu artışın, kabul edilebilirliğini belirlemek ve seri kapasitörlü iletim hatları için özel bir algoritmanın geliştirilmesinin gerekliliğini göstermek için benzetim çalışması yapılmıştır. Bu

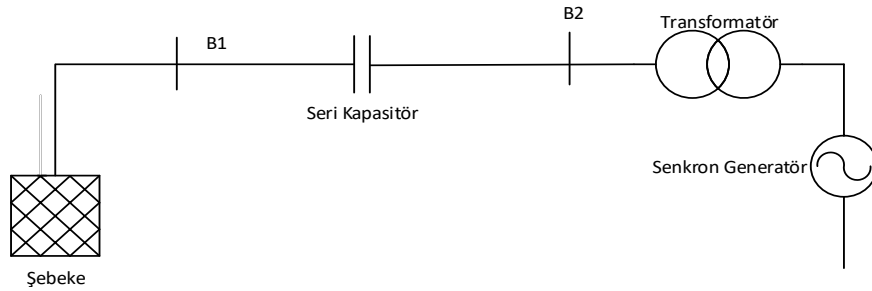
amaçla, DigSILENT programı kullanılarak bir uygulama yapılmıştır. Bu sistemden alınan akım ve gerilimler, MATLAB ortamında oluşturulmuş algoritmalar için kullanılmışlardır. Test sistemi özellikleri ve simülasyon parametreleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de, test sistemi ise Şekil 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.1. Test sistemi parametreleri [56,57]

Şebeke		Seri Kapasitöre sahip İletim Hattı		Transformatör		Senkron Generatör	
Kısa Devre Gücü	2 GVA – 24 GVA	$R^1$	8,1 $\Omega$	Anma Gücü	255 MVA	Nominal Görünür Gücü	255 MVA
$R^1/X^1$	0,1	$X^1$	82,8 $\Omega$	Bağlantı Grubu	YN-YN	Nominal Gerilimi	19 kV
$X^0/X^1$	3	$R^0$	37,2 $\Omega$	Faz Açısı	0°	$x_d''$	0,12 pu
$R^0/X^0$	0,1	$X^0$	253,5 $\Omega$	Anma Gerilimi	380 kV/19 kV	$x^0$	0,1 pu
		Uzunluk	300 km	$u_k^0$	13%	Güç Faktörü	0,8
		Seri Kapasitörün (ve MOV’un) Konumu	B1 barasına 150 km	$u_k$	16%	Bağlantı	YN
				Bakır Kayıpları	310 kW		

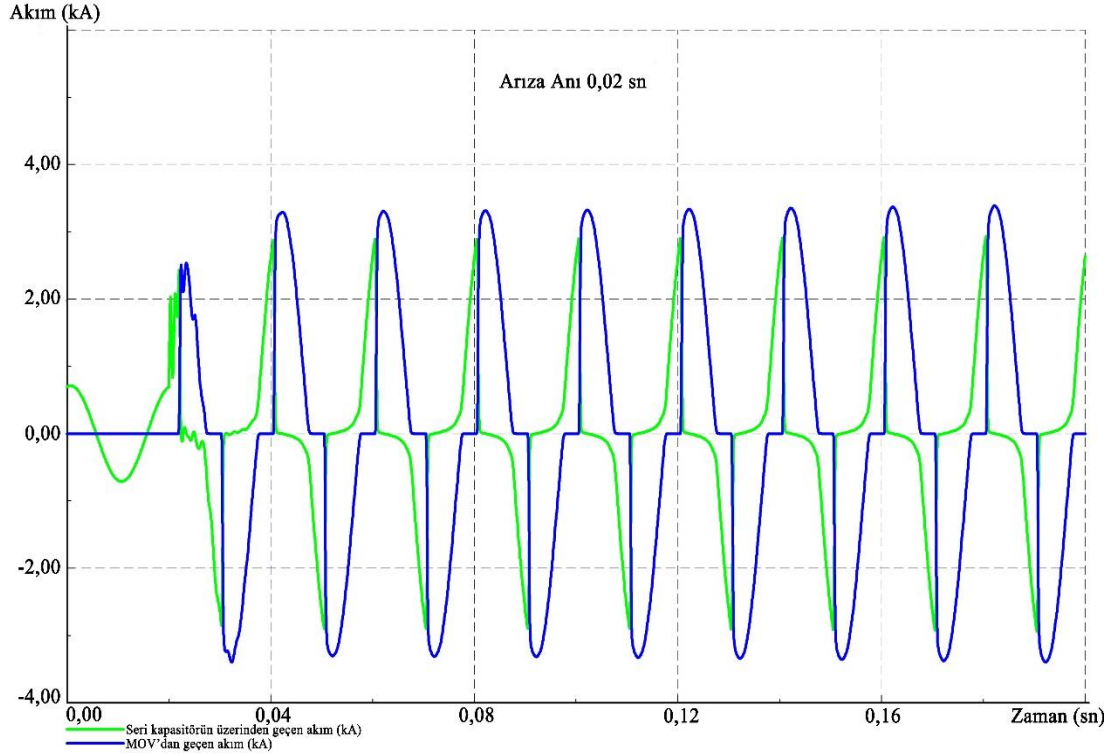
Tablo 5.2. Test sisteminin simülasyon parametreleri

Simülasyon zamanı	0,2 sn
Arıza anı	0,02 sn
Örnekleme frekansı	10 kHz
İterasyon adımı	$10^{-4}$



Şekil 5.4. Seri kapasitörlü test sistemi

Bu test sistemindeki seri kapasitör ve MOV karakteristiği, [24, 25, 58] kaynakları baz alınarak oluşturulmuştur. Seri kapasitör ve MOV arasındaki ilişkiyi daha iyi anlayabilmek için örnek bir arıza durumundaki MOV ve seri kapasitörün üzerinden geçen akımın davranışı Şekil 5.5'te verilmiştir (MOV karakteristiği Ek-A kısmında verilmiştir).



Şekil 5.5. MOV ve seri kapasitörde ki akım değişimi

Test sistemi, geliştirilen algoritma dışında basit arıza gerilimi eşitliği algoritması ve Takagi algoritması ile farklı arıza uzaklıkları ve farklı arıza direnci durumlarında karşılaştırılmıştır.

İlk olarak algoritmalar 45 km, 120 km, 180 km ve 255 km arıza uzaklıklarında karşılaştırılmıştır. Bu test durumunda uzaklığa bağlı arıza yeri bulma hatalarının değişiminin gözlenmesi amaçlanmıştır. Test durumunun sonuçları Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Test sisteminin farklı uzaklıklardaki çeşitli arıza tipleri için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Tipi				Arıza Uzaklığı
	abc	at	bc	bct	
Geliştirilen Algoritma	0,0100	0,0900	0,0000	0,0000	45 km
	0,0100	0,0400	0,0400	0,0100	120 km
	0,9800	0,6900	0,2200	0,7200	180 km
	0,0100	0,0300	0,1400	0,1600	255 km
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	3,4762	3,8354	4,5404	4,0414	45 km
	5,3329	6,2063	7,1843	6,4077	120 km
	4,4012	2,8717	4,3568	4,3167	180 km
	6,0653	3,3441	5,8611	5,8402	255 km
Takagi Algoritması	0,0155	0,0096	0,0155	0,0155	45 km
	0,3209	0,2695	0,3806	0,3209	120 km
	6,5603	5,5797	4,3568	4,3167	180 km
	8,4126	6,9048	5,8611	9,8303	255 km
Arıza yeri hata oranı (%)					

Basit arıza gerilimi eşitliği algoritması, teorik olarak MOV ve seri kapasitörü dikkate almadığından yüksek hata oranına sahiptir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi basit arıza gerilimi eşitliği algoritması seri kapasitörlü sistemler için uyarlanmadan, bu tip sistemlerde kullanılamaz.

Takagi algoritması, arızanın kapasitör öncesinde olduğu durumlarda, aldığı bara ölçümü değerleri seri kapasitör ve MOV'un varlığından etkilenmediği için yüksek doğrulukla arıza yerini tespit etmiştir, ayrıca uzaklığa bağlı olarak hata oranında az da olsa bir yükseliş gözlenmiştir. Ancak arıza kapasitör sonrasında olduğu durumda, hata oranı %9 değerini geçmesi, bu algoritma için de bir senaryo seçicisi ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır.

Geliştirilen algoritma ise, genel olarak yüksek doğrulukla çalışmıştır. Arıza oluşum noktası seri kapasitöre yaklaştıkça arıza yeri bulma hatasında az da olsa bir artış gözlenmiştir.

Diğer bir durumda, test sistemindeki algoritmalar 120 km ve 180 km uzaklıklarda farklı arıza dirençleri ile sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu testte 1  $\Omega$ , 10  $\Omega$  ve 50  $\Omega$  arıza dirençlerinde, algoritmaların düşük ve yüksek arıza dirençlerine tepkileri incelenmiştir. Test durumu sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Test sisteminin farklı arıza dirençlerindeki faz-faz-toprak arıza tipi için yüzde hata oranları

Arıza Yeri Bulma Algoritması Tipi	Arıza Direnci			Arıza Uzaklığı
	1 $\Omega$	10 $\Omega$	50 $\Omega$	
Geliştirilen Algoritma	0,0200	0,0100	0,0000	120 km
	0,3200	0,5700	0,1600	180 km
Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması	6,3947	6,2720	2,7578	120 km
	4,3536	4,7407	8,2217	180 km
Takagi Algoritması	0,3963	0,7392	1,7821	120 km
	7,6620	8,5597	17,8326	180 km
Arıza yeri hata oranı (%)				

Tablo 5.4 incelendiğinde, kapasitör öncesi arıza durumunda yüksek doğruluk yakalayan Takagi algoritmasının dahi yüksek arıza direnci değerlerinde %1,5 hata oranını geçtiği görülmektedir, ek olarak algoritmada arıza direnci artışıyla doğrusal bir hata oranı artışı da görülmektedir. Geliştirilen algoritma ise, arıza direnci artışına doğrusal bir cevap vermemekte ve yüksek doğruluk oranını koruduğu gözlenmektedir.

Tablo 5.3 ve Tablo 5.4 incelendiğinde temel algoritmalara seri kapasitörlü iletim hatlarında kullanılmaları için bir geliştirme uygulanmadığı sürece kullanılamaz durumda oldukları, bu tip iletim hatları için özel arıza yeri bulma algoritmalarının geliştirilmesi gerektiği sonuçlar incelendiğinde anlaşılmaktadır.

## 5.2. Seri Kapasitörlü İletim Hatlarını Baz Alan Arıza Yeri Bulma Algoritmalarının Karşılaştırılması

Performansa dayalı algoritmanın, diğer seri kapasitörü dikkate alan algoritmalar ile karşılaştırılması için test sistemi DigSILENT programında kurulmuştur. [59] kaynağından alınan test sistemi uygulanmış olup, geliştirilen algoritma, Kapuduwage (2004) [59] ve Kang (2010) [25] algoritmaları karşılaştırılmıştır. Kang (2010)'un simetrik bileşen tabanlı algoritması, uzun iletim hatları baz alınarak oluşturulmuş bir algoritmadır, bu test sisteminde kullanılabilmesi için bu algoritma kısa hat modeline uygun olacak şekilde indirgenmiştir. Simülasyon için iterasyon adımı 0,0001 ve örnekleme frekansı 10 kHz olarak alınmıştır.

Test sistemi, çeşitli arıza dirençleri, arıza tipleri ve uzaklıklara göre Tablo 5.5'te karşılaştırılmıştır. Hata oranı gösterimi senaryo durumuna göre ikiye ayrılmıştır.

Tablo 5.5. Seri kapasitörü dikkate alan algoritmaların karşılaştırılması

Arıza Tipleri ve Arıza Dirençleri	Kapasitörden Önce Arıza Olması Durumu			Kapasitörden Sonra Arıza Olması Durumu		
	Geliştirilen Algoritma	Simetrik Bileşenler Tabanlı Algoritma	Kapuduwege (2004) Algoritması	Geliştirilen Algoritma	Simetrik Bileşenler Tabanlı Algoritma	Kapuduwege (2004) Algoritması
A-B-C, 1 $\Omega$	0,0200	0,0800	0,045	0,0100	0,0800	0,099
A-B-C, 10 $\Omega$	0,0100	0,1000	0,04	0,0100	0,1100	0,09
A-B-C, 50 $\Omega$	0,0800	0,3500	0,088	0,0400	0,4500	0,098
Faz-Faz, 1 $\Omega$	0,0000	0,0600	0,057	0,0100	0,0600	0,097
Faz-Faz, 10 $\Omega$	0,0000	0,0600	0,034	0,0200	0,0600	0,089
Faz-Faz, 50 $\Omega$	0,0100	0,0800	0,067	0,0100	0,0900	0,104
Faz-Faz-Toprak, 1 $\Omega$	0,0000	0,2100	0,056	0,0000	0,1900	0,091
Faz-Faz-Toprak, 10 $\Omega$	0,0100	3,6600	0,05	0,0200	3,5700	0,092
Faz-Faz-Toprak, 50 $\Omega$	0,0000	4,5700	0,066	0,0400	4,9900	0,108
Arıza yeri hata oranı (%)						

Kapuduwege (2004) algoritması ile geliştirilen algoritmanın sonuçları, ne kadar birbirine yakın olsa da, genel duruma bakıldığında geliştirilen algoritma ile daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Simetrik bileşenleri kullanan algoritma, yüksek arıza dirençlerinde faz-faz-toprak durumu dışında yüksek doğruluk elde etmiştir. Görebileceği gibi algoritmalar iki bara ölçümlerini kullandıklarından tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalarındaki gibi arıza uzaklığıyla hata oranlarında doğrusal bir artış görülmemektedir. Ancak bütün algoritmalar arızanın seri kapasitörden önce veya sonra olma durumundan etkilendiği görülmektedir. Tablo 5.6’te bu üç algoritmanın genel bir karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 5.6. Seri kapasitörü dikkate alan algoritmaların genel özellikleri

	Geliştirilen Algoritma	Simetrikli Bileşenler Tabanlı Algoritma	Kapuduwağ (2004) Algoritması
Tabanı	İterasyon Tabanlı	İterasyon Tabanlı	Akıma Bağlı Gerilim Düşümü Tabanlı
İletim Hattı Modeli	Orta Uzun Hatlar ( $\pi$ Eşdeğer Devresi)	Kısa Hatlar	Kısa Hatlar
Tek Bara veya İki Bara Ölçümlerini Kullanıyor	İki Bara	İki Bara	Tek Bara
Zaman Domeninde veya Frekans Domeninde	Frekans	Frekans	Zaman Domeni
Akım ve Gerilim Ölçümleri ve Hat Bilgileri Dışında Veri Gerektiriyor mu	Gerekmiyor	Gerekmiyor	MOV Karakteristiği
Arıza Direnci Etkisi	Düşük	Yüksek	Düşük
Arıza Tipi Etkisi	Düşük	Yüksek	Düşük

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, öncelikle tek ve iki bara ölçümelerini kullanan temel arıza yeri bulma algoritmaları tanıtılarak, bu algoritmalar farklı test sistemlerinde incelenip sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra seri kapasitörlü iletim hatları için geliştirilen algoritma, teorik olarak açıklanmıştır. İki baradan alınan ölçümleri kullanan geliştirilmiş algoritma, seçilen temel arıza yeri bulma algoritmaları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenerek seri kompanze edilmiş iletim hatlarında bu sistemler için özel olarak bir algoritma geliştirmenin gerekliliği vurgulanmıştır. Daha sonra geliştirilen algoritma, diğer seri kompanze iletim hatları için özel geliştirilmiş algoritmalar ile karşılaştırılmıştır.

Temel arıza yeri bulma algoritmaları, homojen, homojen olmayan ve pi hat modeli ile modellenmiş homojen olmayan test sistemlerinde farklı arıza uzaklığı, arıza tipi ve arıza direnci değerlerinde incelenerek alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara bağlı olarak, algoritmaların çalışma karakteristikleri analiz edilmiştir.

Temel tek bara ölçümelerini kullanan arıza yeri bulma algoritmalarından, Takagi algoritması ve basit reaktans algoritması arıza direncinin ihmal edildiği durumlarda birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Arıza direncinin ihmal edildiği durumlarda, homojen olmayan sistemlerde gerçek arıza yerine diğer test sistemlerine göre daha yakın sonuçlar elde ettikleri görülmektedir. Genel olarak sonuçlara bakıldığında, basit reaktans algoritması arıza direncinin ihmal edildiği senaryolarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Takagi ve basit reaktans algoritmasının hata oranları arıza direnci değerinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Basit reaktans algoritması, arıza direncinin olduğu senaryolarda %10 hata oranını aşarak, arıza direncinin etkili olduğu durumlarda bu algoritmayı kullanmanın söz konusu olmayacağını kanıtlar niteliktedir. Takagi algoritmasının hata oranında da özellikle homojen olmayan test sisteminde, yüksek arıza direnci olduğu durumda %5 hata oranı aşılmaktadır. Ancak bu durum, sadece faz-toprak arızalarında görülmektedir, diğer arıza tiplerinden bütün test senaryolarında ulaşılan en yüksek hata oranı %1,54 civarlarındadır. İki algoritmanın sonuçları da admitans ve arıza direncinin ihmal edildiği durumlarda



arıza yeri uzaklığına bağlı olarak hata oranı artışı göstermektedirler. Ayrıca bu iki algoritma dışında, sadece toprak arızalarında kullanılabilinen tek bara ölçümleri ile işlem yapan geliştirilmiş Takagi algoritması da bulunmaktadır. Bu algoritmanın elde ettiği sonuçlar incelendiğinde sadece faz-toprak arıza tipi için uygun olduğu anlaşılmaktadır. Geliştirilmiş Takagi algoritmasında arıza yeri uzaklığı artışı veya arıza direnci değeri artışı etkileri diğer tek bara ölçümlerini kullanan algoritmalarındaki gibi doğrusal olarak hata oranını arttırmaz. Bütün senaryolar incelendiğinde, faz-toprak arızasında maksimum %1,21 civarında bir hata oranı ile çalıştığı gözlenmektedir. Takagi algoritması ve geliştirilmiş Takagi algoritması, birlikte kullanılarak hibrit bir algoritma elde edilirse bu test sistemlerinde maksimum %1,54 hata oranı ile arıza yeri tespiti elde edilecektir.

Temel iki bara ölçümlerini kullanan arıza yeri tespiti algoritmalarından simetrik arıza yeri bulma algoritması, sadece simetrik arızalarda kullanılabilmesi ve arıza direncinin ihmal edildiği durumlarda basit arıza gerilimi eşitliği algoritmasına yakın veya hata oranı daha yüksek sonuçlar vermektedir. Buna ek olarak arıza direncinin dikkate alındığı durumlarda yüksek hata oranları vererek algoritma bu test koşullarında kullanılamaz hale gelmektedir. Bu nedenle hem her arıza tipinde kullanılabileceğinden, hem de gerçek arıza yeri değerine yakın sonuçlara ulaştığından basit arıza gerilimi eşitliği algoritmasının özellikle simetrik arızalar için kullanılması daha isabetli olacaktır. Asimetrik arızalarda ise, basit arıza gerilimi eşitliği algoritması, asimetrik arıza yeri bulma algoritması ve negatif bileşenler ile arıza yeri bulma algoritması yüksek doğrulukla arıza yerini tespit etmektedir. Bu algoritmalar, arıza uzaklığının değişmesinden ve arıza direnci artışından tek bara ölçümlerini kullanan arıza yeri bulma algoritmaları kadar etkilenmezler. Negatif bileşenler ile arıza yeri bulma algoritması, diğer iki bara ölçümlerini kullanan arıza yeri bulma algoritmalarının en yüksek hata oranlarını verdiği orta uzun hat modeli ( $\pi$  eşdeğer devresi) ile modellenmiş homojen olmayan test sisteminde, en iyi sonuçları vererek admitans değerinin sonuçlarının doğruluğunu negatif yönde etkilemediğini kanıtlamıştır. Buna ek olarak, diğer senaryolardaki sonuçlarda incelendiğinde, arıza direnci değişiminde de arıza direncinin ihmal edildiği duruma yakın sonuçlar verdiği görülür, bu durum baz alındığında arıza direnci değişiminin bu algoritmanın sonuçları üzerinde fazla bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak

homojen olmayan test sisteminde hata oranları, diğer iki bara ölçümlemlerini kullanan arıza yeri bulma algoritmalarından daha yüksek olduğu görölür. Genel durum incelendiğinde iki bara ölçümlemlerini kullanan arıza yeri bulma algoritmaları, tek bara ölçümlemlerini kullanan arıza yeri bulma algoritmalarından daha yüksek doğruluk payına sahiptir.

Seri kompanze edilmiş iletim hattlarında, özellikle MOV'un doğrusal olmayan karakteristiğı nedeniyle bu sistemlere özel algoritmalar geliştirilmiştir. Fazörel hesaplamaları kullanan algoritmaların azlığı ve varolan algoritmaların ise temel algoritmaların kullandığı ortak değişken girişlere ek olarak yeni veriler istemesi, yeni bir algoritma ihtiyacını oluşturmuştur. Yapılan tezde, bu ihtiyaca karşılık gelebilecek empedans tabanlı bir algoritma oluşturularak hazırlanan test sistemlerinde verdiği sonuçlar gözlenmiştir.

Geliştirilen algoritma, öncelikle temel algoritmalar ile karşılaştırılarak, seri kompanze iletim hatları için özel algoritma kullanımı gerekliliğı açıklanmıştır. Takagi algoritması, sonuçlardan anlaşılacağı gibi seri kapasitör ile referans bara arasında kalan arazılarda düşük hata oranı ile arıza yerini tespit etmiştir. Bunun nedeni olarak hesaplamada sadece referans baradan alınan ölçümleri kullanarak arıza noktası ve uzak bara arasındaki etkenlerden (seri kapasitör, MOV) sonuçların etkilenmediğı gösterilebilir. Ancak seri kapasitörden sonra meydana gelen arızalarda, bu yaklaşım yüksek hata oranına sahiptir. Basit arıza gerilimi eşitliğı algoritması ise, iki baradan da alınan ölçümleri kullandığından seri kapasitör ve MOV nedeniyle yüksek hata oranıyla sonuca ulaşmaktadır. Temel algoritmalar, seri kompanze hat senaryosunda başarısız olurken geliştirilen algoritma farklı arıza direnci, farklı arıza tipi ve farklı arıza yeri durumlarında yüksek doğruluk payıyla sonuca ulaşmıştır.

Ayrıca geliştirilen algoritma, diğer kompanze iletim hatları için özel olarak geliştirilmiş algoritmalar ile de karşılaştırılmıştır. Kullanılan simetrik bileşenler tabanlı algoritma, faz-faz-toprak arızasındaki yüksek arıza dirençli test senaryolarında %4 hata oranını aşmaktadır, ancak diğer senaryolarda yüksek bir doğruluk ile arıza yerine ulaşabilmektedirler. Kapuduwage (2004) algoritması, her durumda düşük hata payıyla arıza yerini tespit etmektedir ancak geliştirilen algoritmanın genel duruma bakıldığında, gerçek arıza yerine, Kapuduwage (2004)

algoritmasından daha yakın sonuçlara ulaştığı görülür. Geliştirilen algoritma, farklı arıza direnci, arıza tipi ve arıza yeri durumlarında minimum hata ile sonuca ulaşarak beklentileri karşılamıştır.

Bölüm 2, 3 ve 5 incelendiğinde, özellikle temel algoritmalarda bir algoritmanın zayıf kaldığı yerde diğer algoritmanın güçlü olduğu gözlemlenir. Buna bağlı olarak temel arıza yeri algoritmalarında daha fazla veri kullanarak düşük hata oranı elde edecek arıza yeri bulma algoritmaları geliştirmektense hibrit algoritmalar ile arıza yeri yüksek doğrulukla tespit edilmektedir. Ancak bu durum temel algoritmalar gibi seri kompanze edilmiş hatlarda kullanılan algoritmalar için birebir uygulanamaz. Geliştirilen algoritma, performans tabanlı olarak tanımlanmış, giriş için gereken verileri temel algoritmalar düzeyinde tutarak gereken hesaplama sayısının minimuma indirgenmesi amaçlanmıştır. Bu algoritmayı farklı bir algoritma ile birleştirmek, daha fazla hesaplama yol açacağı ve algoritmaya geliştirmek için kullanılan performans nedeni ile bağdaşmayacağı için birebir hibrit algoritmaya geçilmesi uygun değildir. Ancak kullanılan örnek sayısı düşürülerek giriş verisi sayısı azalacağından ancak bu durumda böyle bir uygulamadan söz edilebilir. Elbette bu tür bir uygulamada, algoritmaların bu düşük örnekleme sayısında elde edeceği sonuçlar ve bu sonuçlar arasında hibrit bir algoritma oluşturmaya gerektirecek kadar bir fark oluşup oluşmayacağı konularının irdelenmesi gerekir.

Geliştirilen algoritmanın uygulanmasının daha kolay olması, arıza sonrası verilerin hepsini irdeleyerek en uygun sonucu seçmesi ve gerçek arıza yerine diğer algoritmalarından daha yakın sonuçlar elde etmesi önemli özelliklerindendir. Geliştirilen algoritma, bunun dışında giriş verileri olarak temel arıza yeri algoritmalarının kullandığı standart giriş verilerini talep etmektedir, ek olarak arıza öncesi değerler veya önceden hesaplanmış değerlere ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca algoritma hesaplamaları uzun hat modeli veya kısa hat modeline görede kolayca değiştirilebilir. Temel arıza yeri algoritmalarında ise, özellikle negatif bileşenleri kullanan algoritmaların arıza direnci ve admitans değerinin ihmal edilmediği durumlarda minimum hata oranı elde etmesi göz ardı edilmemesi gereken bulgulardandır. Bunun dışında simetrik arıza yeri bulma algoritması dışında iki baradan ölçüm değerlerini kullanan algoritmalar bütün senaryolarda düşük hata oranları ile sonuca ulaşmışlardır. Ancak Takagi ve geliştirilmiş Takagi

algoritmasından oluşturulacak bir hibrit algoritmanın, iki baradan ölçüm değerlerini kullanan algoritmalar kadar iyi sonuçlar elde edemesede yaklaşık %1'lik maksimum hata oranı ile göz ardı edilemeyecek bir isabet ile sonuca ulaşabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Takagi T., Yamakoshi Y., Yamaura M., Kadow R., Matsushima T., Development of A New Type Fault Locator Using The One-Terminal Voltage and Current Data, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, **PAS-101**(8), 2892-2898.
- [2] Gale P. F., Crossley P. A., Bingyin X., Yaozhong G., Cory B. J., Barker J. R. G., Fault Location Based on Travelling Waves, *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, York, United Kingdom, 30 March-01 April 1993.
- [3] Iżykowski J., *Fault Location on Power Transmission Lines*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
- [4] Lewis L. J., Traveling Wave Relations Applicable to Power-System Fault Locators, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, **70**(2), 1671-1680.
- [5] Aurangzeb M., Crossley P. A., Gale P., Fault Location on a Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves Measured at a Single Line End, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000, **4**, 2437-2442.
- [6] Lopes F. V., Fernandes D., Neves W. L. A., Fault Location on Transmission Lines Based on Travelling Waves, *International Conference on Power Systems Transients (IPST2011)*, Delft, Netherlands, 14-17 June 2011.
- [7] Siozinys V., Urniezius R., Transmission Line Protection and Fault Location Based on Travelling Wave Measurement, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2013, **19**(9), 21-24.
- [8] Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E., *Fault Location on Power Networks*, Springer, London, 2010.
- [9] Zimmerman K., Costello D., Impedance-Based Fault Location Experience, *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, College Station, Texas, USA, 5-7 April 2005.
- [10] Yin H., Fan L., PMU Data-Based Fault Location Techniques, *North American Power Symposium (NAPS)*, Arlington, Texas, USA, 26-28 September 2010.
- [11] Preston G., Radojevic Z. M., Kim C. H., Terzija V., New Settings-Free Fault Location Algorithm Based on Synchronised Sampling, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011, **5**(3), 376-383.

- [12] Zhang Q., Zhang Y., Song W., Yu Y., Transmission Line Fault Location for Phase-to-Earth Fault Using One-Terminal Data, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 1999, **146**(2), 121-124.
- [13] Quingchao Z., Yao Z., Wennan S., Yixin Y., Zhigang W., Fault Location of Two-Parallel Transmission Line for Non-Earth Fault Using One-Terminal Data, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(3), 863-867.
- [14] Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M., Accurate Location of Faults on Series-Compensated Lines with Use of Two-End Unsynchronised Measurements, *IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection*, Galsgow, Scotland, 17-20 March 2008.
- [15] Funabashi T., Otoguro H., Mizuma Y., Dube L., Ametani A., Digital Fault Location for Parallel Double-Circuit Multi-Terminal Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, **15**(2), 531-537.
- [16] Izykowski J., Rosolowski E., Balcerek P., Fulczyk M., Saha M. M., Accurate Noniterative Fault-Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(2), 547-555.
- [17] Pereira C. E. M., Zanetta L. C., Fault Location in Multitapped Transmission Lines Using Unsynchronized Data and Superposition Theorem, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(4), 2081-2089.
- [18] Liu C., Lin T., Yu C., Yang Z., A Fault Location Technique for Two-Terminal Multisection Compound Transmission Lines Using Synchronized Phasor Measurements, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, **3**(1), 113-121.
- [19] Vieira D. A. G., Oliveira D. B., Lisboa A. C., A Closed-Form Solution for Untransposed Transmission-Lines Fault Location With Nonsynchronized Terminals, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, **28**(1), 524-525.
- [20] Vyas B., Maheshwari R. P., Das B., Protection of Series Compensated Transmission Line: Issues and State of Art, *Electric Power Systems Research*, DOI: 10.1016/j.epsr.2013.09.017.
- [21] Pašić J., Series Compensated Lines—Fast Detection of Energy Flow Direction, *18th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 16-18 June 2011.
- [22] Gajbhiye R. K., Gopi B., Kulkarni P., Soman S. A., Computationally Efficient Methodology for Analysis of Faulted Power Systems With Series-Compensated Transmission Lines: A Phase Coordinate Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, **23**(2), 873-880.
- [23] Yu C., Liu C., Yu S., Jiang J., A New PMU-Based Fault Location Algorithm for Series Compensated Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, **17**(1), 33-46.

- [24] Saha M. M., Izykowski J., Rosolowski E., Kasztenny B., A New Accurate Fault Locating Algorithm for Series Compensated Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(3), 789-797.
- [25] Kang N., Advancements in Transmission Line fault Location, Doctoral Dissertations, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, 2010, Paper 69.
- [26] Srivani S. G., Nisha T. T., Estimation of Fault Location Algorithm in Series Compensated FACT Systems, *IEEE Fifth Power India Conference*, DOI: 10.1109/PowerI.2012.6479496.
- [27] Abdelaziz A. Y., Mekhamer S. F., Ezzat M., *Electric Power Components and Systems*, DOI: 10.1080/15325008.2013.763312.
- [28] Huang Z., Chen Y., Gong Q., A Protection and Fault Location Scheme for EHV Line with Series Capacitor Based on Travelling Waves and Wavelet Analysis, *International Conference on Power System Technology (PowerCon)*, DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053551.
- [29] Abedini M., Hasani A., Hajbabaie A. H., Khaligh V., A New Traveling Wave Fault Location Algorithm in Series Compensated Transmission Line, *21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, DOI: 10.1109/IranianCEE.2013.6599888.
- [30] Sadeh J., Hadjsaid N., Ranjbar A. M., Feuillet R., Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, **15**(3), 1027-1033.
- [31] Sadeh J., Adinehzadeh A., Accurate Fault Location Algorithm for Transmission Line in the Presence of Series Connected FACTS Devices, *Electrical Power and Energy Systems*, DOI: 10.1016/j.ijepes.2009.09.001.
- [32] Ahsaee M. G., Sadeh J., A Novel Fault-Location Algorithm for Long Transmission Lines Compensated by Series FACTS Devices, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(4), 2299-2308.
- [33] Nobakhti S. M., Akhbari M., A New Algorithm for Fault Location In Series Compensated Transmission Lines with TCSC, *Electrical Power and Energy Systems*, DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.11.052.
- [34] Joorabian M., Artificial Intelligent Based Fault Location Technique for EHV Series-Compensated Lines, *International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD)*, DOI: 10.1109/EMPD.1998.702709.
- [35] Dash, Pradhan, Panda, Application of Artificial Intelligence Techniques for Classification and Location of Faults on Thyristor- Controlled Series-Compensated Line, *Electric Power Components and Systems*, DOI: 10.1080/15325000390112170.

- [36] Eldin E. S. M. T., Fault Location for a Series Compensated Transmission Line Based on Wavelet Transform and an Adaptive Neuro-fuzzy Inference System, *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, DOI: 10.1109/PQ.2010.5549994.
- [37] Malathi V., Marimuthu N. S., Baskar S., Ramar K., Application of Extreme Learning Machine for Series Compensated Transmission Line Protection, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, DOI: 10.1016/j.engappai.2011.03.003.
- [38] Yusuff A. A., Fei C., Jimoh A. A., Munda J. L., Fault Location in a Series Compensated Transmission Line Based on Wavelet Packet Decomposition and Support Vector Regression, *Electric Power Systems Research*, DOI: 10.1016/j.epsr.2010.12.016.
- [39] Ray P., Panigrahi B. K., Senroy N., An AI Approach for Fault Distance Estimation in Series Compensated Transmission Line, *International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS)*, DOI: 10.1109/ICEAS.2011.6147072.
- [40] Meyar-Naimi H., A New Fuzzy Fault Locator for Series Compensated Transmission Lines, *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, DOI: 10.1109/EEEIC.2012.6221511.
- [41] Moravej Z., Khederzadeh M., Pazoki M., New Combined Method for Fault Detection, Classification, and Location in Series-compensated Transmission Line, *Electric Power Components and Systems*, DOI: 10.1080/15325008.2012.675409.
- [42] Ray P., Fast and Accurate Fault Location by Extreme Learning Machine in a Series Compensated Transmission Line, *Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE 2014)*, DOI: 10.1109/PESTSE.2014.6805252.
- [43] Phadke A. G., Thorp J. S., *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2009.
- [44] Saadat H., *Power System Analysis*, McGraw Hill, New York, 1999.
- [45] Girgis A. A., Hart D. G., Peterson W. L., A New Fault Location Technique for Two-and Three-Terminal Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, 7(1), 98-107.
- [46] Tziouvaras D. A., Roberts J. B., Benmouyal G., New Multi-Ended Fault Location Design for Two-or Three-Terminal Lines, *Seventh International Conference on (IEE) Developments in Power System Protection*, DOI: 10.1049/cp:20010183.
- [47] Rabinowitz M., Power Systems of the Future (Part 2), *IEEE Power Engineering Review*, DOI: 10.1109/39.825624.



- [48] Dash P. K., Pradhan A. K., Panda G., Liew A. C., Adaptive Relay Setting for Flexible AC Transmission Systems (FACTS), *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, **15**(1), 38-43.
- [49] Novosel D., Bachmann B., Hart D., Hu Y., Saha M. M., Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines Using Neural Network and Deterministic Methods, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, **11**(4), 1728-1736.
- [50] Girgis A. A., Sallam A. A., El-Din A. K., An Adaptive Protection Scheme for Advanced Series Compensated (ASC) Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, **13**(2), 414-420.
- [51] Ghassemi F., Goodarzi J., Johns A., Method to Improve Digital Distance Relay Impedance Measurement when Used in Series Compensated Lines Protected by a Metal Oxide Varistor, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, DOI: 10.1049/ip-gtd:19982002.
- [52] Cheong W. J., Aggarwal R. K., A Novel Fault Location Technique Based on Current Signals Only for Thyristor Controlled Series Compensated Transmission Lines Using Wavelet Analysis and Self Organising Map Neural Networks, *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, DOI: 10.1049/cp:20040104.
- [53] Al-Dabbagh M., Kapuduwage S. K., Using Instantaneous Values for Estimating Fault Locations on Series Compensated Transmission Lines, *Electric Power Systems Research*, DOI: 10.1016/j.epsr.2005.03.004.
- [54] Apostolopoulos C., Korres G., Accurate Fault Location Algorithm for Double-Circuit Series Compensated Lines Using a Limited Number of Two-End Synchronized Measurements, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.03.042.
- [55] Goldsworthy D. L., A Linearized Model for Mov-Protected Series Capacitors, *IEEE Transactions on Power Systems*, DOI: 10.1109/TPWRS.1987.4335284.
- [56] Kizilcay M., Teichmann K., Agdemir A., Lösing M., Neumann C., Blackstart of a 380-KV Transmission System with Unloaded Transformers After a System Collapse, *17th Power Systems Computation Conference*, Stockholm, Sweden, 22-26 August 2011.
- [57] DIgSILENT Gmbh, *DIgSILENT Power Factory Version 13.1 Manual*, Gomaringen, Germany, 2004.
- [58] Nafar M., Gharehpetian G. B., Niknam T., A Novel Parameter Estimation Method for Metal Oxide Surge Arrester Models, *Sādhanā*, 2011, **36**(6), 941-961.

- [59] Kapuduwage S. K., Al-Dabbagh M., One End Simplified Fault Location Algorithm Using Instantaneous Values for Series Compensated High Voltage Transmission Lines, *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*, Brisbane, Australia, 26-29 September 2004.

## **EKLER**

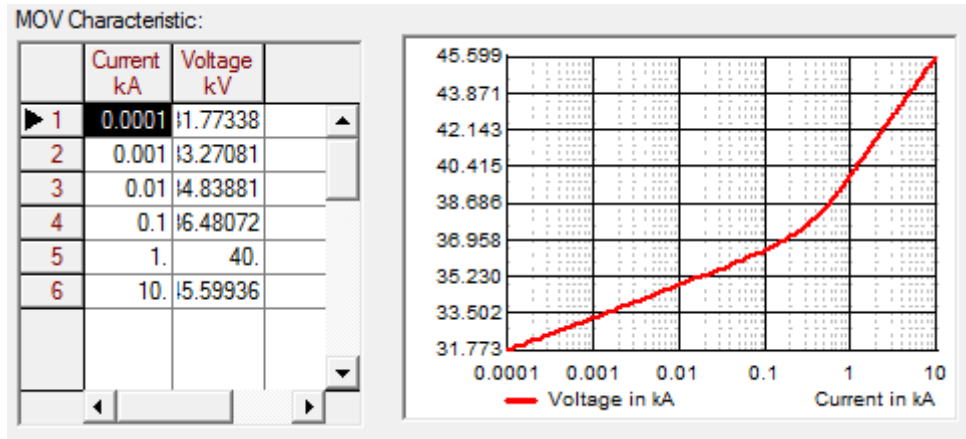
## Ek-A

Bölüm 5.1’de kullanılan MOV, aşağıdaki karakteristik baz alınarak oluşturulmuştur;

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left( \frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i}$$

$V_{ref}$	40 kV
$I_{ref}$	1 kA
$\alpha_1$	50°
$\alpha_2$	25°
$\alpha_3$	16,5°
$k_1$	0,955
$k_2$	1
$k_3$	0,9915

\* $k_{1,2,3}$  eğim için kullanılan sabitlerdir.

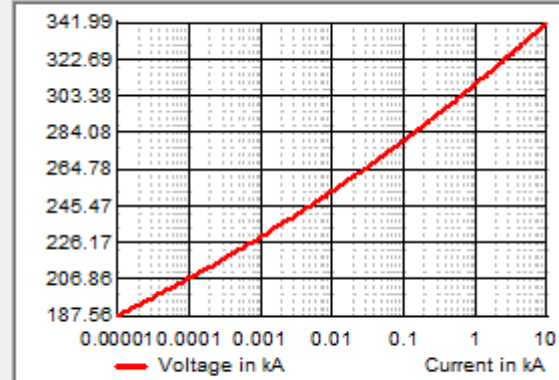


Bölüm 5.2’de ise Kapuduwage (2004) makalesinin değerleri alınmıştır;

$V_{ref}$	330 kV
$I_{ref}$	4,4 kA
$\alpha$	23°
$k$	0,955

# MOV Characteristic:

	Current kA	Voltage kV	
▶ 1	0.00001	187.56	▲
2	0.0001	207.31	
3	0.001	229.14	
4	0.01	253.27	
5	0.1	279.94	
6	1.	309.41	
7	10.	341.99	
			▼



Interpolation

spline

## Ek-B

Aşağıda kullanılan temel algoritmalar ve geliştirilen algoritmanın değişkenleri ve MATLAB kodları verilmiştir;

$\Delta I$ =Arıza sonrası ve öncesi akımın farkı,

$V_{fzrl}$ ,  $V2_{fzrl}$ =Sırasıyla referans ve uzak bara gerilimi,

$I_{ussu}$ ,  $I2_{ussu}$ =Sırasıyla referans ve uzak bara akımı,

$I_{poz}$ ,  $I2_{poz}$ ,  $I_{zero}$ ,  $I2_{zero}$ ,  $I_{neg}$ ,  $I2_{neg}$ =Sırasıyla pozitif, sıfır ve negatif bileşen referans ve uzak bara akımı,

$V_{poz}$ ,  $V2_{poz}$ ,  $V_{zero}$ ,  $V2_{zero}$ ,  $V_{neg}$ ,  $V2_{neg}$ = Sırasıyla pozitif, sıfır ve negatif bileşen referans ve uzak bara gerilimi,

$Z_P$ ,  $Z_S$ ,  $Z_R$ ,  $Z_{OS}$ ,  $Z_{OR}$ ,  $Z_{NS}$ ,  $Z_{NR}$ = Sırasıyla pozitif, sıfır ve negatif bileşen hat empedansı,

$D$ =arıza yeri,

$L_{kap\_S}$ ,  $L_{kap\_R}$ =Sırasıyla referans ve uzak baraya göre seri kapasitör konumu,

$V_{cap\_B}$ ,  $V_{cap\_A}$ =Sırasıyla seri kapasitör öncesi ve sonrası senaryolarda seri kapasitör gerilimi,

$V_{F\_B}$ ,  $V_{F\_A}$ = Sırasıyla seri kapasitör öncesi ve sonrası senaryolarda arıza noktası gerilimi,

$I_{SC\_B}$ ,  $I_{SC\_A}$ = Sırasıyla seri kapasitör öncesi ve sonrası senaryolarda seri kapasitöre giren akım,

$I_{FS\_B}$ ,  $I_{FR\_B}$ ,  $I_{FS\_A}$ ,  $I_{FR\_A}$  = Sırasıyla seri kapasitör öncesi ve sonrası senaryolarda referans bara ve uzak baradan gelen arıza akımı bileşenleri,

$Y$ =admitans,

**Takagi Algoritması:**

```

if delta_I==0
else
Takagi=(imag(V_fzrl(i)*conj(delta_I))/(imag(ZP*I_ussu(i)*conj(delta_I)))
delta_I=0;
end

```

**Basit Reaktans Algoritması:**

```

Simple_Reactance_Method=(imag(V_fzrl(i)/I_ussu(i)))/(imag(ZP))

```

**Geliştirilmiş Takagi Algoritması:**

```

Modified_Takagi_s1=(imag(V_fzrl(i)*conj(3*I_zero(i))))/(imag(ZP*I_ussu(i)*conj(
3*I_zero(i))))
Modified_Takagi_s2=angle((Z0S+Z0R+Z0)/((1-
abs(Modified_Takagi_s1))*Z0+Z0R));
Modified_Takagi=(imag(V_fzrl(i)*conj(3*I_zero(i))*exp(j*Modified_Takagi_s2*(-
1))))/(imag(ZP*I_ussu(i)*conj(3*I_zero(i))*exp(j*Modified_Takagi_s2*(-1))))

```

**Basit Arıza Gerilimi Eşitliği Algoritması:**

```

iki_uclu_yon_dersnot_1=V_fzrl(i)-V2_fzrl(i);
iki_uclu_yon_dersnot_2=ZP*I2_ussu(i);
iki_uclu_yon_dersnot_3=iki_uclu_yon_dersnot_1+iki_uclu_yon_dersnot_2;
iki_uclu_yon_dersnot_4=I_ussu(i)+I2_ussu(i);
iki_uclu_yon_dersnot_5=ZP*iki_uclu_yon_dersnot_4;
iki_uclu_yon_dersnot_son=abs(iki_uclu_yon_dersnot_3/iki_uclu_yon_dersnot_5)

```

**Negatif Bileşenler İle Arıza Yeri Bulma Algoritması:**

```

step=0;
for D=0.0001:0.0001:0.9999
TENSIM_hata(step+1)=abs((((-I_neg(i)*(ZNS+D*ZN)))-((-I2_neg(i)*(ZNR+(1-
D)*ZN)))));
step=step+1;
end
for D=0.0001:0.0001:0.9999

```

```

if abs((((I_neg(i)*(ZNS+D*ZN)))-((-I2_neg(i)*(ZNR+(1-
D)*ZN))))==min(TENSIM_hata)
Two_Ended_Negative_Sequence_Impedance_Method=D
end
end

```

#### **Asimetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması:**

```

Asymmetrical_Method_h=[((V_poz(i)-V2_poz(i))*I2_neg(i))-((V_neg(i)-
V2_neg(i))*I2_poz(i))]/[((V_poz(i)-V2_poz(i))*(I_neg(i)+I2_neg(i)))-((V_neg(i)-
V2_neg(i))*(I_poz(i)+I2_poz(i)))]);
Asymmetrical_Method=real(Asymmetrical_Method_h)

```

#### **Simetrik Arıza Yeri Bulma Algoritması:**

```

a1=real(V_poz(i)/I_poz(i));
a2=imag(V_poz(i)/I_poz(i));
b1=real((-I_poz(i)+I2_poz(i))/I_poz(i));
b2=imag((-I_poz(i)+I2_poz(i))/I_poz(i));
c1=real(V2_poz(i)/I2_poz(i));
c2=imag(V2_poz(i)/I2_poz(i));
d1=real((-I_poz(i)+I2_poz(i))/I2_poz(i));
d2=imag((-I_poz(i)+I2_poz(i))/I2_poz(i));
p=((a1*d1)+(b1*c2)-(a2*d1)-(b2*c2))/((b1*d2)-(b2*d1));
q=((a1*c2)-(a2*c1))/((b1*d2)-(b2*d1));
rf1=abs((1/2)*((-1*p)+sqrt((p^2)-(4*q))));
rf2=abs((1/2)*((-1*p)-sqrt((p^2)-(4*q))));
if a1+(b1*rf1)>0 | a2+(b2*rf1)>0 | c1+(d1*rf1)>0 | c2+(d2*rf1)>0
if a1+(b1*rf2)>0 | a2+(b2*rf2)>0 | c1+(d1*rf2)>0 | c2+(d2*rf2)>0
teta1=atan((a2+(b2*rf1))/(a1+(b1*rf1)));
teta2=atan((a2+(b2*rf2))/(a1+(b1*rf2)));
aci_kar=abs(angle(V_fzrl(i))-angle(I_ussu(i)));
kar_1=abs(abs(aci_kar)-abs(teta1));
kar_2=abs(abs(aci_kar)-abs(teta2));
if kar_1<kar_2
rf=rf1;

```



```

else
rf=rf2;
end
end
else rf=rf2;
end
Symmetrical_Method=sqrt([(a1+(b1*rf))^2+(a2+(b2*rf))^2]/[(a1+c1+((b1+d1)*rf))^2+(a2+c2+((b2+d2)*rf))^2])

```

### Geliştirilen Algoritma

```

VF_B=@(D) (V_fzrl(i)*(1+(Y*ZP*(D^2))/2))-(I_ussu(i)*(D*ZP));
Vcap_B=(V2_fzrl(i)*(1+(Y*ZP*(L_kap_R^2))/2))-(I2_ussu(i)*(L_kap_R*ZP));
I_SC_B=-
(((Y*L_kap_R)+((Y^2)*ZP*(L_kap_R^3))/4)*V2_fzrl(i))+(1+(Y*ZP*(L_kap_R^2))/2)*I2_ussu(i);
IFS_B=@(D) -
(((Y*D)+((Y^2)*ZP*(D^3))/4)*V_fzrl(i))+(1+(Y*ZP*(D^2))/2)*I_ussu(i);
Z_B=@(D) (VF_B(D)-Vcap_B)/(((Y*((1-D-L_kap_R)^2)/2)*Vcap_B)-((1-D-L_kap_R)*I_SC_B));
IFR_B=@(D) -(((Y*(1-D-L_kap_R))+((Y^2)*Z_B(D))*((1-D-L_kap_R)^3))/4)*Vcap_B)+(1+(Y*Z_B(D))*((1-D-L_kap_R)^2))/2)*I_SC_B;
VF_A=@(D) (V2_fzrl(i)*(1+(Y*ZP*(D^2))/2))-(I2_ussu(i)*(D*ZP));
Vcap_A=(V_fzrl(i)*(1+(Y*ZP*(L_kap_S^2))/2))-(I_ussu(i)*(L_kap_S*ZP));
I_SC_A=-
(((Y*L_kap_S)+((Y^2)*ZP*(L_kap_S^3))/4)*V_fzrl(i))+(1+(Y*ZP*(L_kap_S^2))/2)*I_ussu(i);
IFS_A=@(D) -
(((Y*D)+((Y^2)*ZP*(D^3))/4)*V2_fzrl(i))+(1+(Y*ZP*(D^2))/2)*I2_ussu(i);
Z_A=@(D) (VF_A(D)-Vcap_A)/(((Y*((1-D-L_kap_S)^2)/2)*Vcap_A)-((1-D-L_kap_S)*I_SC_A));
IFR_A=@(D) -(((Y*(1-D-L_kap_S))+((Y^2)*Z_A(D))*((1-D-L_kap_S)^3))/4)*Vcap_A)+(1+(Y*Z_A(D))*((1-D-L_kap_S)^2))/2)*I_SC_A;
hata_oran_bulma_mmS=0;

```

```

hata_oran_bulma_mmR=0;
for D=0.001:0.0001:L_kap_S-0.0001
Hata_mat_paS=hata_oran_bulma_mmS+1;
Epsilon_oranS(Hata_mat_paS)=abs(angle((VF_B(D)))-
angle((IFS_B(D)+IFR_B(D))));
hata_oran_bulma_mmS=hata_oran_bulma_mmS+1;
end
for D=0.001:0.0001:L_kap_S-0.0001
if abs(angle((VF_B(D)))-angle((IFS_B(D)+IFR_B(D))))==min(Epsilon_oranS)
if max(Epsilon_oranS)>min(Epsilon_oranS)
if real(Z_B(D))>=0
Scenerio=0;
dongu=dongu+1;
Sonuc_paralelB_ft(dongu)=D;
Sonuc_minhata(dongu)= abs(angle((VF_B(D)))-angle((IFS_B(D)+IFR_B(D))));
end
end
end
end
for D=0.001:0.0001:L_kap_R-0.0001
Hata_mat_paR=hata_oran_bulma_mmR+1;
Epsilon_oranR(Hata_mat_paR)=abs(angle((VF_A(D)))-
angle((IFS_A(D)+IFR_A(D))));
hata_oran_bulma_mmR=hata_oran_bulma_mmR+1;
end
for D=0.001:0.0001:L_kap_R-0.0001
if abs(angle((VF_A(D)))-angle((IFS_A(D)+IFR_A(D))))==min(Epsilon_oranR)
if max(Epsilon_oranR)>min(Epsilon_oranR)
if real(Z_A(D))>=0
Scenerio=1;
dongu=dongu+1;
Sonuc_paralelA_ft(dongu)=1-D;
Sonuc_minhata(dongu)=abs(angle((VF_A(D)))-angle((IFS_A(D)+IFR_A(D))));

```

```
end
end
end
end
if dongu>1
if Sonuc_minhata(dongu-1)>Sonuc_minhata(dongu) & Scenerio==1
Seri_lumped_SonucA_ft=Sonuc_paralelA_ft(dongu);
end
if Sonuc_minhata(dongu-1)>Sonuc_minhata(dongu) & Scenerio==0
Seri_lumped_SonucB_ft=Sonuc_paralelB_ft(dongu);
end
end
end
```

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Çapar A.**, Arsoy Basa A., A Performance Oriented Impedance Based Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.02.020.

**Çapar A.**, Arsoy Basa A., Evaluating Accuracy of Fault Location Algorithms Based on Terminal Current and Voltage Data, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, DOI: 10.12720/ijeec.3.3.202-206.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Alkım Çapar 1988’de Balıkesir’de doğdu. Lise öğrenimini Muharrem Hasbi Lisesi’nde tamamladı. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2012 yılında ikincilik ile mezun oldu. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde iletim hatlarında arıza yeri bulma algoritmaları konusunda çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca, 2013 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü’nde başladığı araştırma görevlisi görevini halen sürdürmektedir.