

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**BÜYÜK BOYUTLU ŞEBEKELERİN MODELLENMESİ VE  
YÜK AKIŞI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatma YAPRAKDAL**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**BÜYÜK BOYUTLU ŞEBEKELERİN MODELLENMESİ VE  
YÜK AKIŞI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fatma YAPRAKDAL  
(301091049)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ**

**OCAK 2012**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 301091049 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fatma YAPRAKDAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**BÜYÜK BOYUTLU ŞEBEKELERİN MODELLENMESİ VE YÜK AKIŞI ANALİZİ** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Önder GÜLER**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **19 Aralık 2011**

**Savunma Tarihi :**      **27 Ocak 2012**



*Aileme ve bana bu çalıřmamda destek veren değerli insanlara,*





## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, beni bilgi ve deneyimleri ile destekleyen hocam; Sayın Prof. Dr. Adnan Kaypmaz'a, Sayın Öğr.Gör. Ulaş Kılıç'a, Sayın Av. Ali Abdullah'a, Sayın Elektrik-Elektronik Müh. Ufuk Demir'e ve çok değerli çalışma ve okul arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni bugünlere getiren, sonsuz özverileri ile her türlü olanağı sağlayan ve bana daima destek olan aileme; bilgi ve birikimleriyle bana hayatımın tüm evrelerinde her zaman örnek olan canım babama, neşesi ve ilgisiyle hayattaki ikinci annem canım ablama ve verdiği destek ile hayatta her şeyi başarmamı sağlayan canım anneme en içten duygularıyla sevgilerimi sunarım.

Ocak 2012

Fatma Yaprakdal  
(Elektrik Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Literatür Araştırması .....	5
<b>2. ENERJİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ .....</b>	<b>7</b>
2.1 Amaç .....	7
2.2 Enerji Sisteminin Çok-Uçlu Olarak Modellenmesi ve Matematiksel Modeli ...	7
2.3 Hat Bilgileri.....	10
2.4 Topoloji Bilgileri.....	13
2.5 Dal Gerilimleri Yöntemi İle Bara Admitans Matrisi ( $Y_{BARA}$ ) Hesabı .....	13
<b>3. PARÇALAMA VE YENİDEN BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ.....</b>	<b>17</b>
3.1 Giriş.....	17
3.2 Dügümlerden Parçalama Yoluyla ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme’ .....	19
3.2.1 Büyük Boyutlu Bir Sistemin Alt-Şebekelere Ayrılarak Analizi.....	19
<b>4. YÜK AKIŞI .....</b>	<b>29</b>
4.1 Giriş.....	29
4.2 Yük Akışı Eşitlikleri.....	31
4.2.1 Şebeke performans eşitlikleri.....	31
4.2.2 Bara güç eşitlikleri .....	31
4.3 $Y_{BARA}$ kullanılarak Newton-Raphson Metoduyla Yük Akışı Çözümü .....	32
<b>5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMELERİ .....</b>	<b>39</b>
5.1 Beş Baralı Bir Sistemin ‘DGY’ ile Bara Admitans Matrisi Hesabı .....	39
5.2 Beş Baralı Bir Sistemin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ İle Bara Admitans Matrisi Hesabı.....	42
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>55</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>57</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>71</b>



## KISALTMALAR

<b>DGY</b>	: Dal Gerilimleri Yöntemi
<b>KAY</b>	: Kiriş Akımları Yöntemi
<b>MATLAB</b>	: Matrix Laboratory
<b>Ref</b>	: Referans
<b>G</b>	: Generatör
<b>L</b>	: Yük
<b>Z</b>	: Empedans
<b>R</b>	: Direnç
<b>X</b>	: Reaktans
<b>V</b>	: Gerilim
<b>I</b>	: Akım
<b>i</b>	: Akım Vektörü
<b>v</b>	: Gerilim Vektörü
<b>P</b>	: Aktif Güç
<b>S</b>	: Görünür Güç
<b>Q</b>	: Reaktif Güç
<b>Z<sub>p</sub></b>	: Primitif Empedans Matrisi
<b>Y<sub>p</sub></b>	: Primitif Admitans Matrisi
<b>Y<sub>BARA</sub></b>	: Bara Admitans Matrisi
<b>Z<sub>BARA</sub></b>	: Bara Empedans Matrisi
<b>J</b>	: Jacobian Matrisi
<b>U</b>	: Birim Matris
<b>V<sub>G</sub></b>	: Generatör Gerilimi
<b>I<sub>G</sub></b>	: Generatör Akımı
<b>V<sub>L</sub></b>	: Yük Gerilimi
<b>I<sub>L</sub></b>	: Yük Akımı
<b>N-R</b>	: Newton-Raphson
<b>G-S</b>	: Gauss-Seidel



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Hat empedans değerleri ve numaraları .....	43
<b>Çizelge 5.2</b> : Generatör ve yük değerleri, tahmini bara gerilimleri .....	44





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Bir enerji iletim sisteminin genel gösterimi. ....	8
Şekil 2.2 : Generatör ve yüklerin baralara enjekte edilen akımlar olarak gösterimi. ..	8
Şekil 2.3 : Çok-uçlu ve matematiksel modeli. ....	9
Şekil 2.4 : İki-uçlu elemanlardan oluşan çok-uçlu ve matematiksel modeli. ....	12
Şekil 2.5 : Referansı toprak olarak alınan şebekenin tek hat diyagramı. ....	13
Şekil 2.6 : Seçilen uç-grafına göre çok-uçlunun uyarılması ve devre grafi. ....	14
Şekil 2.7 : Uyarılmış devre grafi. ....	16
Şekil 2.8 : Çok-uçlu elemanın matematiksel modeli. ....	16
Şekil 3.1 : 'D' şebekesinin üç alt-parçaya ayrılması. ....	19
Şekil 3.2 : 'D' şebekesinin üç alt-parçaya ayrılmış şekli. ....	20
Şekil 3.3 : $D_1$ alt-şebekesinin matematiksel modeli. ....	20
Şekil 3.4 : $D_1$ alt-şebekesinin uyarılması. ....	21
Şekil 3.5 : Alt-şebekelerin çok-uçlu gösterimi ve matematiksel modeli. ....	23
Şekil 3.6 : Çok-uçluların birleştirilmesi. ....	24
Şekil 3.7 : Birleştirme grafi. ....	24
Şekil 3.8 : Birleştirme grafında uygun ağaç seçimi. ....	25
Şekil 3.9 : 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme' yöntemi ile $Y_{BARA}$ hesabı. ....	28
Şekil 4.1 : N-R yük akışı algoritması. ....	37
Şekil 5.1 : Bara admitans matrisi hesabı için örnek şebeke. ....	39
Şekil 5.2 : Örnek devrenin yönlendirilmiş devre grafi ve çok-uçlu gösterimi. ....	40
Şekil 5.3 : Devrenin yıldız uç-grafi ve uç-denklemleri. ....	40
Şekil 5.4 : Uyarılmış devre grafi. ....	41
Şekil 5.5 : Beş baralı örnek bir sistemin tek hat şeması. ....	43
Şekil 5.6 : $D_1$ alt-şebekesi. ....	44
Şekil 5.7 : $D_1$ alt - şebekesinin matematiksel modeli. ....	44
Şekil 5.8 : $D_1$ alt-şebekesinin uyarılmış devre grafi. ....	45
Şekil 5.9 : $D_2$ alt-şebekesi. ....	46
Şekil 5.10 : $D_2$ alt - şebekesinin matematiksel modeli. ....	47
Şekil 5.11 : $D_2$ alt-şebekesinin uyarılmış devre grafi. ....	47
Şekil 5.12 : $D_1$ ve $D_2$ alt-şebekelerinin çok-uçlu bağlantısı. ....	49
Şekil 5.13 : $D_1$ ve $D_2$ alt-şebekelerinin birleştirme grafi. ....	49
Şekil 5.14 : Birleştirme grafında uygun ağaç seçimi. ....	49



## BÜYÜK BOYUTLU ŞEBEKELERİN MODELLENMESİ VE YÜK AKIŞI ANALİZİ

### ÖZET

Günümüzde enerji dünyamızın ekseni olmuş stratejik, siyasi ve ekonomik bir değer olup sosyal kalkınmanın en önemli öğelerinden biridir. Hızlı sanayileşme ve şehirleşme, hızlı nüfus artışı, enerji tüketiminin önlenemez bir şekilde büyümesi, mevcut enerji kaynaklarının daha ekonomik ve daha verimli bir şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Artan elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi için büyük güçlü enerji üretim santrallerinin oluşturulmasının yanında, enerji sistemlerinin işletilmelerinde optimum verimin elde edilmesi amacıyla, farklı güç sistemlerini aralarında bağlayarak enterkonnekte şebekeler oluşturulmaktadır. Böylelikle elektrik şebekelerinin yapıları, nitelikleri ve boyutları giderek büyümektedir. Günümüzde, bir ülkenin sahip olduğu kendi öz kaynaklarıyla artan enerji talebini karşılayabilmesi mümkün değildir. Dolayısıyla ülkelerin enerji gereksinimlerini karşılamak için oluşturdukları enerji politikaları gereği, üretmedikleri enerji açıklarını karşılamak için dışarıdan elektrik enerjisi veya birincil enerji kaynakları almaları gerekmektedir. Bu bağlamda, uluslararası elektrik enerjisi ticareti ortaya çıkmış olup, ülkeler geliştirdikleri enerji politikalarına bağlı olarak bu ticareti de geliştirmektedirler. Güç sistemlerinin büyük boyutlara ulaşması ve uluslararası elektrik ticaretinin önem kazanmasıyla bölgeler arası elektrik enerji alış-verişleri de önem kazanmıştır. Ancak, güç sistemlerinin boyutlarının giderek büyümesi, bu sistemlerin planlanması, tasarımı ve işletilmesinde bilgisayar kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Bilgisayar hesaplamalarında çok sayıda lineer veya non-lineer denklem takımının çözümünün gerekmesi, katsayılar matrisinin kompleks elemanlı ve bara sayısı boyutunda çok büyük mertebeli oluşu bu sistemlerin çözümünde daha az bellek, işlem zamanı ve işlem sayısı gerektiren yeni çözüm algoritma ve metodları arayışını da yanında getirmiştir. Bu çalışmaların bir kısmı matematiksel işlemlerle katsayılar matrisine şekil vererek çözüm algoritmaları vermektedir. Örneğin LU (alt üçgen üst üçgen yapı) veya LDU (alt üçgen üst üçgen diyagonal yapı) gibi. Bunlardan biri de 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi'dir. Bu yöntemin ilk adımında, büyük boyutlu şebeke daha küçük alt-şebekelere bölünmekte, ikinci adımında bu alt-şebekelerin matematiksel modeli (çözümleri) bulunmakta ve son olarak üçüncü adımında ise bu alt-şebekelerin çözümleri yardımı ile başta verilen büyük boyutlu şebekelerin çözümü elde edilmektedir. Enterkonnekte şebeke yapısı ve bölgeler arası enerji alış-verişleri düşünüldüğünde bu yöntemin faydaları ve kullanılabilir oluşu ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi bir enerji sisteminde enerji iletimi ve varsa bölgeler arasındaki yük alış-verişleri yük tevzi merkezleri tarafından planlanmakta, işletilmekte ve kontrol edilmektedir. Bu kontrolü iyi bir şekilde yapabilmek için, sistemdeki yük akışları bilinmelidir. Yük akışı analizi için büyük boyutlu enerji sistemleri genel olarak bara admitans matrisini verecek biçimde modellenmekte ve çözümü yapılmaktadır.

Çözümler sayısal programlar kullanılarak simüle edilmekte ve sistem bilgileri gözlenmektedir. Yük akışı çalışmaları, giderek büyüyen güç sistemlerinin planlanması, tasarımı ve var olan sistemlerin en iyi işletim koşullarının belirlenmesinde olduğu kadar bu sistemler (bölgeler arası) arasındaki net enerji alış-verişlerinin belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde de büyük önem arz etmektedir. Yük akışı probleminin non-lineer olması iterasyon metodlarını gerektirmektedir. Bu nedenle şebekelerde yük akışı analizi için iki temel iterasyon metodu kullanılmaktadır; Gauss-Seidel metodu, Newton-Raphson metodu. Bu yöntemlerden 'N-R' metoduyla yük akışı çözümünde, öncelikle bara gerilimlerinin hesaplanması gerekmektedir. N-R metodunun başarısı, ilk tahminlerin doğru yapılmasıyla çok ilgilidir. Enerji sistemlerinde, ilk tahminlerin bara gerilimleri için yapıyor olması ve genel olarak bara gerilimlerinin nominal gerilimin  $\pm \%5$ 'i kadar değişiklik göstermesi, ilk tahminlerin doğru yapılmasına imkan vermektedir. Bu nedenle N-R metodunda ilk gerilim değeri olarak tüm baralarda nominal gerilim varmış gibi (ilk tahmin değeri: 1.0 pu) iterasyonlara başlanır. Bu ilk tahminler çözüme yakın olduğundan N-R metodu da birkaç iterasyon sonunda çözüme yakınsamaktadır. Büyük boyutlu şebekelerin sayıları binleri bulan bara ve hatta sahip olduğu düşünüldüğünde bu şebekelerin çözümünün elle yapılmasının mümkün olmadığı gibi çözüm için hızlı ve doğru sonuç veren algoritma ve çözüm tekniklerine de gerek duyulmaktadır. Büyük boyutlu şebeke hesaplarında matematiksel modellerde katsayılar matrisi ortaya çıkmakta ve çözüm matrissel işlemlerle yapılmaktadır. Sistem çözümünde katsayılar matrisinin sparse (bol sıfırlı) yapıda üretilmesi ve çözümde özellikle matris tersi işlemlerinde küçümsenmeyecek faydalar sağlamaktadır. Bu çalışmada, çok sayıda baraya sahip olan güç sistemlerinin modellenmesinde, devre teorisinde bugün çok iyi bilinen çok-uçlu eleman kavramı kullanılmıştır. Farklı enerji sistemlerinin veya büyük boyutlu şebekenin daha küçük parçalara bölünmeleri ile ortaya çıkan alt-şebekelerin birçok uçlu eleman olarak kabul edilmesi yani büyük boyutlu şebekenin bir takım çok-uçluların bir arada bağlanmasından oluştuğu kabulü 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' ile uyumlu bir yaklaşımdır. Tezde 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' sonucunda bulunan katsayılar matrisi 'Blok Diyagonal Band Matris (sparse)' biçiminde olup, bu bara admitans matrisi ile güç sistemlerinin yük akışı analizi yapılmıştır. Yük akışı uygulamasında matpower programından yararlanılmıştır.

# **MODELLING OF LARGE SCALE NETWORKS AND LOAD FLOW ANALYSIS**

## **SUMMARY**

Today, energy is a strategic, political and economic world axis has been social development is one of the most important elements is the value. Rapid industrialization and urbanization, rapid population growth, growth of energy consumption in a way that can not be prevented, the current energy sources require the use of more economically and more efficiently.

To help meet the growing need for electrical energy to the creation of the largest, most powerful energy production power plants, energy systems, obtaining optimum productivity as well as to operate power systems are being created between them by linking to the interconnected networks. Thus, electricity networks, structures, properties and dimensions are increasingly growing. Nowadays, one of the country's energy demand is increasing their self sources meet is not possible. Hence the need for countries to meet the requirements of the energy they create energy policies, to meet energy vulnerabilities or electrical energy from the outside the primary sources of energy are required to take. In this context, the international trade of electrical energy is the energy policies of developed countries that, depending on the trade develop also. Power systems are large, and the importance of international trade in electrical electricity energy exchange between the regions due to the buying-in has become important. However, power systems planning, design of these systems growing dimensions and makes it inevitable that the computer to bring up. Computer calculations of linear or non-linear equation has solution is required, the number of elements of the complex matrix coefficients and very large size bus also makes these systems solve less memory, processing time and the number of operations that require a new solution algorithm and methods brought by the quest. This work is part of the mathematical processes, giving shape coefficients matrix solution algorithms. For example, LU (lower triangle top triangle structure) or LDU (lower triangle top triangle diagonal structure). One of them is the 'Tearing and Reconnection Method'. The first step of this method, large-sized network is divided to smaller sub-networks, the second step of the mathematical model of this sub-networks (solutions) and finally the third step, there are solutions to these sub-networks, particularly the large-scale networks with the aid of the solution is obtained. Interconnected network structure and energy exchange between the regions concerned, the benefits of this method and are available for purchase-whether arise. As is known, if there is an energy system, energy transfer and load exchanges between regions is planned, operated and controlled by the Load Dispatch Center. This is a good way to be able to control the system load flows must be known. Load flow analysis for large-sized energy systems in general are modelled to admittans matrix and solution to the bus. Solutions are being simulated using digital programs and system information. Load flow studies are important in planning and designing of growing power systems, and determining the best operating conditions of the existing systems, as well as

indetermining and evaluating the net energy exchange between these systems. Iteration methods are required by Load flow problem is non-linear. Therefore, two basic iteration method for load flow analysis used in networks; Gauss-Seidel method, Newton-Raphson method. First of all, while solving load flow problem by 'N-R' method in these the bus voltages are required to calculate. The success of this method relates first right predictions. Energy systems, the initial predictions to be made for bus voltages and to varying voltages up to  $\pm 5\%$  of nominal voltage in general, allows for making accurate the first predictions. Therefore N-R method use the first voltage value like all buses nominal voltage (the first forecast value: 1.0 pu) iteration to get started. Because of the fact that these initial estimates are close to the solution, NR method is converging at the end of a few iterations. If large-scale networks is thought with thousands of buses and lines, as the solution of these networks is impossible by hand is impossible, for fast and accurate solution algorithms and solution techniques are required. At large-scale network calculations, The matrix coefficients is emerged and the solution is made with matrix processes in mathematical models. At the system solution, the production of matrix coefficients in sparse structure provide benefits especially in the matrix inverse operations. In this study, at modeling of power systems which has a large number of bus, the concept of multi-terminal devices are used which is very well known in circuit theory today. Sub-networks is emerged by different energy systems, or large-sized network which is splitted into smaller pieces and sub-networks are accepted multi-terminal elements. That is, acceptance of large scale Networks are consisted of connections multi-terminals is compatible with 'Tearing and Reconnection Method'. In this thesis, the coefficient matrix as a result of 'Tearing and Reconnection Method' is formed in 'Block Diagonal Band Matrix (sparse)', and the power system load flow analysis was performed this bus admittance matrix. Application of the load flow program was used matpower.

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi en çok kullanılan ve en ekonomik olan bir enerji türüdür. İlk olarak 19. yüzyılın sonlarına doğru aydınlatma amacıyla kullanılmaya başlanan elektrik enerjisine olan talep, sonraki yıllarda çok büyük boyutlara ulaşmıştır. Sanayiden ulaşım, aydınlatmadan ısınmaya kadar her alanda günlük yaşamın vazgeçilmez parçası haline gelmiştir. Elektrik enerjisi üretimi hidroelektrik, termik ve nükleer santraller olmak üzere başlıca 3 temel metotla yapılmaktadır [1].

Elektrik enerjisi 4.16 kV, 13.8 kV, 18 kV veya 22 kV gerilim seviyelerinde üretilmekte ve uzak mesafelere iletimi için gerilim seviyesi 154 kV ve üzerine yükseltilmektedir [2].

Artan elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi için büyük güçlü enerji üretim santrallerinin oluşturulması gereğinin yanında, enerji sistemlerinin işletilmelerinde optimum verimin elde edilmesi amacıyla farklı güç sistemlerini aralarında bağlayarak enterkonnekte şebekelerin oluşturulması gerekmektedir. Böylelikle elektrik şebekelerinin yapıları, nitelikleri ve boyutları giderek büyümektedir. Güç sistemlerinin boyutlarındaki bu artış ve artan enerji ihtiyacının karşılanması için yapılan uluslararası elektrik ticaretindeki artış ile bölgeler arası elektrik enerjisi alış-verişleri de önem kazanmıştır.

Günümüzde bu durumdaki şebekelerin analizinde bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Boyutları giderek büyüyen bu şebekelerin planlanması ve işletilmesi sırasında karşılaşılan sorunların çözümü için yapılan bilgisayar hesaplamalarında bazı kolaylıklar sağlamak üzere, şebekelerin formülasyonunda yeni yöntemler ortaya atılmakta ve bu konudaki çalışmalar halen yoğun bir şekilde sürdürülmektedir [3].

Bu amaçla bu çalışmada, tüm fiziksel sistemlerin (mekanik, hidrolik, termik...) modellenmesi için geçerli olan ve bugün artık devre teorisinde önemli bir kavram olarak yerleşmiş olan çok-uçlu eleman kavramı kullanılmıştır.

Büyük boyutlu şebekelerin analizinde çok-uçlu elemanların temel elemanlar olarak göz önüne alınmasının yararlı olabileceği ve matematiksel modellerin anlamlı ifadeler olarak elde edilebileceği görüşüyle hareket edilmiştir. Bu yolla da elektrik enerji şebekeleriyle alakalı problemlerin detaylı olarak incelenmesi mümkün olmuştur [4].

Bu çalışmada büyük boyutlu şebekelerin modellenmesi için ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ çok-uçlu eleman kavramı yardımıyla incelenilmiştir. İncelenilen bu yöntem, büyük boyutlu şebekelerin analizinde (genellikle bara gerilimlerinin hesabında) kullanılan ve bilgisayar uygulamalarında etkili olan bir yöntemdir. ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’nde büyük boyutlu şebekeler daha küçük alt-şebekelere ayrılmakta, her bir alt-şebekeye ilişkin çözümler (modeller) bulunmakta ve bu çözümler yardımıyla bütün şebekenin çözümü elde edilmektedir. ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’nin amacı, analiz sonunda devre denklemlerinin sparse şekilde elde edilmesidir [4].

Büyük boyutlu şebekelerin, ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile modellenerek analiz edilmesinin faydaları arasında; sistemde oluşan arızalar sonucu devre dışı olan veya sisteme yapılan ekler sonucu boyutu büyüyen şebekelerin yeniden modellenmesinde, söz konusu fiziksel değişiklikleri içeren yeni modeller sadece değişikliğin olduğu alt-şebekelerin yeniden hesaplanması biçiminde, tüm şebeke modelini yeni baştan kurmadan yapılabilmek olanağı vermesi sayılabilmektedir.

Özellikle arıza analizlerinde empedans veya admitans parametrelerine bağlı şebeke modelleri, çok-uçlu eleman kavramı ile çok daha anlamlı ve açık ifadelerle verilebilmekte ve algoritmalar kolayca bilgisayar ortamına aktarılabilir. Bu yolla üretilen devre denklemleri;  $A \cdot x = b$  biçiminde olup, burada  $[A]_{n_e \times n_e}$  ( $n_e$ =eleman sayısı) boyutunda elemanları kompleks yapıda olan bir kare matristir. Çözüm için bu büyük boyutlu ve kompleks elemanlı katsayılar matrisi ‘A’ nın tersinin alınması, iterasyon çözüm yöntemlerinde ise bu yapıda olan Jacobian matrisinin her adımda tersinin alınmasını gerektirmektedir.





giderek büyüyen güç sistemlerinin planlanması - tasarımı ve var olan sistemlerin en iyi işletim koşullarının belirlenmesinde olduğu kadar bu sistemler (bölgeler arası) arasındaki net enerji alış-verişlerinin belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde de büyük önem arz etmektedir. Büyük boyutlu şebekelerin modellenmesinde çok-uçlu eleman kavramı (alt-şebekeler için) parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi kullanılarak, katsayılar matrisi  $Y_{BARA}$  ve  $Z_{BARA}$  sparse biçimde elde edilerek, çözüm algoritmaları uygulanır. Büyük boyutlu şebekelerde yük akışı analizinde denklemler non-lineer olduğu için çözüm için iterasyon metodlarının kullanılması zorunluluğu vardır. Bu çalışmanın uygulama bölümünde N-R yöntemi ile yük akışı yapılmıştır [6, 7].

### 1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, modern devre teorisi kuralları ve devre teorisinde çok iyi bilinen çok-uçlu eleman kavramı yardımıyla, elektrik enerji sistemlerinin sinüzoidal sürekli haldeki durumları incelenmiştir. Bu amaçla elektrik şebekeleri çok-uçlu eleman olarak göz önüne alınmış ve bu çok-uçlunun; ‘Uç-Graf, Uç-Denklem’ biçiminde verilen ‘Matematiksel Modeli’ (çözümü) elde edilmiştir. Böylece ele alınan şebeke problemlerinin çözümlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Büyük boyutlu şebekelerin analizinde, çok-uçlu olarak modellenen şebekelerin aralarında bağlanması ile oluşmuş olan şebeke yapısı ele alınmış ve modellenmiştir. Diğer bir bakışla büyük boyutlu şebeke daha küçük alt-şebekelere bölünmüş, alt-şebekeler çözülmüş ve bu çözümler yardımıyla büyük boyutlu şebekenin çözümü elde edilmiştir.

Büyük boyutlu şebekelerin ekonomik işletilmeleri sırasında bara gerilimlerinin ve hat yüklenmelerinin sürekli kontrol edilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla, güç sistemlerinin işletilmelerinden önce bara gerilimlerinin hesaplanması istenir. Bir güç sisteminin bara gerilimi sistem birçok uçlu olarak ele alınarak hesaplanabildiği gibi, bu sistem birkaç parça olarak düşünülerek (alt-şebeke) de hesaplanabilmektedir. Bu hesap bilgisayarda uygulama kolaylık sağlaması açısından ve sistemler arası güç alış-verişleri düşünüldüğünde önem arz etmektedir. Bu çalışmada, büyük boyutlu şebekelerin analizinde bilgisayara uygulamada yararlı bir yöntem olan ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ konusu bu nedenle ele alınmıştır.

Bu tezde, literatürde bilinen bu yöntemin MATLAB programlama diline uygun bir algoritması ile örnek sistemlerde uygulanarak, elde edilen sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır.

## 1.2 Literatür Araştırması

Tez kapsamında temel olarak büyük boyutlu şebekelerin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile bara admitans matrisi bulunmakta ve buna göre yük akışı analizi yapılmaktadır. Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi ilk olarak G. Kron tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntem literatürde, Piecewise Solution of Large-Scale Systems, Tearing and Reconnection vb. adlarla bilinmektedir. 1951-1953 yıllarında Kron tarafından, güç sistemlerinde iletim kayıplarının B-sabitleri yardımıyla modellenmesi ve daha sonra da modelleri belli olan alt sistemlerin birbirleriyle bağlanmasından oluşan bir sistemin iletim kayıplarının, bu belli modellerden hareket edilerek hesaplanması, ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’nin başlangıcı olmuştur. 1953-1954 yıllarında Kron, uç denklemleri  $V=Z.I$  biçiminde alınarak modellenmiş alt sistemlerden oluşan bir şebekedeki bilinmeyen bara gerilimlerini, bu modeller yardımıyla hesaplayarak bu yöntemi geliştirmiştir [4].

Parçalama ve yeniden birleştirme yoluyla yapılan yük akışı analizinde, parçalamaya girmeyen düğümlerden alt-şebekelere verilen güçler bir yerde alt-şebekeler (farklı sistemler) arasındaki güç alış-verişlerini de vermiş olmaktadır. Literatürde, büyük boyutlu şebekelerde yük akışı analizi için bilinen ve daha çok tercih edilen metodlar: G-S ve N-R metodudur [6, 7].



## 2. ENERJİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

### 2.1 Amaç

Bu bölümde öncelikle enerji sistemlerinin yapısının ve genel özelliklerinin devre analizi kuralları yardımıyla açıklanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda enerji sisteminin,

- çok-uçlu eleman modeli verilmiş
- ve matematiksel model devre teorisinde bilinen 'DGY' ile elde edilerek bara admitans matrisi hesabı yapılmıştır.

### 2.2 Enerji Sisteminin Çok-Uçlu Olarak Modellenmesi ve Matematiksel Modeli

Bilindiği gibi basit devre elemanı iki uçludur ve bu elemana iki-uçlu eleman denilmektedir. Uç sayısı ikiden fazla olan bir devre elemanına da çok-uçlu eleman denilmektedir. Enerji sistemleri çok-uçlu elemanlar şeklinde modellenebilmektedir, bunun için:

- Ele alınan enerji sisteminin tüm baraları (düğümleri), çok-uçlu elemanın da uçları olarak alınacaktır. Yani çok-uçlunun uç sayısı, şebekedeki bara sayısına eşit olacaktır.
- Çok-uçluyu oluşturan iki-uçlu elemanlar arasında her türlü kuplaj bağıntıları olabilir, ancak bu çok-uçlu elemanlar dışında kalan iki-uçlu veya çok-uçlu bir eleman arasında kuplaj olmamaktadır. Yani bir şebekede kuplajlı elemanlar varsa, bunlar bir çok-uçlu olarak ele alınabilmektedirler.

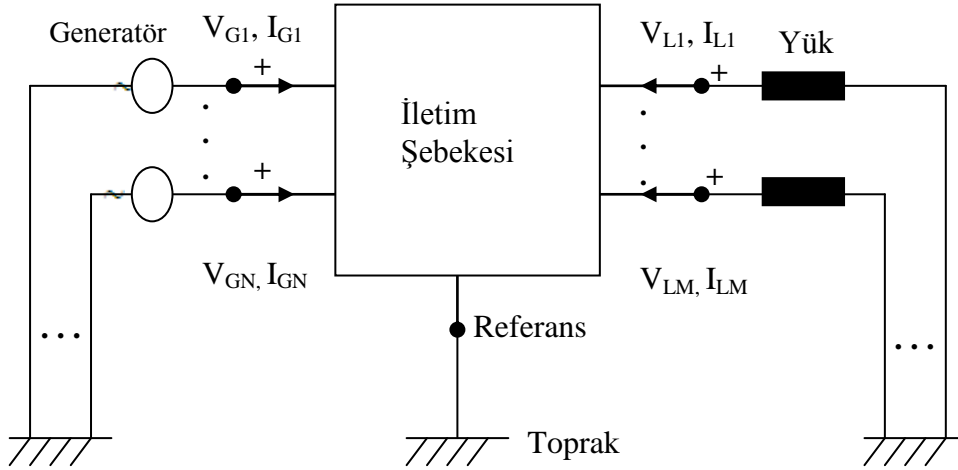
Bu çalışmada, büyük boyutlu bir elektrik şebekesi iki-uçlu R, L, C elemanlarından oluşan kavramsal bir çok-uçlu olarak ele alınmaktadır. Devreyi oluşturan elemanlar ise genel olarak; iletim hatları, generatörler, transformatörler ve bunların fiziksel olarak bağlı olduğu baralardır. Büyük boyutlu bir şebekenin analizinde bilgiler, devrenin basit hat diyagramı ve hatların omik ve reaktif direnci belli olan

empedansları olarak verilmektedir. Şekil 2.1’de bir enerji sisteminin genel hatlarıyla gösterimi verilmiştir. Burada:

$N$  : Sistemde bulunan toplam generatör sayısı,

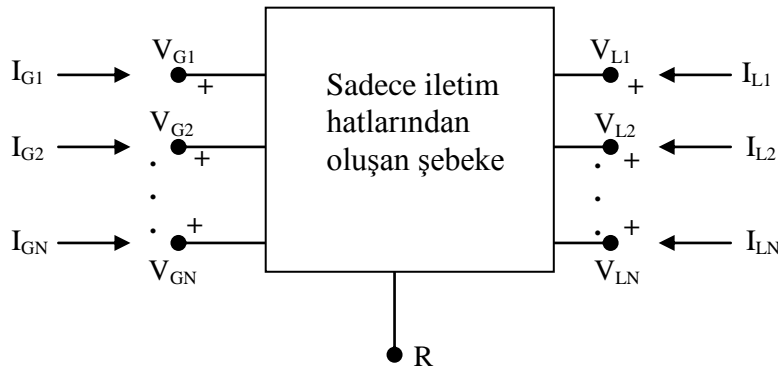
$M$  : Sistemde bulunan toplam yük sayısını

ifade etmektedir.



**Şekil 2.1** : Bir enerji iletim sisteminin genel gösterimi.

Yük akışı hesaplarında, üretim ve yükler baralara enjekte edilen akımlar olarak gösterildiğinden, Şekil 2.1’de verilen sistem Şekil 2.2’deki hale gelmektedir. Şekil 2.2, içinde R, L ve C iki-uçlu elemanların bulunduğu bir çok-uçlu sistemin genel gösterimidir.



**Şekil 2.2** : Generatör ve yüklerin baralara enjekte edilen akımlar olarak gösterimi.

Enerji sistemlerinde göz önünde tutulması gereken iki temel bilgi elemanı vardır.

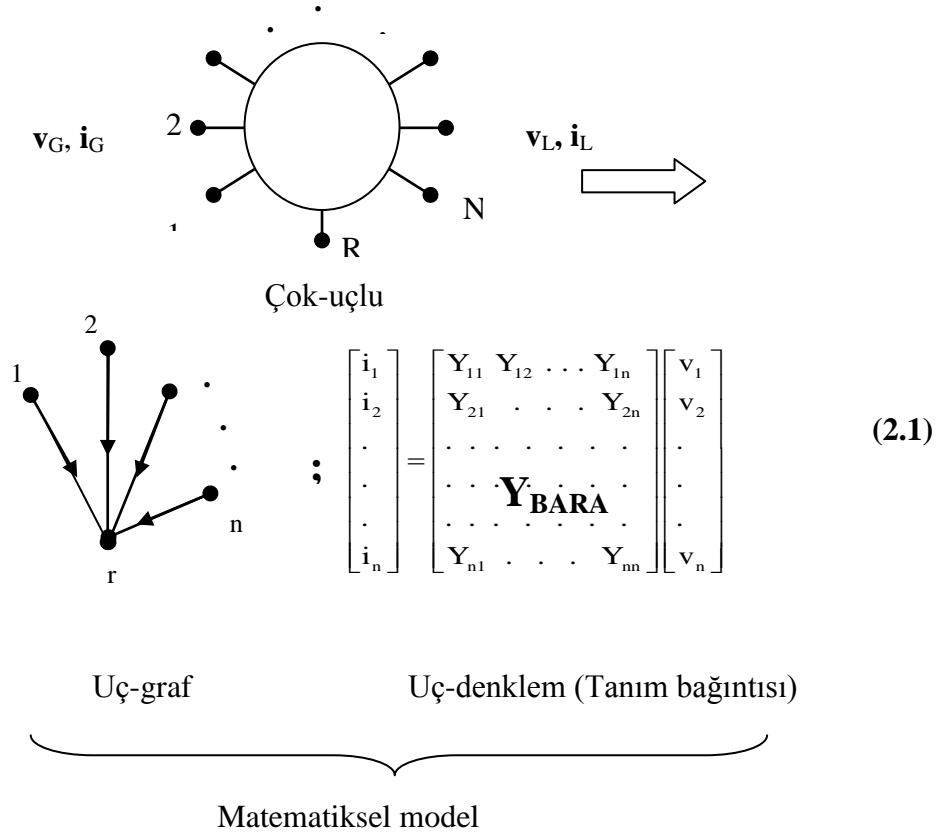
Bunlar;

- Hat bilgileri: Hatların 2-uçlu olarak devreyi oluşturmadan önceki karakteristik değerlerini vermektedir.

- Topoloji bilgileri: Hatların birbirleriyle nasıl bağlandığı hakkındaki bilgiyi vermektedir.

Bu durum devrelerin analizi söz konusu olduğunda önem arz etmektedir. Bir devre analiz edilirken devreyi oluşturan her bir elemanın ve bunların bağlantı biçiminin bir matematiksel modeli olmaktadır ve bu da çalışmada izlenen disiplinin temelini oluşturmaktadır.

İki-uçlu elemanlardan oluşan çok-uçlu olarak modellenen enerji sistemlerinin matematiksel yoldan belirlenmesinde devreler teorisinin I. postulası göz önüne alınmaktadır. Buna göre; ‘ n-uçlu bir devre elemanının bütün özellikleri, bu eleman için seçilen herhangi bir uç-grafı ile tanımlanan (n-1) akım ve (n-1) gerilim büyüklükleri arasında var olan (n-1) tane matematiksel bağıntıyla tamamen bellidir’. Böylelikle bir enerji sisteminin tüm özellikleri Şekil 2.3’ te verilen çok-uçlu ve onun matematiksel modeli ile belirlenebilmektedir [3].



Şekil 2.3 : Çok-uçlu ve matematiksel modeli.

### 2.3 Hat Bilgileri

Şebeke bileşenlerinin elektriksel karakteristikleri bir primitif şebeke matrisi formunda uygun bir şekilde sunulabilmektedir. Bu primitif model şebeke elemanların karakteristikleri hakkında bilgi verirken, bu elemanların şebekeyi oluştururken nasıl birleştikleri hakkında hiçbir topolojik bilgi vermemektedir [6, 8].

Şebekenin iki-uçlu elemanlardan oluştuğu kabul edildiğinden, tüm şebeke elemanlarının hat bilgilerini gösteren *Tanım Bağıntıları* Şekil 2.1’de verilen şekilde  $n_e \cdot n_e$  boyutlu bir kare matris olacaktır. Burada  $n_e$  büyük boyutlu bir sistemi oluşturan iki uçlu eleman sayısıdır. Hat bilgileri matrisel olarak 2.2’de verilmiştir [9].

$$[ \mathbf{v} ] = [ \mathbf{z}_p ] \cdot [ \mathbf{i} ] \quad (2.2)$$

Bu denklemdeki ‘ $z_p$ ’ katsayılar matrisine, "Primitif Empedans Matrisi" denilmektedir. Primitif empedans matrisi başta da söylenildiği gibi şebekenin elektriksel karakteristikleri hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgiler ise genel olarak, sistemi oluşturan her elemanın öz empedans ve kuplaj empedans değerleridir. Şebeke bilgileri genellikle empedans olarak verilir ve şebekede varsa kuplaj bilgileri primitif empedans matrisinde gösterilir. Burada üzerinde durulan nokta, kuplaj bilgilerinin ancak ve ancak primitif empedans matrisine yazılacağı unutulmamasıdır. Eğer gerekiyorsa, primitif empedans matrisinin tersi alınarak primitif admitans matrisi de bulunabilmektedir [7].

$$[ \mathbf{Y}_p ] = [ \mathbf{z}_p ]^{-1} \quad (2.3)$$

Primitif empedans matrisinin genel özellikleri:

- Bu matris kare bir matristir ve matrisin boyutu sistemdeki eleman sayısı kadardır. 2.4 nolu denklemde ‘n’ eleman sayısını belirtmektedir.

$$\mathbf{Z}_p = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

- Elemanları kompleks sayılardır.



- Şebeke elemanları arasında kuplaj yoksa  $Z_p$  "Primitif empedans matrisi" diyagonal bir matris olur. Bu durumda tanım bağıntıları 2.5 nolu denklemdeki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ . \\ . \\ . \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ . \\ . \\ . \\ i_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Kuplajın mevcut olması halinde 2.5 denklemdeki "Primitif empedans matrisi" nin diyagonalı dışındaki terimleri sıfırdan farklı olmakta, matris kuplajlı eleman sayısına bağlı olarak dolu ya da seyrek (sparse) bir matrise dönüşmektedir [4].

Çözümüne giderken, primitif empedans matrisi devre grafında seçilen dal ve giriş ayırımına 2.6'da olduğu gibi dal ve girişlere göre alt matrislere ayrılmalıdır. Bu işlem, temel çevre ve temel kesitleme denklemlerindeki dal-giriş gruplandırmasındaki uç değişkenleri sıralamasına uygun olması için yapılmalıdır [4].

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dk} \\ Z_{kd} & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

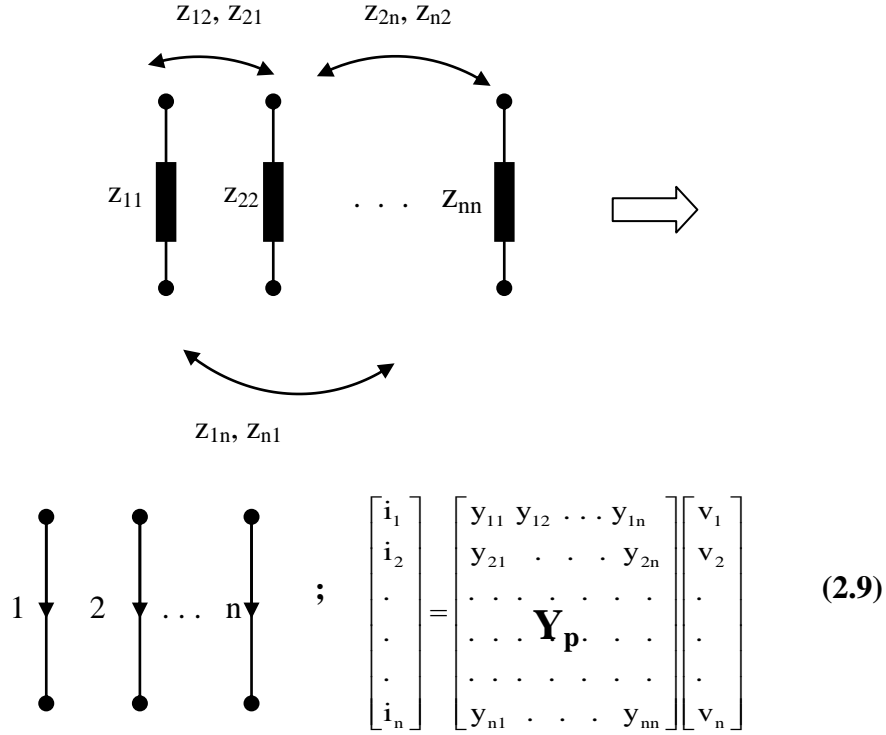
Bir sistem olarak birlikte çalışan şebeke komponentlerinin karalı-hal davranışları şebeke denklemlerinin düğüm analizi temeline dayandırılarak (topoloji denklemleriyle çözüm) düğüm admitans veya empedans matrisleri şeklinde Şekil 2.4'teki gibi verilir.

Bir şebeke matrisinin (uç-denklemler) elemanları bağımsız değişkenler olan gerilim ve akımların seçilişine bağlıdır. Buna bağlı olarak, şebeke matrisinin elemanları 2.7 ve 2.8 nolu denklemlerden görüldüğü üzere, empedanslar veya admitanslar olabilmektedir [6, 8].

$$[V] = [Z_{BARA}] \cdot [I] \quad (2.7)$$

$$[I] = [Y_{BARA}] \cdot [V] \quad (2.8)$$

Bara empedans matrisinin satır ve sütun sayısı bara sayısına eşittir. Bu matrise bara empedans matrisi denilmesinin nedeni budur; devredeki tüm baraların empedans değerlerini göstermesidir.



Şekil 2.4 : İki-uçlu elemanlardan oluşan çok-uçlu ve matematiksel modeli.

Bara empedans matrisinin tersi bara admitans matrisini verir ve aşağıdaki gibidir;

$$[Z_{\text{BARA}}]^{-1} = [Y_{\text{BARA}}] \quad (2.10)$$

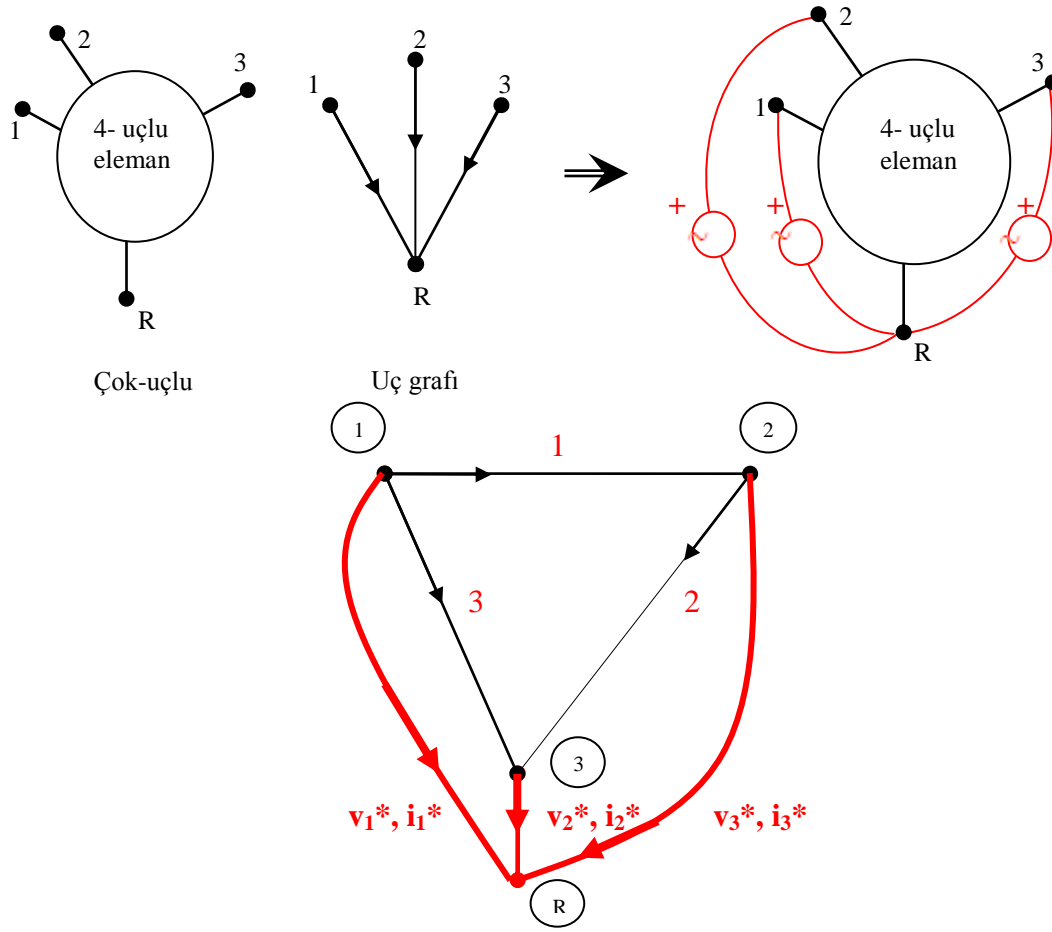
$Z_{\text{BARA}}$  diyagonale göre simetrik olduğundan, aynı şekilde  $Y_{\text{BARA}}$  da simetrik olmak mecburiyetindedir.  $Z_{\text{BARA}}$ 'yı elde etmek için bara admitans matrisinin hesaplanmasına gerek yoktur.  $Z_{\text{BARA}}$ 'nın direk hesaplanması için hızlı metotlar geliştirilmiştir. Bara empedans matrisi ( $Z_{\text{BARA}}$ ) daha çok arıza hesapları için gerekmektedir. Burada bir şebekenin bara empedans matrisinin varlığından söz edebilmek için,

- 1) Seçilen referans noktasının devre ile fiziksel bağı (devre üzerinde) olması,
- 2) Eğer referans olarak toprak seçilecekse devrenin herhangi bir noktasının toprakla bağı olması

gerekmektedir.

Bara admitans matrisinin ( $Y_{\text{BARA}}$ ) için böyle bir koşul sözkonusu değildir ve devrenin toprakla bağı olmasa da toprak referansına göre  $Y_{\text{BARA}}$  mevcuttur. Bu yolla paralel admitanslarında hesaba katılması mümkün olmaktadır. Tezin ana konusu olan Parçalama-Yeniden Birleştirme Yöntemi ile  $Y_{\text{BARA}}$  nın sparse biçimde elde edilmesi hedeflenmiştir [9].





Şekil 2.6 : Seçilen uç-grafına göre çok-uçlunun uyarılması ve devre grafı.

Dal Gerilimleri Yöntemi'ne göre; devre gerilim kaynakları ile uyarılmakta, uygun ağacı (denklem kurma ağacı) oluşturmaktadır. Bu tür uyarımda gerilim kaynakları ağacı oluşturduğundan tüm hatlar kirişlerde kalmaktadır. (Bkz. Şekil 2.7) Bu graf yardımı ile yapılan temel kesitleme ve temel çevre denklemleri sırayla 2.11 ve 2.12'de verilmiştir. Bu denklemlerde;

$\mathbf{i}^*$ ,  $\mathbf{v}^*$  : Dışarıdan bağlanılan kaynakların (uyarılmış devre grafındaki dallar) akım ve gerilim vektörlerini ifade etmektedir.

$\mathbf{i}_k$ ,  $\mathbf{v}_k$  : Şebeke elemanlarına ait (uyarılmış devre grafındaki kirişler) akım ve gerilim vektörlerini ifade etmektedir.

$$[\mathbf{U} \mid \mathbf{Q}] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}^* \\ \mathbf{i}_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.11)$$

$$\left[ -Q^T \mid U \right] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}^* \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.12)$$

Bu bağıntılar bize devre topolojisi hakkında bilgi vermekte olup elemanların birbirleri ile bağlantı biçimlerini belirlemektedir.

Sistemin hat (şebeke) bilgileri ise primitif empedans matrisi ile topluca ifade edilmektedir. Bu matris,

$$Z_p = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdot & \cdot & z_{1n} \\ z_{21} & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot & \\ z_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & z_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.13)$$

Biçimindedir. Bara admitans matrisi ise bu matrisin tersi alınarak bulunmaktadır.

$$[Y_p] = [Z_p^{-1}] \quad (2.14)$$

Buna göre,DGY de devre elemanlarının admitans parametrelerine bağlı tanım bağıntıları;

$$\mathbf{i}_k = Y_p \cdot \mathbf{v}_k \quad (2.15)$$

biçiminde olacaktır. Denklem 2.11'den 2.16 bağıntısı çıkarılabilmektedir.

$$\mathbf{i}^* = -Q \cdot \mathbf{i}_k \quad (2.16)$$

Bu yolla dal akımlarını giriş akımları cinsinden ifade etmektedir. 2.15 bağıntısı 2.16'da yerine konularak 2.17 bağıntısı elde edilmektedir.

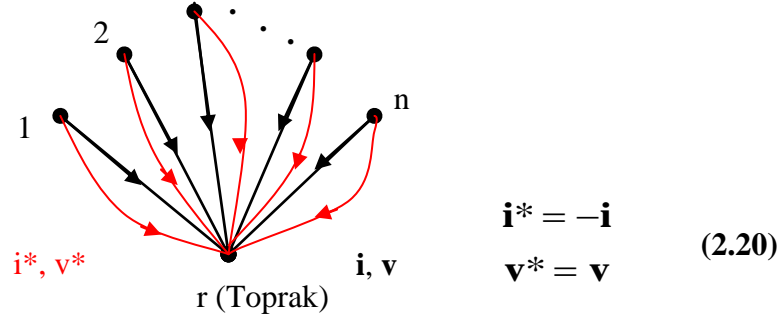
$$\mathbf{i}^* = -Q \cdot Y_p \cdot \mathbf{v}_k \quad (2.17)$$

Burada 2.12 bağıntısından elde edilen 2.18 bağıntısı 2.17'de yerine konularak 2.19 bağıntısı elde edilmektedir. Bu bağıntıyla, devreyi uyarmak için bağlanan gerilim kaynaklarının akım ve gerilimleri olan  $\mathbf{i}^*$ ,  $\mathbf{v}^*$  cinsinden devre çözülmüş olmaktadır.

$$Q^T \cdot \mathbf{v}^* = \mathbf{v}_k \quad (2.18)$$

$$\mathbf{i}^* = -Q \cdot Y_p \cdot Q^T \cdot \mathbf{v}^* \quad (2.19)$$

Ancak 2.20’de verilen matematiksel model  $(\mathbf{i}, \mathbf{v})$  ve  $(\mathbf{i}^*, \mathbf{v}^*)$  arasındaki ilişkiyi tanımladığı için 2.19 ifadesini bu uç büyüklüklerine bağlı olarak ifade etmek gerekmektedir. Bunun için Şekil 2.7’deki uyarılmış devredeki kaynak bağlantılarını gösteren uç-graf yardımıyla oluşturulan graftan 2.20 bağıntısı elde edilmektedir.



Şekil 2.7 : Uyarılmış devre grafi.

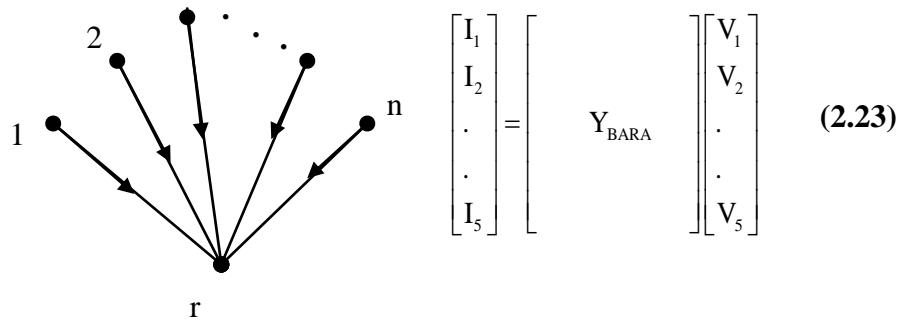
2.20 bağıntısında verilen ifadeler 2.19’da yerine konularak 2.21 denklemi elde edilmektedir.

$$\mathbf{i} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Y}_p \cdot \mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{v} \quad (2.21)$$

Böylece aranılan matematiksel modelde 2.20’de verilen uç-denklemleri elde edilmiş olmaktadır. Burada;

$$\mathbf{Y}_{\text{BARA}} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{Y}_p \cdot \mathbf{Q}^T \quad (2.22)$$

tanımı yapılırsa, matematiksel model Şekil 2.8’deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 2.8 : Çok-uçlu elemanın matematiksel modeli.

### 3. PARÇALAMA VE YENİDEN BİRLEŞTİRME YÖNTEMİ

#### 3.1 Giriş

Bara ve hat sayısı çok fazla olan büyük boyutlu elektrik şebekelerinin analizi, A büyük boyutlu bir matris olmak üzere,  $A.x = b$  biçiminde bir denklem sisteminin çözümünü gerektirmektedir. Literatürde bu tür denklemlerin çözümü için bir çok metod geliştirilmiştir (LU Dekompozisyonu, LDU vs.) Bunlar daha çok matematiksel işlemlerle A matrisine çözüme uygun biçimler vererek daha kolay çözüm üretme teknikleridir [10].

‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’nin amaçlarından biri sistemi modellerken çözüme uygun ve sparse olan blok diyagonal band matris biçiminde olan bir A katsayılar matrisini elde etmektir. Bu amaca yönelik çalışmalar içinde, düğümlerden parçalama yapılarak şebekelerin daha küçük boyutta alt-şebekelere bölünmesi ve bu alt-şebeke çözümlerinden faydalanılarak tüm şebekenin çözümünü elde etmeye yönelik parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada, alt-şebekeler daha önce matematiksel modeli açıklanmış olan çok-uçlu elemanlar olarak ele alınmakta ve problem çok-uçlu elemanların aralarında bağlanması problemine dönüştürülmektedir.

Bu yöntem tüm fiziksel sistemlerin modellenmesi ve analizinde kullanılan genel bir yöntem olup, tezin bu bölümünde bu yöntemin elektrik enerji sistemlerine uygulanarak, yük akışı analizinde kullanılacak olan  $Y_{BARA}$ ’nın, yukarıda sözü edilen blok diyagonal band biçiminde sparse bir matris olarak elde edilmesi konusu ele alınmıştır.

Çok fazla sayıda bara içeren elektrik şebekelerinin analizi, A büyük boyutlu bir kare matris olmak üzere,  $A.x = b$  biçiminde bir denklem sisteminin çözümünü gerektirmektedir. Bu tür elektrik şebekelerinin çözümünde olduğu kadar pek çok fiziksel sistemin analizinde de kullanılan ve bilgisayar uygulamalarında yarar sağlayan bir yöntem ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’dir [4].

İlk olarak G. Kron tarafından ortaya konulan bu yöntemde, Diakoptics, Piecewise Solution of Large-Scale Systems, Tearing and Reconnection vb. adlarla literatürde bilinmektedir. Kron, uç denklemleri  $I = Y.V$  biçiminde alınarak modellenmiş alt sistemlerden oluşan bir şebekedeki bilinmeyen bara gerilimlerini, bu modeller yardımıyla hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem üç ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Büyük boyuttaki şebekelerin (sistemin), birbirinden yalıtılmış ve daha küçük parçalara (alt şebekelere) ayrılması,
2. Her alt şebekeye ilişkin modellerin (çözümlerin) bulunması,
3. Bu modellerin kullanılmasıyla tüm şebekenin çözülmesi.

Verilen şebekenin daha küçük alt şebekelere ayrılması işlemi, tutulan yollar bakımından; şebekeden eleman kaldırılarak yapılan parçalama ve şebekeyi düğümlerden parçalama olmak üzere iki grupta toplanabilmektedir. Bu bölümde verilen şebekenin alt-şebekelere ayrılması düğümlerden parçalama ile yapılmıştır [4].

Verilen şebekenin hangi baralardan kesileceği veya hangi elemanların kaldırılarak daha küçük alt şebekelere ayrılmasının uygun olacağı, henüz tam anlamıyla çözülememiş bir konu olup, bu konudaki çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada bölgeler arası yük alış-verişleri gözlenmek istendiği için alt şebekelerin belli olduğu ve parçalamanın buna göre yapıldığı varsayılmıştır [4].

‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ iki amaçla yapılabilmektedir;

- 1) Analiz sırasında elde edilen denklem sistemindeki denklem sayısının azaltılması
- 2) Denklem sisteminde tüm baraları içeren katsayılar matrisinin sıfırı bol (sparse) biçimde elde edilmesidir [11].

Bu bölümde, konuyla ilgili olarak bugüne kadar yapılan çalışmalara, çok-uçlu eleman kavramı kullanılarak değinilmiş, düğümlerden parçalama yoluyla yapılan ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme’ de, bilinmeyen düğüm gerilimlerinin belirlenmesi için gereken matris ters alma işlemini, daha küçük matrislerin tersi alınarak, adım adım gerçekleştiren bir yöntem verilmiştir [4].



### 3.2 Dügümlerden Parçalama Yoluyla ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme’

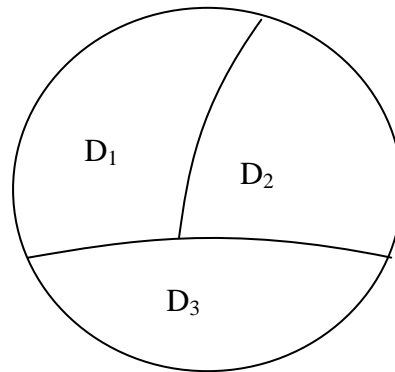
Dügümlerden parçalama yoluyla yapılan ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yönteminde’ ilk adım verilen şebekenin bazı baralarından parçalanılarak daha küçük alt-şebekelere ayrılmasıdır [4].

Burada, genel durumu yansıması açısından, matematiksel modelleri bulunacak alt-şebekelerin, akım ve gerilim kaynaklarını da içine alan iki-uçlu elemanlardan oluştuğu varsayılmıştır. Birçok-uçlunun matematiksel modelinin nasıl elde edileceği daha önceki bölümlerde açıklanmıştır. Yapılan çalışmada ‘Di’ ile gösterilen bir alt-şebekenin, seçilen bir ‘Ti’ uç - grafına ilişkin uç-denklemlerinin, admitans parametreleriyle ifade edilmesi istendiğinden ‘DGY’ kullanılacaktır. Burada alt-şebekeler, literatürde olduğu gibi ayrı ayrı birer yalıtılmış sistemler (çok-uçlu eleman) olarak ele alınmaktadır. Bu alt-şebekelerin çok-uçlu eleman olarak matematiksel modelleri bulunarak bara admitans matrisleri ( $Y_{BARA}$ ) bulunmuştur.

‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ nde üçüncü adım, ikinci adımda matematiksel modelleri elde edilmiş olan çok-uçlu alt şebekelerinin, parçalama yapmadan önceki bağlantı durumlarına sadık kalınarak bir araya getirilmesi, diğer bir deyişle alt-şebeke çözümleri yardımı ile başlangıçta verilen büyük boyutlu şebekenin çözümünün bulunmasıdır.

#### 3.2.1 Büyük Boyutlu Bir Sistemin Alt-Şebekelere Ayrılarak Analizi

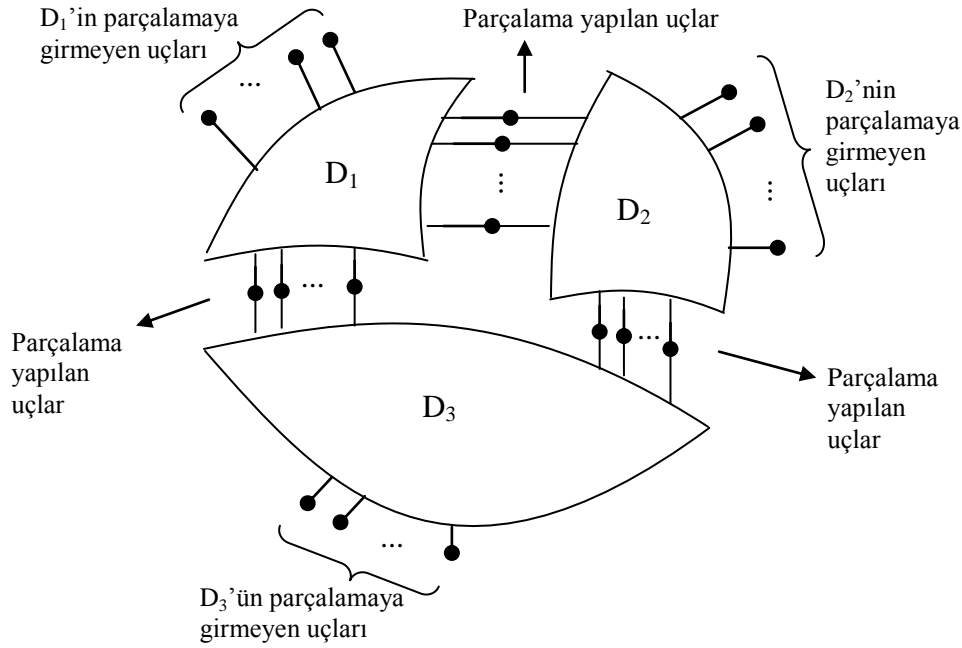
Bu bölümde, ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile büyük boyutlu bir ‘D’ şebekesinin ‘D<sub>1</sub>’, ‘D<sub>2</sub>’ ve ‘D<sub>3</sub>’ gibi üç parçaya bölünerek bara admitans matrisinin elde edilmesi ele alınmıştır. Şekil 3.1’ de şebekenin üç parçaya şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.1 : ‘D’ şebekesinin üç alt-parçaya ayrılması.

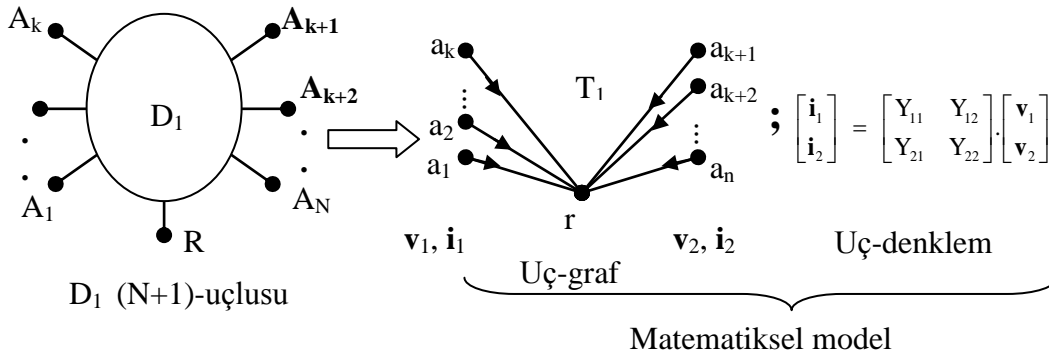
- *Parçalama*

Bu parçalama işlemi, sistem baralarını da göstericek biçimde gösterilirse,  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  alt şebekelerinin elde edilmesinde baraların parçalama yapılan baralar ve parçalamaya girmeyen baralar olarak iki grupta toplanabileceği görülür. (Bkz. Şekil 3.2)



Şekil 3.2 : 'D' şebekesinin üç alt-parçaya ayrılmış şekli.

Alt-şebekelerin matematiksel modellerinin elde edilmesinde, her alt-şebekede baralar bu mantıkla iki grup olarak tutularak  $Y_{BARA}$  hesabı için matematiksel model 'DGY' yardımı ile elde edilecektir. Bu alt-şebekelerden biri için elde edilecek olan matematiksel model Şekil 3.3'teki gibi olacaktır. Burada  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ;  $D_1$ 'de parçalamaya girmeyen baraları  $A_{k+1}, A_{k+2}, \dots, A_n$  ise  $D_1$ 'in parçalamaya giren (parçalama yapılan) baralarını göstermektedir.

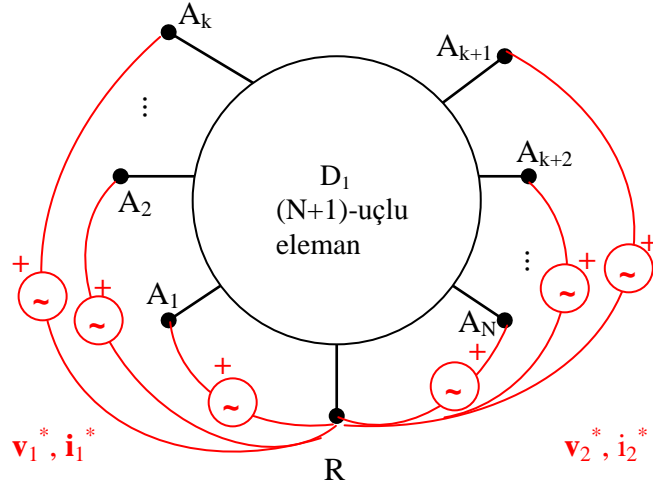


Şekil 3.3 :  $D_1$  alt-şebekesinin matematiksel modeli

Çözümde dal gerilimleri yöntemi kullanıldığı için, modeli elde etmek için yapılan uyarma işleminde gerilim kaynakları kullanılmaktadır. Burada;

$\mathbf{i}_1, \mathbf{v}_1$  :  $D_1$  alt şebekesinde parçalamaya girmeyen baraların uç değişkenleri olan akım ve gerilim vektörleri,

$\mathbf{i}_2, \mathbf{v}_2$  :  $D_1$  alt şebekesinde parçalamaya giren baraların uç değişkenleri olan akım ve gerilim vektörleridir.



Şekil 3.4 :  $D_1$  alt-şebekesinin uyarılması.

Şekil 3.4'te görülen;

$\mathbf{i}_1^*, \mathbf{v}_1^*$  :  $D_1$  alt-şebekesinde parçalamaya girmeyen baralarına bağlanan gerilim kaynaklarının akım ve gerilim vektörleridir.

$\mathbf{i}_2^*, \mathbf{v}_2^*$  :  $D_1$  alt-şebekesinde parçalamaya giren baralarına bağlanan gerilim kaynaklarının akım ve gerilim vektörleridir.

Daha önce Şekil 3.1'de örnek olarak verilen tek bir sistemin uyarılmış devre grafında görüldüğü gibi; gerilim kaynaklarının dal ve şebeke elemanlarının da kirişlerde kalması durumunda temel çevre ve temel kesitleme bağıntıları 3.1 ve 3.2 denklemlerindeki gibi olacaktır. Buradaki tek fark; sistemin uç-grafının Şekil 3.3'teki gibi parçalamaya giren ve girmeyen uçlar olarak ayrılmasıyla bu bağıntılardaki matrislerin boyutlarının artmasıdır. Bu bağıntılar topoloji bilgilerini vermektedir ve sisteminin hat bilgileri daha önce de belirtildiği gibi 3.3'deki primitif empedans matrisi ile topluca ifade edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} U & 0 & Q_1 \\ 0 & U & Q_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^* \\ \mathbf{i}_2^* \\ \mathbf{I}_K \end{bmatrix} = 0 \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} -Q_1^T & -Q_2^T & U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^* \\ \mathbf{v}_2^* \\ \mathbf{V}_K \end{bmatrix} = 0 \quad (3.2)$$

$$\mathbf{Z}_p^{-1} = \mathbf{Z}_{kk}^{-1} = \mathbf{Y}_p \quad (3.3)$$

$$\mathbf{I}_K = \mathbf{Y}_p \cdot \mathbf{V}_K \quad (3.4)$$

3.1 nolu temel kesitleme bağıntılarından giriş akımları  $\mathbf{I}_K$ 'lar dal akımları  $i_1^*$ ,  $i_2^*$  cinsinden yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^* \\ \mathbf{i}_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{I}_K = 0 \quad (3.5)$$

Burada  $\mathbf{I}_K$ 'nın 3.4'te verilen eşitliği yerine yazılırsa eşitlik aşağıdaki şekli alır.

$$\begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^* \\ \mathbf{i}_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_p \mathbf{V}_K = 0 \quad (3.6)$$

Temel çevre bağıntılarından ' $\mathbf{V}_K$ ' ifadesi ;

$$\mathbf{V}_K = \begin{bmatrix} Q_1^T & Q_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^* \\ \mathbf{V}_2^* \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

biçiminde yazılıp 3.6'da yerine konulursa;

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^* \\ \mathbf{i}_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \mathbf{Y}_p \begin{bmatrix} Q_1^T & Q_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^* \\ \mathbf{v}_2^* \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

veya

$$-\begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^* \\ \mathbf{i}_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \mathbf{Y}_p Q_1^T & Q_1 \mathbf{Y}_p Q_2^T \\ Q_2 \mathbf{Y}_p Q_1^T & Q_2 \mathbf{Y}_p Q_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^* \\ \mathbf{v}_2^* \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

elde edilir. 3.9'da, uç-grafında alınan temel çevrelere göre bulunan  $-i^* = i$  ve  $v^* = v$  ifadeleri yerine yazılırsa  $D_1$  alt şebekesi için aranan matematiksel model 3.10'daki gibi elde edilmektedir.

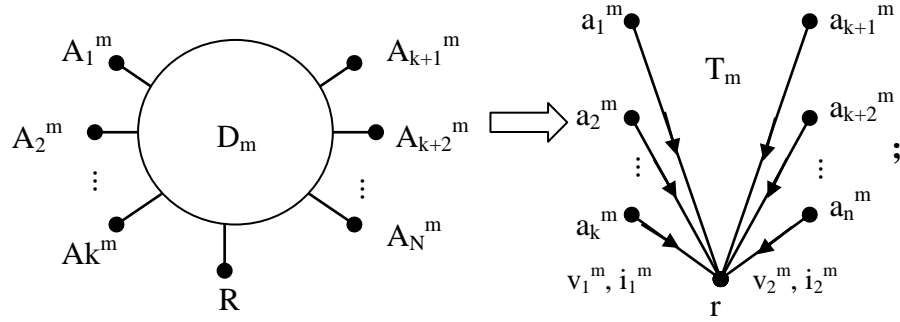
$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Böylelikle 3.10'da görülen  $\mathbf{Y}_{11}$ ,  $\mathbf{Y}_{22}$ ,  $\mathbf{Y}_{12}$ ,  $\mathbf{Y}_{21}$  alt matrisler;

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{11} &= \mathbf{Q}_1 \mathbf{Y}_p \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Y}_{12} &= \mathbf{Q}_1 \mathbf{Y}_p \mathbf{Q}_2^T \\ \mathbf{Y}_{21} &= \mathbf{Q}_2 \mathbf{Y}_p \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Y}_{22} &= \mathbf{Q}_2 \mathbf{Y}_p \mathbf{Q}_2^T \end{aligned} \quad (3.11)$$

biçiminde hesaplanır. Böylece  $D_1$  alt-şebekesi için matematiksel model, denklem 3.10'da verildiği şekilde elde edilmiş olur.

Benzer yolla  $D_2$  ve  $D_3$  için de matematiksel modeller hesaplanacaktır. Genel olarak 'k' adet alt-şebekeye ayrılan büyük boyutlu bir şebeke için alt şebeke modelleri Şekil 3.5'teki biçimde verilebilir.



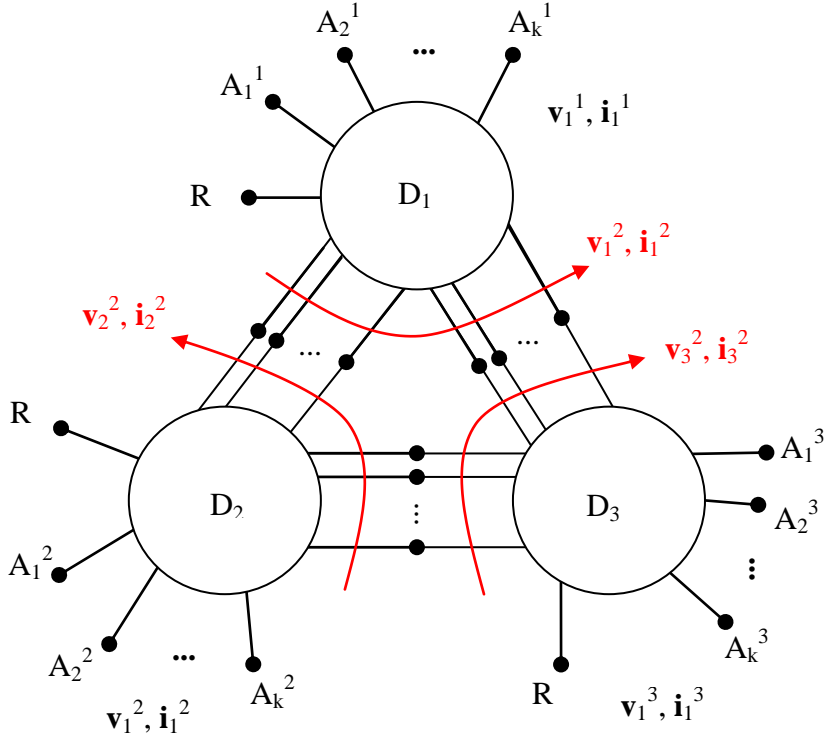
$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^m \\ \mathbf{i}_2^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11}^m & \mathbf{Y}_{12}^m \\ \mathbf{Y}_{21}^m & \mathbf{Y}_{22}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^m \\ \mathbf{v}_2^m \end{bmatrix} \quad m=1, \dots, k$$

**Şekil 3.5 :** Alt-şebekelerin çok-uçlu gösterimi ve matematiksel modeli.

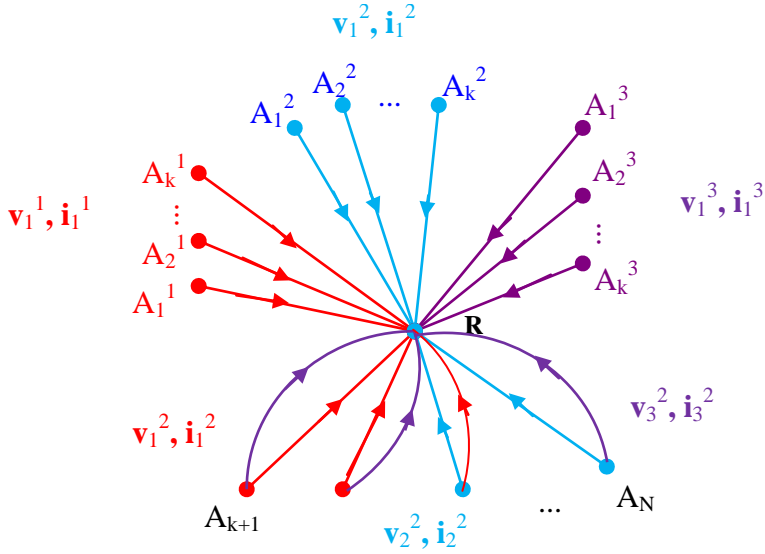
- *Birleştirme*

Alt şebekelerin matematiksel modelleri bu şekilde bulunduktan sonra bunların birleştirilmesi işlemine geçilir.

Birleştirme parçalamadan önceki bağlantı biçimine bağlı kalacak biçimde bir araya getirilen çok-uçluların Şekil 3.5'te verilen uç-grafların birleştirilmesi ile elde edilen birleştirme grafi ile gerçekleştirilir.

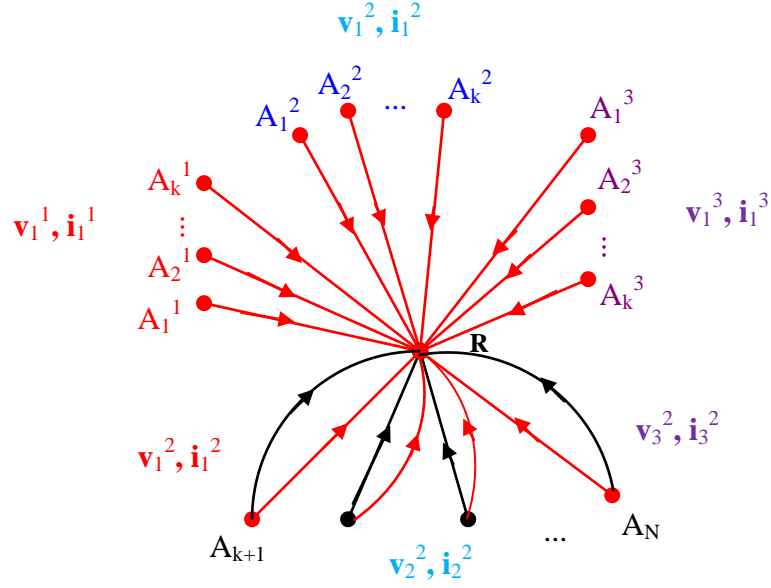


Şekil 3.6 : Çok-uçluların birleştirilmesi.



Şekil 3.7 : Birleştirme grafi.

Birleştirme grafında seçilen ağaca göre,  $(v_1^1, i_1^1)$ ,  $(v_1^2, i_1^2)$  ve  $(v_1^3, i_1^3)$  uç-büyükükleri dalda kalmaktadır. Buna ilaveten, parçalama baralarına ait uç-büyüküklerinden  $(v_d, i_d)$  olarak gösterilen bir kısımda yine dal, geri kalanlar ise kiriş  $(v_k, i_k)$  olarak kalacaklardır. Bu durum Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Burada kırmızı renkli çizgiler dalları, siyah renkliler ise kirişleri ifade etmektedir.



Şekil 3.8 : Birleştirme grafında uygun ağaç seçimi.

Buna göre yazılan temel kesitleme bağıntıları 3.12’de verilmiştir.  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  alt-şebekelerinden oluşan  $D$  çok-uçlusuna ait primitif admitans matrisi ise  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$ ’ün Şekil 3.5’te verilen uç denklemleri yardımıyla 3.13’teki biçiminde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{U} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{U} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{U} & \mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1^1 \\ \mathbf{i}_1^2 \\ \mathbf{i}_1^3 \\ \mathbf{I}_D \\ \mathbf{I}_K \end{bmatrix} = \mathbf{O} \quad (3.12)$$

$$Y_p(D) = \begin{bmatrix} Y_{11}^1 & 0 & 0 & Y_{12}^1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{11}^2 & 0 & 0 & Y_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{11}^3 & 0 & 0 & Y_{12}^3 \\ Y_{21}^1 & 0 & 0 & Y_{22}^1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{21}^2 & 0 & 0 & Y_{22}^2 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{21}^3 & 0 & 0 & Y_{22}^3 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Bu ifade işlemlerde kolaylık sağlamak üzere 3.14’te görüldüğü gibi yazılmıştır. Burada matristeki ifadeler  $Y_{AA}$ , . . . ,  $Y_{AC}$  biçiminde tanımlanmıştır. Bu tanımlara uygun olarak düzenlenen temele kesitleme denklemi ise 3.15’te verilmiştir.

$$\left[ \begin{array}{c|c|c} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ \hline Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ \hline Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{array} \right] \begin{bmatrix} v_1^1 \\ v_1^2 \\ v_1^3 \\ \hline V_D \\ \hline V_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1^1 \\ i_1^2 \\ i_1^3 \\ \hline I_D \\ \hline I_K \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\left[ \begin{array}{c|c|c} U & 0 & 0 \\ \hline 0 & U & Q \end{array} \right] \begin{bmatrix} i \\ \hline I_D \\ \hline I_K \end{bmatrix} = 0 \quad (3.15)$$

$$Q_C = \left[ \begin{array}{c|c|c} U & 0 & 0 \\ \hline 0 & U & Q \end{array} \right] \quad (3.16)$$

D çok-uçlusunun bara admitans matrisi;

$$Y_{\text{BARA}} = Q_C \cdot Y_P \cdot Q_C^T \quad (3.17)$$

$$Y_{\text{BARA}} = \left[ \begin{array}{c|c|c} U & 0 & 0 \\ \hline 0 & U & Q \end{array} \right] \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ \hline Y_{BA} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ \hline Y_{CA} & Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \\ 0 & Q^T \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$Y_{\text{BARA}} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{BA} - QY_{AC} & Y_{BB} - QY_{CB} & Y_{BC} - QY_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & U \\ 0 & Q^T \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$Y_{\text{BARA}} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} + Y_{AC}Q^T \\ Y_{BA} + QY_{CA} & Y_{BB} + Y_{CB}Q + Y_{BC}Q^T + QY_{CC}Q^T \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$Y_{\text{BARA}} = \left[ \begin{array}{c|c} Y_{AA} & \begin{bmatrix} Y_{AB} & Y_{AC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ Q^T \end{bmatrix} \\ \hline \begin{bmatrix} U & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{BA} \\ Y_{CA} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{CB} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ Q^T \end{bmatrix} \end{array} \right] \quad (3.21)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$Y_{AA} = \begin{bmatrix} Y_{11}^1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{11}^2 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{11}^3 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$



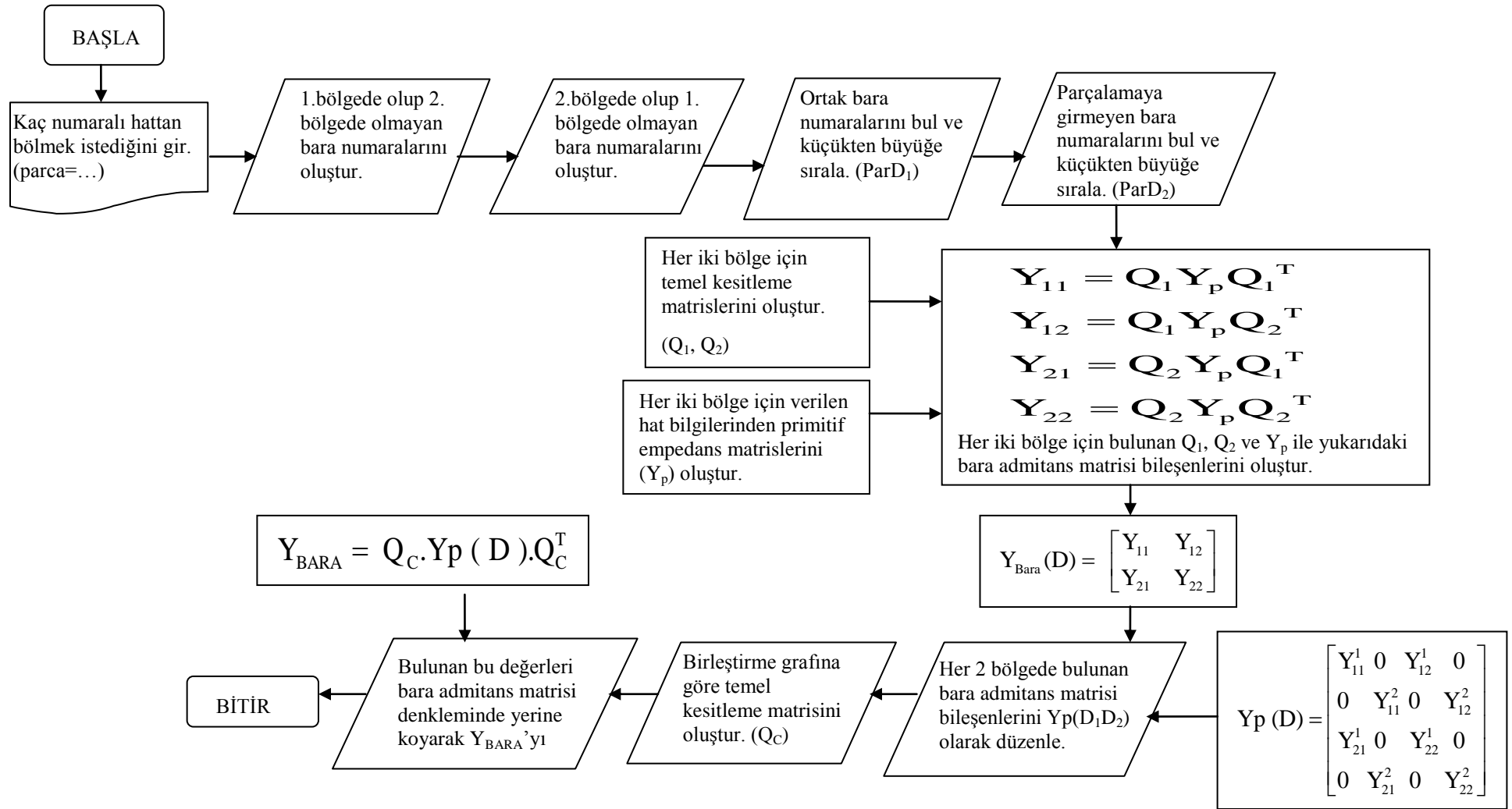
biçiminde blok diyagonal bir matris olduğunda aşağıdaki şekilde blok diyagonal band matris biçiminde elde edilmiş olur.

$$\mathbf{Y}_{\text{BARA}}^{(D)} = \left[ \begin{array}{ccc|c} Y_{11}^1 & 0 & 0 & / \\ 0 & Y_{11}^2 & 0 & / \\ 0 & 0 & Y_{11}^N & / \\ \hline / & / & / & / \end{array} \right]$$

$\leftarrow Y_{AB} + Y_{AC} Q_c^T$   
 $\leftarrow Y_{AB} + Q_c Y_{CB} + Y_{BC} Q_c^T + Q_c Y_{CC} Q_c^T$

$\downarrow$   
 $Y_{BA} + Q_c Y_{AC}$

İncelenilen sistemin çözümünde, sistem üç alt-şebekeye ayrılmıştır. Ancak bu çözüm daha çok sayıda alt-şebeke içeren sistemler için de geçerlidir. Bara admitans matrisinin bu şekilde hesaplanmasından sonra şebekenin analiz edilebilmesi için yük akışı hesabı yapılmaktadır.



Şekil 3.9 : 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme' yöntemi ile Y<sub>BARA</sub> hesabı.

## 4. YÜK AKIŞI

### 4.1 Giriş

Yük akışı hesapları, bölgesel enerji sistemleri arasındaki net yük alış-verişlerinin ve bu sistemlerinin bara gerilim değerlerinin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu bilgiler, mevcut güç sistemlerinin değerlendirilmesi ve artan güç ihtiyacına karşı giderek büyüyen güç sistemleri için verimli alternatif planların yapılabilmesi için gerekmektedir. Bu planların değerlendirmesinin yapılabilmesi için normal ve arıza durumları için birçok yük akışı analizlerinin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Yük akışı problemi, hatlar arasındaki yük akışlarının ve baraların gerilim değerlerinin hesabını içermektedir. Yük akışı hesaplamalarında, güç sistemlerinin genel olarak, simetrik yapıda ve dengede olduğu düşünüldüğü için bu sistemlerin tek fazlı olarak ele alınması uygundur. Enerji şebekelerinde her barada dört adet değişken bulunmaktadır. Bunlar: gerilim açısı ve genliği, aktif ve reaktif güçlerdir. Bu değerlerden ikisi, her barada bilinmektedir. Ancak bunların bu dört değerden hangisi olduğu baraların tiplerine göre değişmektedir. Bu durum aşağıda belirtilmiştir [8].

- Yük Barası (Tip 1) : Yük baralarında bilinenler, aktif ve reaktif güçler; bilinmeyenler, bara geriliminin genliği ( $v_p$ ) ve açısıdır ( $\delta_p$ ) [1].
- Üretim Barası (Tip 2 - PV Barası) : Bilindiği gibi generatör barasında, gerilim genliği sabit tutulur ve santral çıkışı olarak aktif güç sabitlenir. Bu iki değer yük tevzi merkezleri tarafından kontrol edilir. Bilinmeyen değerler, reaktif güç (Q) ve gerilimin açısıdır ( $\delta_p$ ) [1].
- Salınım Barası (Tip 3 - PQ Barası) : Bu barada gerilim genliği (V) ve gerilimin açısı ( $\delta_p$ ) bilinen değerlerdir. Bilinmeyen değerler ise, aktif ve reaktif güçtür [1].

Yük akışı hesabında önemli bir nokta, salınım barasının seçimidir. Pratikte çok yakın tahmin edilebilse de, şebekedeki bütün santrallerin aktif üretimlerini kesin olarak bilmek imkânsızdır. Bunun nedeni hat kayıplarının bilinmemesidir. Bundan dolayı

sistemdeki baralardan birinde aktif ve reaktif güç bilinmeyen seçilir ki, bu baraya 'salınım barası' denilmektedir. Salınım barası olarak üretim baralarından birinin seçilmesi zorunlu olmasa da çözüm için kolaylık sağlamaktadır. Salınım barasının aktif gücü değişkendir ve değeri diğer santrallerin aktif üretimleri ve aktif yüklerle aktif kayıpların toplamı arasındaki farka eşittir. Bu barada aktif ve reaktif güçler de çözümün bir parçası olarak kayıpları vermektedir [12].

Yük akışı için büyük boyutlu enerji sistemleri elektrik şebekeleri olarak modellenir ve çözüm bir sayısal program kullanılarak simüle edilir. Bilgisayar programlarının yük akışı hesaplamaları için geliştirilmesinde iki önemli husus vardır:

- Problemin matematiksel modelinin formülasyonu,
- Çözüm için sayısal bir metodun uygulanması.

Dolayısıyla, problemin analizi yapılarak bu iki faktörün düşünülmesi gerekmektedir. Sayısal programlarda; dengeli, üç fazlı, sürekli hal koşulu altında enerji sistemlerinde kullanılan güç akışı (yük akışı) algoritması genellikle aşağıda verilen kabuller üzerine kurulur:

- Generatörler sisteme bağlı tüm yük taleplerini ve iletim hatlarındaki toplam güç kaybını karşılar.
- Tüm bara gerilim genlikleri nominal gerilim sınırları civarındadır.
- Generatörler kendilerine ait aktif ve reaktif güç sınırlarını aşmazlar.
- İletim hatları ve transformatörler aşırı yüklenmezler.

Güç akışı probleminin matematiksel formülasyonunda güç-gerilim ilişkisi kullanılması nedeniyle non-lineer eşitlik çözümü gerekmektedir. Bu eşitlikler bir baranın referans bara olarak seçilmesi ve bir iterasyon metodu kullanılarak çözülebilmektedir. Eşitlik sabiti bağımsız değerlerin seçimine bağlıdır; gerilim ve akım. Bunlara göre bara admitans veya empedans matrisi kullanılabilir. Ancak, büyük boyutlu güç sistemleri için yapılan yük akışı programlarının çoğu kullandığı metodlarda bara admitans matrisini kullanmaktadır. Bu durum matris tersinin alınması durumunu ortadan kaldırdığı için bilgisayar zamanını ve hafıza ihtiyacını azaltmaktadır [1, 8].

## 4.2 Yük Akışı Eşitlikleri

### 4.2.1 Şebeke performans eşitlikleri

Bir güç sisteminin bara admitans matrisi kullanılarak şebeke performans eşitliğini gösteren ifade 2.7 nolu denklemde verilmiştir. Bu denklem aynı zamanda, daha önceki bölümlerde şebekenin matematiksel modeli olarak tanıtılan denklemdir. Buradaki bara admitans matrisi toprak referans alınarak oluşturulabilmektedir. Böylece hatların, şönt admitans parametreleri de matris elemanı olarak kapsama alınmış olacaktır. Toprak barası referans olarak seçilmişse, bu eşitlikteki bara gerilim değerleri de toprağa göre alınan gerilimlerdir.

### 4.2.2 Bara güç eşitlikleri

Enerji sisteminde, her bir baradaki (p. bara) aktif ve reaktif güçler 4.1 nolu denklemde, akım ise 4.2 nolu denklemde ifade edilmiştir.

$$S_p^* = P_p - jQ_p = E_p^* \cdot I_p \quad (4.1)$$

$$I_p^k = \frac{P_p^k - jQ_p^k}{(E_p^k)^*} \quad (4.2)$$

Bu akım ifadesinde bulunan değer pozitif ise bu yük akışının sisteme doğru olduğunu göstermektedir [8].

- Baralar arası güç akışı eşitlikleri:

Bara gerilimlerinin iterasyon çözümüyle bulunmasından sonra hatlar arası yük akışları hesaplanabilmektedir. p. baraya göre, p. ve q. baralar arasındaki hatlardan akan yükler ve aktif -reaktif güçler sırayla aşağıdaki 4.3 ve 4.4 eşitliklerinde verilmiştir.

$$i_{pq} = (E_p - E_q) \cdot y_{pq} \quad (4.3)$$

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* \cdot i_{pq} \quad (4.4)$$

q. baraya göre, p. ve q. baralar arasındaki hatlardan akan yükler ve aktif -reaktif güçler sırayla aşağıdaki 4.5 ve 4.6 eşitliklerinde verilmiştir.

$$i_{qp} = (E_q - E_p) \cdot y_{pq} \quad (4.5)$$



$$[J(i)] = \left[ \frac{df}{dx} \right]_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Yük akışı problemi için, 4.10'da elde edilen Jacobian matris elemanları (matrisin ana köşegen ve ana köşegen dışı elemanları için) aşağıdaki durumlar göz önünde bulundurularak 4.18 denklemindeki gibi elde edilebilmektedir.

'p' barasındaki güç 4.11 nolu denklemden hesaplanabilmektedir. Bu denklemden;

$E_p$  : p. bara gerilimi,

$I_p$  : p. baraya enjekte edilen akımdır.

$$P_p - jQ_p = E_p^* \cdot I_p \quad (4.11)$$

4.17 nolu şebeke performans eşitliği bu denklemden yerine konulursa eşitlik 4.12'deki şekli almaktadır.

$$P_p - jQ_p = E_p^* \cdot \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot E_q \quad (4.12)$$

4.12 nolu eşitlikte 4.13 ve 4.14 nolu denklemlerdeki değerler yerine konulursa 4.15 eşitliği elde edilmektedir.

$$E_p = e_p + jf_p \quad (4.13)$$

$$Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq} \quad (4.14)$$

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) \cdot (e_p + jf_p) \quad (4.15)$$

4.15 nolu eşitlik sırayla reel ve imajiner kısımlarına ayrılırsa sistemin statik yük akışı denklemleri aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{ e_p \cdot (e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) + f_p \cdot (f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq}) \} \quad (4.16)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p \cdot (e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) - e_p \cdot (f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\} \quad (4.17)$$

Burada, her bara için iki tane olmak üzere ( $P_p$  ve  $Q_p$ ) non-lineer eşitlik takımı meydana gelmektedir. Eşitliklerde, gerilimi belirli ve sabit olan salınım barası dışındaki tüm baralar için aktif ve reaktif güçler bilinmekte ve gerilimin reel ve imajiner kısımları olan  $e_p$  ve  $f_p$  bilinmemektedir. Hesaplamalar salınım barası haricinde yapıldığı için, toplamda  $2 \cdot (n-1)$  tane yük akışı çözümü için hesaplanması gereken bilinmeyen değer bulunmaktadır [8, 13].

Dolayısıyla Newton-Raphson metodu için formülasyon 4.18'deki gibi, aktif ve reaktif güç değişimleri ile bara gerilim değerleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir grup lineer eşitliklerden oluşmayı gerektirmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \dots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta Q_1 \\ \dots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta P_1}{\delta e_1} & \dots & \frac{\delta P_1}{\delta e_{n-1}} & \left| \right. & \frac{\delta P_1}{\delta f_1} & \dots & \frac{\delta P_1}{\delta f_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots & \left| \right. & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta P_{n-1}}{\delta e_1} & \dots & \frac{\delta P_{n-1}}{\delta e_{n-1}} & \left| \right. & \frac{\delta P_{n-1}}{\delta f_1} & \dots & \frac{\delta P_{n-1}}{\delta f_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots & \left| \right. & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta Q_1}{\delta e_1} & \dots & \frac{\delta Q_1}{\delta e_{n-1}} & \left| \right. & \frac{\delta Q_1}{\delta f_1} & \dots & \frac{\delta Q_1}{\delta f_{n-1}} \\ \dots & \dots & \dots & \left| \right. & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\delta Q_{n-1}}{\delta e_1} & \dots & \frac{\delta Q_{n-1}}{\delta e_{n-1}} & \left| \right. & \frac{\delta Q_{n-1}}{\delta f_1} & \dots & \frac{\delta Q_{n-1}}{\delta f_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \dots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f_1 \\ \dots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Denklemden  $n$ . bara salınım barasıdır. Bu denklem matris formunda 4.19' deki şekli almaktadır.

$$\begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^k & J_2^k \\ J_3^k & J_4^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e^k \\ \Delta f^k \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Buradaki 'k' değerleri iterasyon numarasıdır. Jacobian'ın elemanlarını belirlemek için kullanılan bara akımları 4.20 eşitliğinden hesaplanabilmektedir.

$$I_P^k = \frac{P_P^k - jQ_P^k}{(E_P^k)^*} \quad (4.20)$$

'p' numaralı baradaki akım için eşitlik reel ve imajiner kısımlara ayrılmış olarak 4.21' deki gibidir.



$$I_p = c_p + jd_p = (G_{pp} - jB_{pp})(e_p + jf_p) + \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq})(e_p + jf_p) \quad (4.21)$$

Jacobian matrisinin elemanları; bara admitans matrisinin elemanları, bara gerilim ve akımları kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu matrisin ilk satır diagonal elemanı  $J_1^k$  4.22 eşitliğinden hesaplanabilmektedir.

$$\frac{\delta P_p}{\delta e_p} = e_p^k G_{pp} - f_p^k B_{pp} + c_p^k \quad (4.22)$$

Jacobian'ın diagonal dışı elemanları ise 4.23 eşitliği ile bulunabilmektedir.

$$\frac{\delta P_p}{\delta e_q} = e_p^k G_{pq} - f_p^k B_{pq} \quad (4.23)$$

Jacobian matrisinin ilk satır elemanı  $J_2^k$  aşağıdaki 4.24 eşitliğinden bulunabilmektedir.

$$\frac{\delta P_p}{\delta f_p} = e_p^k B_{pp} + f_p^k G_{pp} + d_p^k \quad (4.24)$$

Jacobian'ın diagonal dışı elemanları ise aşağıdaki 4.25 eşitliğinden bulunabilmektedir.

$$\frac{\delta P_p}{\delta f_q} = e_p^k B_{pq} + f_p^k G_{pq} \quad (4.25)$$

eşitliğinden bulunmaktadır. Jacobian matrisinin ikinci satırının  $J_3^k$  elemanı aşağıdaki 4.26 eşitliğinden elde edilmektedir.

$$\frac{\delta Q_p}{\delta e_p} = e_p^k B_{pp} + f_p^k G_{pp} - d_p^k \quad (4.26)$$

Bu satırın diagonal dışı elemanları ise 4.27 eşitliğinden bulunmaktadır.

$$\frac{\delta Q_p}{\delta e_q} = f_p^k G_{pq} + e_p^k B_{pq} \quad (4.27)$$

Jacobian matrisinin ikinci satırının  $J_4^k$  elemanı 4.28 eşitliğinden elde edilmektedir.

$$\frac{\delta Q_p}{\delta f_q} = -e_p^k G_{pq} + f_p^k B_{pq} + c_p^k \quad (4.28)$$

Bu satırın diyagonal dışı elemanları ise 4.29 nolu eşitlikten bulunmaktadır.

$$\frac{\delta Q_p}{\delta f_q} = f_p^k \mathbf{B}_{pq} - e_p^k \mathbf{G}_{pq} \quad (4.29)$$

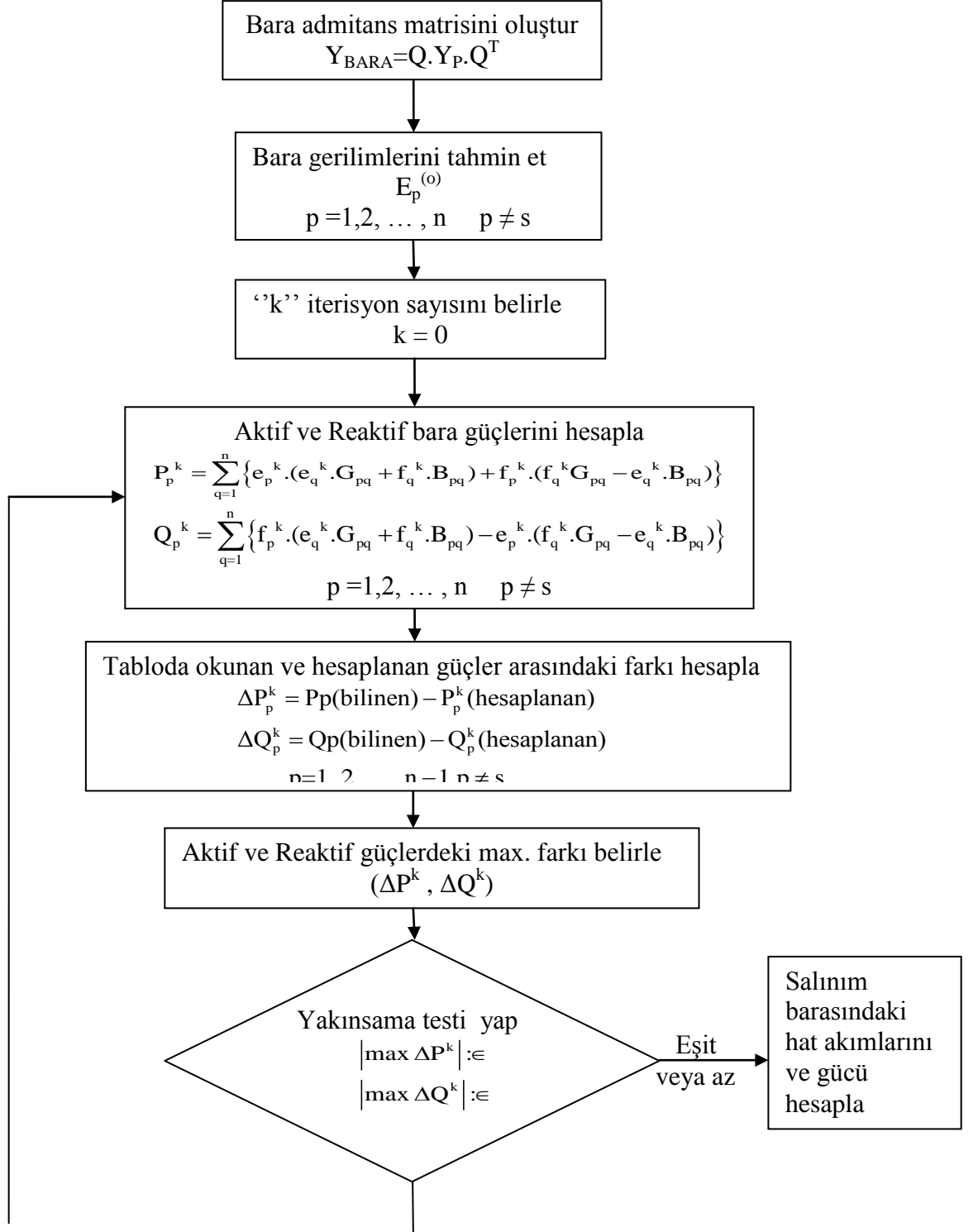
Bara güç değişimleri ise 4.30' daki eşitlikler vasıtasıyla bulunabilmektedir.

$$\begin{aligned} \Delta P_p^k &= P_p(\text{bilinen}) - P_p^k(\text{hesaplanan}) \\ \Delta Q_p^k &= Q_p(\text{bilinen}) - Q_p^k(\text{hesaplanan}) \quad p=1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (4.30)$$

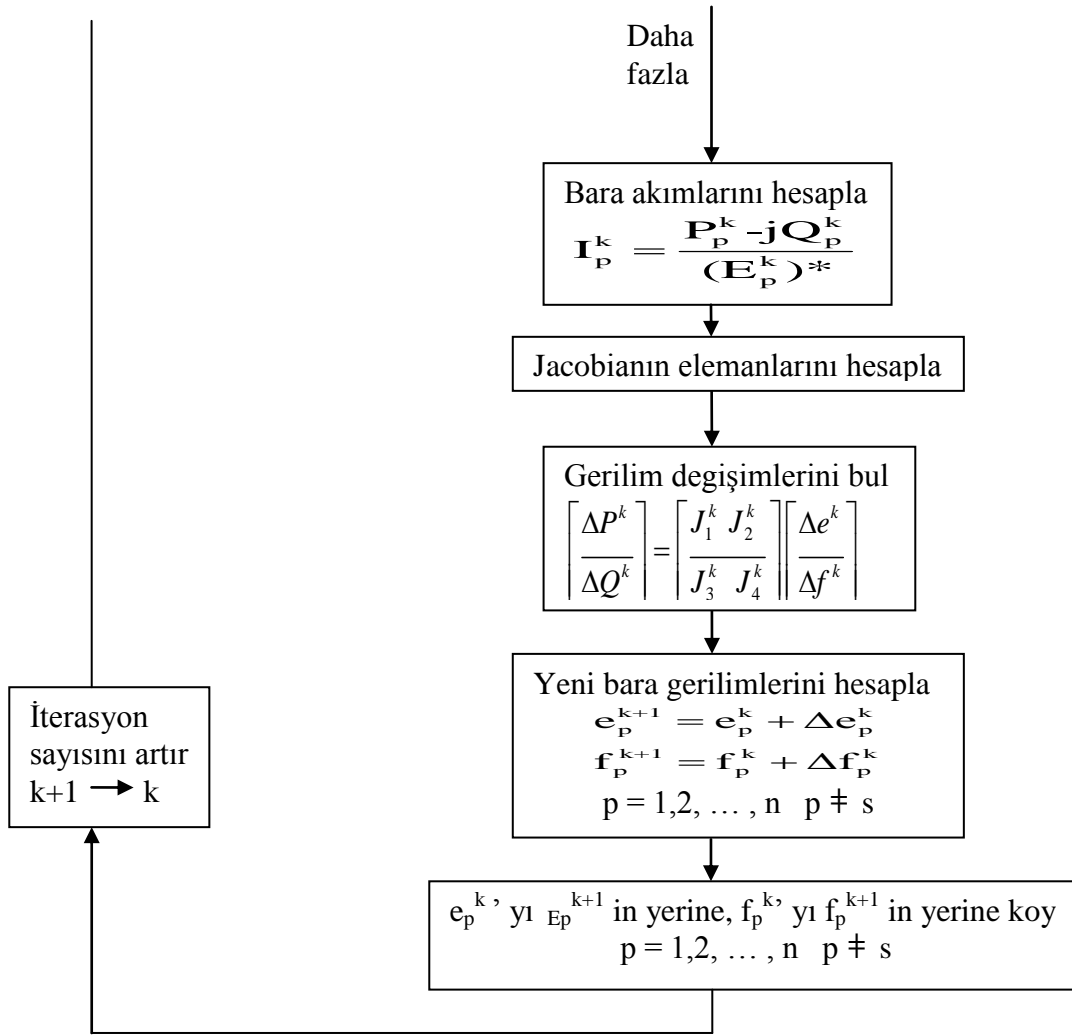
$P_p$  (bilinen) ve  $Q_p$  (tablo) p.u. (per unit) cinsinden net bara güçleridir ve bunlar problemin çözümünden önce belirli olan tablo değerleridir. Parantez içinde 'hesaplanan' belirtilen değerler ise bizim verilen formüllere göre herhangi bir iterasyonda elde ettiğimiz değerlerdir [8].

Yeni bara gerilimleri aşağıdaki eşitlikten elde edilmektedir. Bu yeni bara gerilimleriyle tekrar başa dönülerek yeni aktif ve reaktif güçler hesaplanır. Bu güçler ve tablodaki güçler yardımıyla toplam güç değişimi hesaplanır ve bunlar jacobian matris denkleminde yerine yazılarak gerilimin aktif ve reaktif güç değişimleri hesaplanır. Bu değerler aşağıdaki eşitlikte yerine konularak gerilim için tekrardan yeni değerler elde edilir. Bu işlemler, aktif ve reaktif güç değişimleri verilen tolerans değerini sağlayıncaya kadar bu şekilde devam eder. Aşağıda verilen yeni gerilim değerinin hesaplanmasını ifade eden 4.31 eşitliğinde ilk durum için  $e_p^k$  ve  $f_p^k$  değerleri tablodaki değerleri alır. Ancak ilk iterasyonda ilk durumda hesaplanan değerini alır ve bu durum her iterasyon için devam eder. Yani bu değerler her seferinde bir önceki iterasyondaki değerlerini alırlar [8].

$$\begin{aligned} e_p^{k+1} &= e_p^k + \Delta e_p^k \\ f_p^{k+1} &= f_p^k + \Delta f_p^k \end{aligned} \quad (4.31)$$



Şekil 4.1 : N-R yük akışı algoritması.

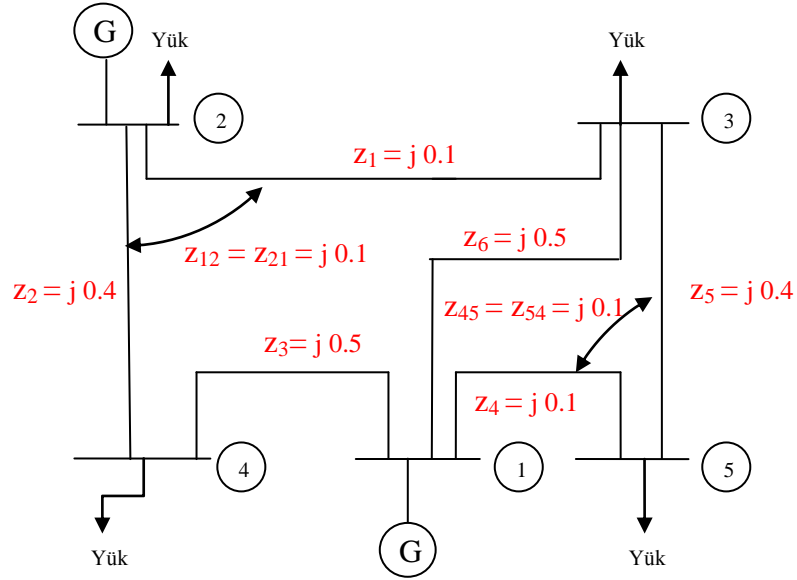


**Şekil 4.1 (devam) :** N-R yük akışı algoritması.

## 5. ÖRNEK SİSTEM İNCELEMELERİ

### 5.1 Beş Baralı Bir Sistemin ‘DGY’ ile Bara Admitans Matrisi Hesabı

Burada, yük ve üretim güçleri; baralara enjekte edilen akımlar olarak gösterilerek Şekil 5.1’ deki sistemin matematiksel modeli bulunacaktır. Bu şekilde, iki üretim kaynağı ile dört yükü besleyen şebekenin basit diyagramı verilmiştir. Hesaplarda, iletim hattı empedansları 100,000 kVA baz değeri alınarak per unit (pu) cinsinden verilmiştir.

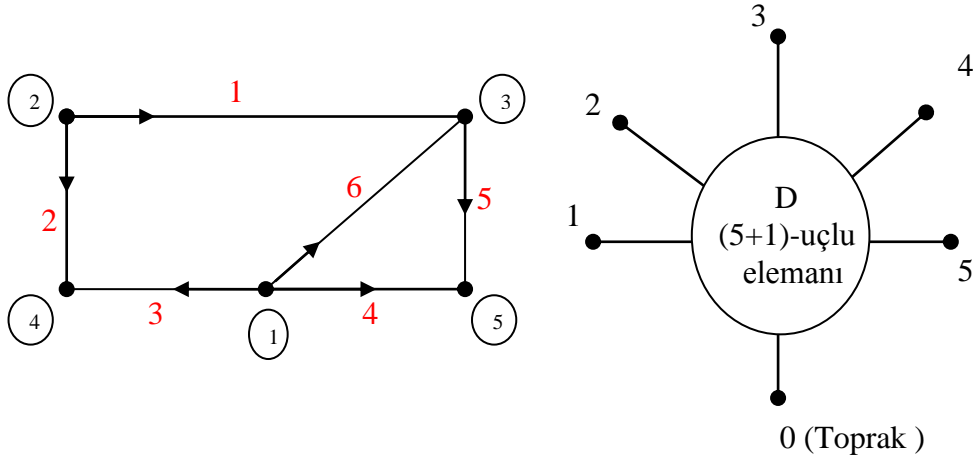


Şekil 5.1 : Bara admitans matrisi hesabı için örnek şebeke.

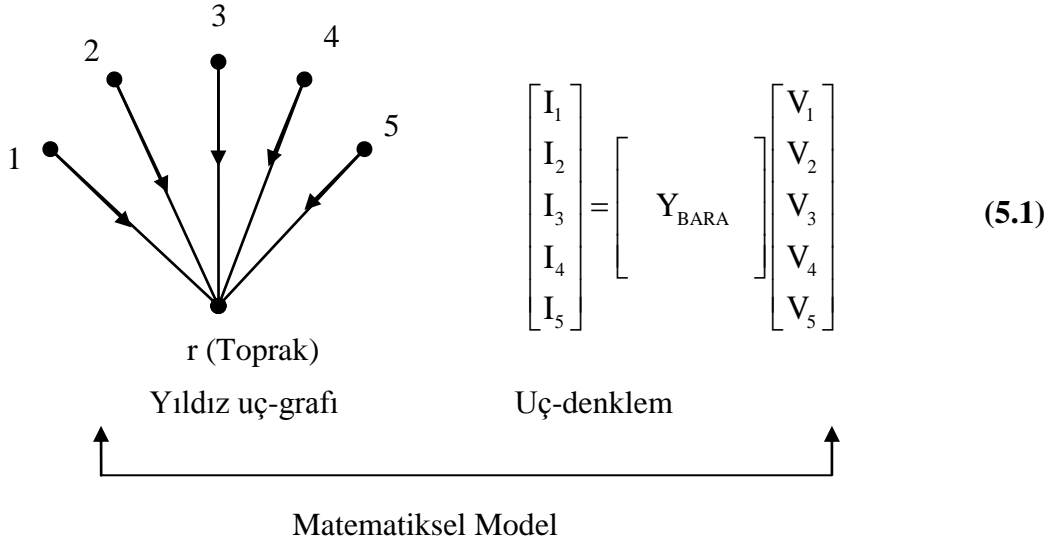
D çok-uçlu elemanı olarak ele alınacak bu örnek sistemde üretim ve yük dışında gerilim, akım kaynağı ve transformatör olmadığı, yani devrenin sadece iletim hatlarından oluştuğu kabulü yapılarak modelleme yapılmıştır. Buna göre devrenin yönlendirilmiş grafi ve çok-uçlu olarak gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir.

Çözüm için izenecek yol:

Bu problem için aranan matematiksel model Şekil 5.3’ te görüldüğü üzere; yıldız uç-graf ve bu uç-grafın tanımladığı (n-1) adet akım ve gerilim arasında var olan bağıntılar (uç-denklemleri) kurularak verilecektir.



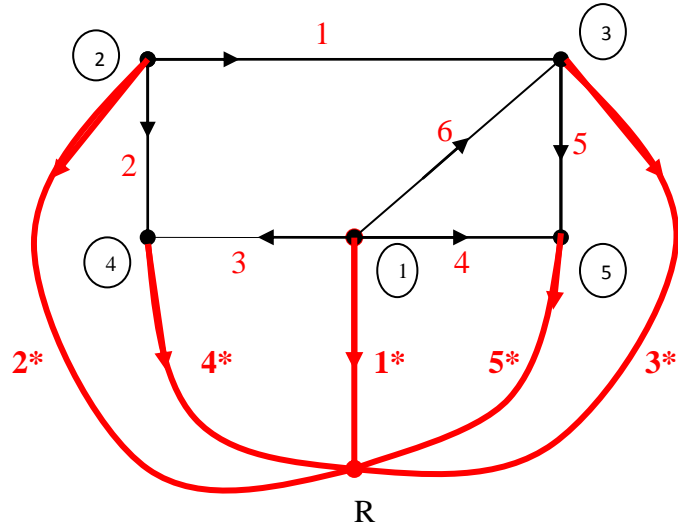
Şekil 5.2 : Örnek devrenin yönlendirilmiş devre grafi ve çok-uçlu gösterimi.



Şekil 5.3 : Devrenin yıldız uç-grafları ve uç-denklemleri.

- İlk olarak: ‘DGY’ne göre matematiksel modeli elde edebilmek için uç-grafların tanımladığı biçimde gerilim kaynakları bağlanarak devre uyarılır. Buna göre, uyarılmış devre grafi elde Şekil 5.4’teki gibi elde edilmiştir. Burada daha önce de anlatıldığı üzere, uç-grafa uygun olarak bağlanan gerilim kaynakları ağacın dallarını, şebeke elemanları ise kırımlarını oluşturmaktadır.
- Şekil 5.4’teki uyarılmış devre grafindan hareketle; temel kesitleme, temel çevre denklemleri ve primitif empedans matrisi yazılır.

Bölüm 3’te verilen bilgiler doğrultusunda problemdeki temel kesitleme, primitif empedans ve admitans matrisi 5.2’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.4 : Uyarılmış devre grafi.

Temel kesitleme matrisi:

$$[U|Q] = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1^* & 2^* & 3^* & 4^* & 5^* & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5.2)$$

Primitif empedans matrisi:

$$Z_p = \begin{bmatrix} j0.1 & j0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j0.1 & j0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & j0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j0.1 & j0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j0.1 & j0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j0.5 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Burada primitif empedans matrisinin kurulumu önemlidir. Bu matris bilindiği gibi kuplajlar dahil tüm hat verilerini göstermektedir.

Primitif admitans matrisi:

$$Y_p = \begin{bmatrix} -j13.3333 & j3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j3.3333 & -j3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -j13.3333 & j3.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j3.3333 & -j3.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j2 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

- Temel Kesitleme denklemi ve primitif admitans matrisleri bu şekilde bulunduktan sonra ' $Y_{BARA}$ ' elde edilir.

$$[Y_{BARA}] = [Q][Y_p][Q^T] \quad (5.5)$$

Şekil 5.1'de verilen örnek sistem için bara admitans matrisi, elde edilen verilerin 5.5'te yerine konulmasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Y_{BARA} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j13.3333 & j3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ j3.3333 & -j3.3333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -j2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -j13.3333 & j3.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j3.3333 & -j3.3333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

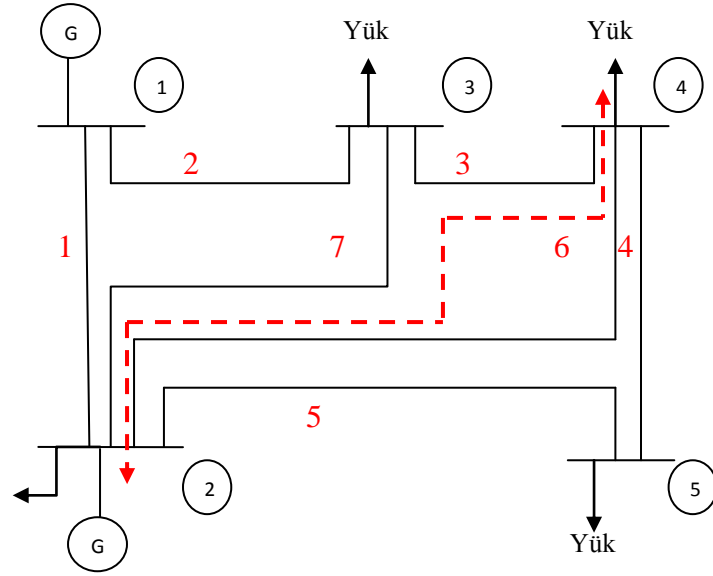
$$Y_{BARA} = \begin{bmatrix} -j17.3333 & 0 & j5.3333 & j2 & j10 \\ 0 & -j10 & j10 & 0 & 0 \\ j5.3333 & j10 & -j18.6666 & j3.3333 & 0 \\ j2 & 0 & j3.3333 & -j5.3333 & 0 \\ j10 & 0 & 0 & 0 & -j10 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Bu şekilde kuplajlı bir şebekenin bara admitans matrisi pratik olarak bulunabilmektedir. Bulunan bu  $Y_{BARA}$  ile yük akışı yapılabilir.

## 5.2 Beş Baralı Bir Sistemin 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' İle Bara Admitans Matrisi Hesabı

Bu bölümde Şekil 6.5'te tek hat şeması ve sistem dataları verilen 5 baralı bir sistemin 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' ile analizi yapılmıştır. Parçalamanın yapıldığı yerler kırmızı kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Buna göre, şebeke 2. ve 4. baralarından parçalanmıştır. Hesaplarda, iletim hattı empedansları 100,000 kVA baz değeri alınarak per unit (pu) cinsinden verilmiştir.





**Şekil 5.5 :** Beş baralı örnek bir sistemin tek hat şeması.

Çizelge 5.1’ de hat empedans değerleri ve hat numaraları, Çizelge 5.2’ de ise generatör ve yük değerleri ve tahmini bara gerilim değerleri verilmiştir.

Bu örnekte var olan D büyük boyutlu şebekesi  $D_1$  ve  $D_2$  olmak üzere iki parçaya bölünmektedir. Bu sistem analiz edilirken 2 ve 4 nolu baralardan parçalanmaktadır. Bu parçalama da 4,5 ve 6 numaralı elemanlar  $D_2$  çok-uçlusunu oluşturmaktadır.

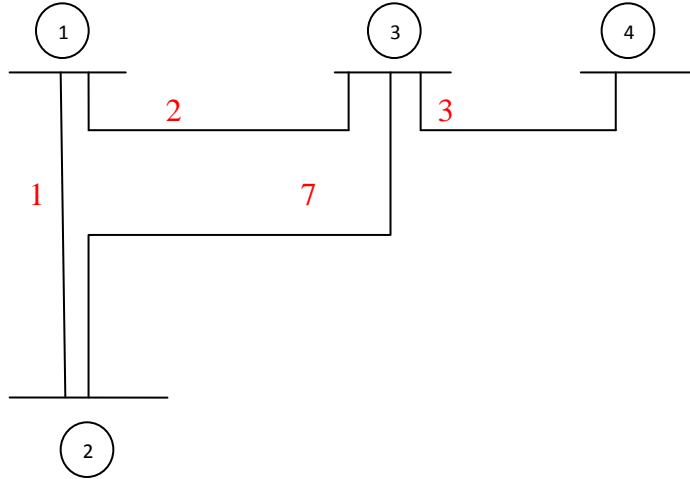
**Çizelge 5.1 :** Hat empedans değerleri ve numaraları.

Bara numarası p-q	Hat Empedansları $Z_{pq}$	Hat numarası
1-2	$0.02+j0.06$	1
1-3	$0.08+j0.24$	2
2-3	$0.06+j0.18$	7
2-4	$0.06+j0.18$	6
2-5	$0.04+j0.12$	5
3-4	$0.01+j0.03$	3
4-5	$0.08+j0.24$	4

**Çizelge 5.2 :** Generatör ve yük değerleri, tahmini bara gerilimleri.

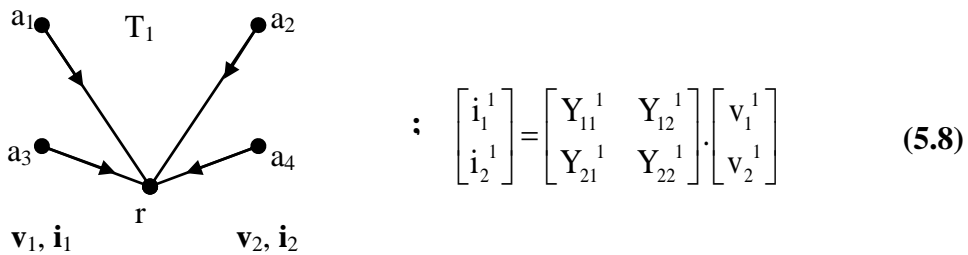
Bara numarası p	Tahmini bara gerilimleri	Generatör		Yük	
		Megawatt	Megavar	Megawatt	Megarvar
1	1.06+j0.0	0	0	0	0
2	1.0+j0.0	40	30	20	10
3	1.0+j0.0	0	0	45	15
4	1.0+j0.0	0	0	40	5
5	1.0+j0.0	0	0	60	10

- Çözüm için ilk olarak bu alt-şebekelerden  $D_1$  ele alınmaktadır. Bu alt-şebeke aşağıda gösterilmiştir.



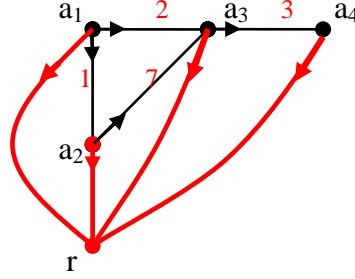
**Şekil 5.6 :**  $D_1$  alt-şebekesi.

$D_1$  alt-şebekesi için elde edilmesi gereken matematiksel model Şekil 5.7'de verilmiştir. Burada ilk olarak  $T_1$  uç-grafı çizilmiş ve buna uygun olarak uç-denklemleri yazılmıştır.  $T_1$  uç-grafında  $v_1, i_1$  gerilim ve akım vektörleri parçalamaya girmeyen baralara;  $v_2, i_2$  gerilim ve akım vektörleri ise parçalamaya giren baralara aittir.



**Şekil 5.7 :**  $D_1$  alt - şebekesinin matematiksel modeli.

Sistemin matematiksel modelinde seçilen uç grafına (yıldız uç graf) göre uyarma yapılır. Şekil 5.8’de  $D_1$  alt-şebekesi için uyarılmış devre grafi çizilmiştir.



Şekil 5.8 :  $D_1$  alt-şebekesinin uyarılmış devre grafi.

Bu hazırlık çalışmalarından sonra çözüme geçilir. Çözüm için ilk olarak sistemin uyarılmış devre grafindan hareketle temel kesitleme matrisi hesaplanır. Hesaplanan bu matris ve bu matrisin  $Q_1$  ve  $Q_2$  bileşenleri aşağıda verilmiştir. Ardından primitif empedans matrisi ve bunun tersi alınarak hesaplanmış primitif admitans matrisi verilmiştir. Bu matrisler,  $D_1$  alt-şebekesi 1, 2, 3, 7 nolu elemanlardan oluştuğu için bu elemanların bilgilerini içermektedir.

Temel kesitleme matrisi ve bileşenleri ( $Q_1, Q_2$ )

$$1^* \ 3^* \ 2^* \ 4^* \ 1 \ 2 \ 3 \ 7$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1^* \\ i_3^* \\ i_2^* \\ i_4^* \\ \overline{I_K} \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Primitif empedans matrisi:

$$Z_p^1 = \begin{bmatrix} 0.02 + j0.06i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.08 + j0.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 + j0.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.06 + j0.18 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Primitif admitans matrisi:

$$Y_p^1 = (Z_p^1)^{-1} = \begin{bmatrix} 5 - j15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 - j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.66667 - j5 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

D<sub>1</sub> alt-şebekesinin uç-denklemleri ve bu uç-denklemlerin elemanları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

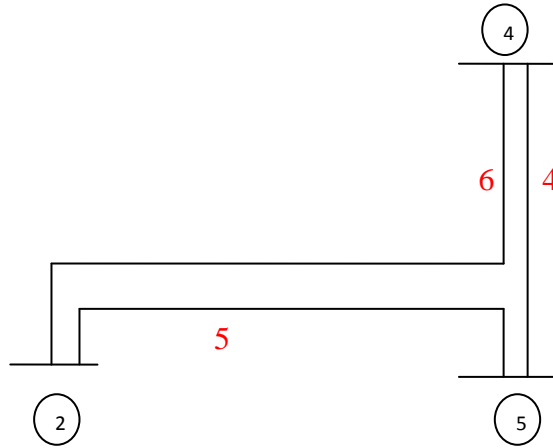
$$Y_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5-j15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25-j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10-j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.66667-j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.25-j1875 & -1.25+j3.75 \\ -1.25+j3.75 & 12.9167-j38.75 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$Y_{22} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5-j15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25-j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10-j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.66667-j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.6667-j20 & 0 \\ 0 & 10-j30 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$Y_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5-j15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25-j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10-j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.66667-j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5+j15 & -1.66667+j5 \\ -1.66667+j5 & -10+j30 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

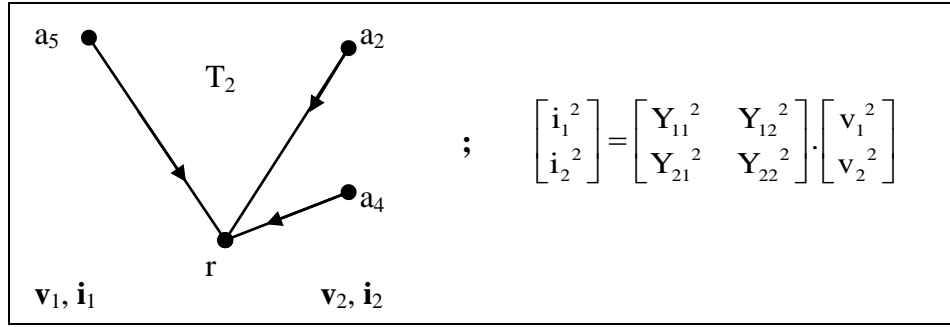
$$Y_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5-j15 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.25-j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10-j30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.66667-j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5+j15 & -1.66667+j5 \\ 0 & -10+j30 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

- Bu işlemlerin aynı şekilde Şekil 5.9'daki D<sub>2</sub> alt-şebekesi için yapılması gerekmektedir.



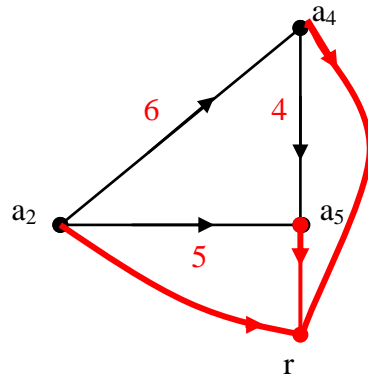
Şekil 5.9 : D<sub>2</sub> alt-şebekesi.

D<sub>2</sub> alt-şebekesi için elde edilmesi gereken matematiksel model Şekil 5.10'da verilmiştir. Burada ilk olarak T<sub>2</sub> uç-grafları çizilmiş ve buna uygun olarak uç-denklemleri yazılmıştır.



Şekil 5.10 : D<sub>2</sub> alt - şebekesinin matematiksel modeli.

D<sub>2</sub> alt-sisteminin matematiksel modelinde verilen uç grafına (yıldız uç graf) uygun olarak uyarma yapılır. Buna göre, Şekil 5.11’de D<sub>2</sub> alt-şebekesi için uyarılmış devre grafi çizilmiştir.



Şekil 5.11: D<sub>2</sub> alt-şebekesinin uyarılmış devre grafi.

Bu hazırlık çalışmalarından sonra çözüme geçilir. Çözüm için ilk olarak D<sub>1</sub> alt-şebekesi için yapılan işlemler aynı şekilde D<sub>2</sub> alt-şebekesi için yapılır. Bunun sonucunda aşağıdaki veriler elde edilir.

Temel kesitleme matrisi ve bileşenleri (Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>):

$$5^* \ 2^* \ 4^* \ 4 \ 5 \ 6$$

$$\left[ \begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_5^* \\ i_2^* \\ i_4^* \\ \overline{I_K} \end{bmatrix} = 0 \quad \Rightarrow \quad ; \quad Q_1 = [-1 \ -1 \ 0] \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Primitif empedans matrisi (Bu matris, D<sub>2</sub> alt-şebekesi için 4, 5, 6 nolu elemanların bilgilerini içermektedir.) :

$$Z_p^2 = \begin{bmatrix} 0.08 + j0.24 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 + j0.12 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 + j0.18 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Primitif admitans matrisi:

$$Y_p^2 = \begin{bmatrix} 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5 - j7.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.6666 - j5 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

D<sub>1</sub> alt-şebekesi için kullanılan uç-denklemler ve bu uç-denklemlerin bileşenleri tüm alt-şebekeler için geçerlidir. Dolayısıyla D<sub>2</sub> alt-şebekesinin elemanları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$Y_{11} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5 - j7.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.66667 - j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = [3.75 - j11.25] \quad (5.19)$$

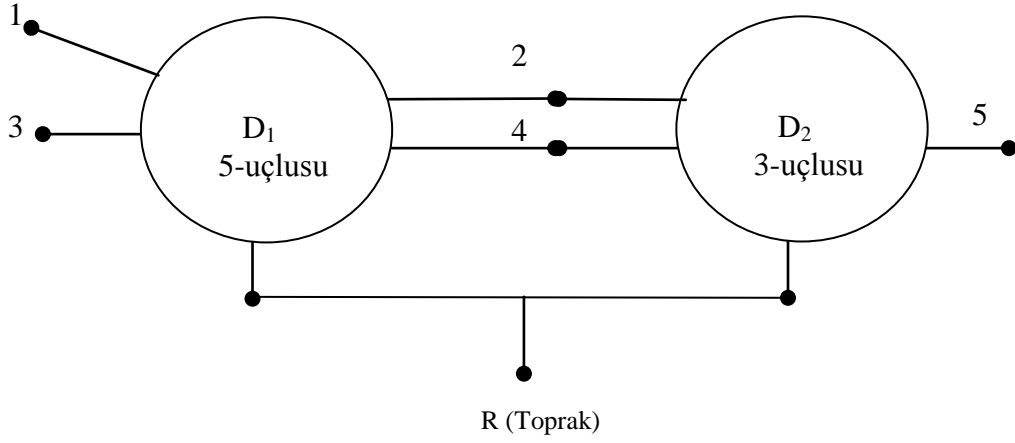
$$Y_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5 - j7.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.66667 - j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.1667 - j12.5 & -1.66667 + j5 \\ -1.66667 + j5 & 2.9167 - 8.75 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$Y_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5 - j7.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.66667 - j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.5 + j7.5 \\ -1.25 + j3.75 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

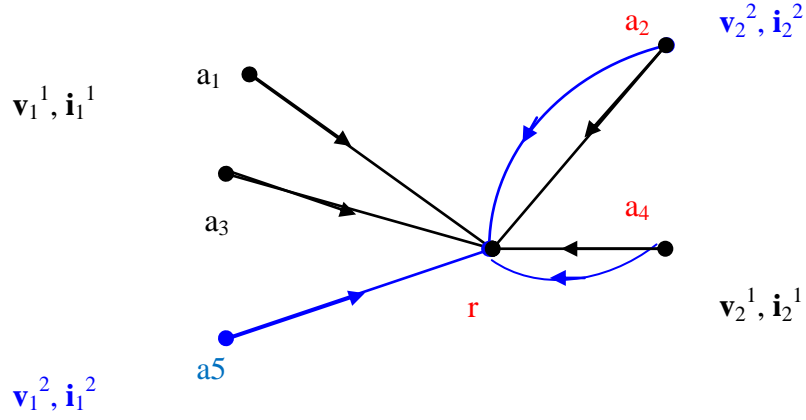
$$Y_{12} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.25 - j3.75 & 0 & 0 \\ 0 & 2.5 - j7.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1.66667 - j5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = [-2.5 + j7.5 \quad -1.25 + j3.75] \quad (5.22)$$

Her bir alt şebekeye ait matematiksel model yukarıdaki gibi bulunduktan sonra alt-şebekelerin birleştirilmesi işlemine geçilmektedir. Bunun için iki alt-şebekenin çok-uçlu olarak bağlantı biçimi Şekil 5.12’de verilmiştir. Buradaki bağlantı şekillerine göre çizilen birleştirme grafi Şekil 5.13’teki gibidir.

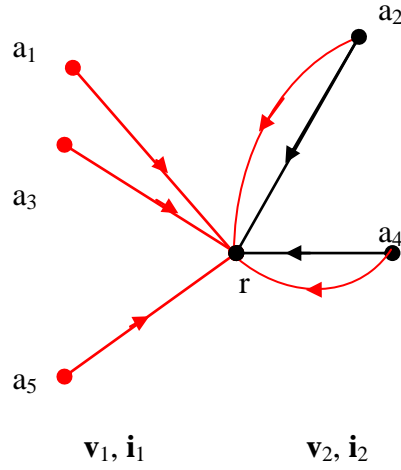
Ardından birleştirme grafında ağaç belirlenir ve her bir dal için temel kesitlemeler alınmaktadır. Yani dal sayısı kadar temel kesitleme alınmaktadır. Şekil 5.14’te görülen birleştirme grafında kırmızı renkle gösterilen çizgiler seçilen uygun ağaçtaki dalları ifade etmektedir.



Şekil 5.12 :  $D_1$  ve  $D_2$  alt-şebekelerinin çok-uçlu bağlantısı.



Şekil 5.13 :  $D_1$  ve  $D_2$  alt-şebekelerinin birleştirme grafi.



Şekil 5.14 : Birleştirme grafiğinde uygun ağaç seçimi.

Şekil5.14'teki grafa göre temel kesitleme matrisi ve primitif admitans matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Temel kesitleme matrisi:

$$Q_c = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 3 & 5 & 2^1 & 4^1 & 2^2 & 4^2 \end{array} \\ \left[ \begin{array}{ccc|cc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{array} \quad (5.23)$$

Birleştirme grafının primitif admitans matrisi  $D_1$  ve  $D_2$  şebekelerinin bilgilerini içerir. Bu durum aşağıda ifade edilmiş ve verilen sistem için bu matris oluşturulmuştur.

$$Y_p(D) = \begin{bmatrix} Y_{11}^1 & 0 & Y_{12}^1 & 0 \\ 0 & Y_{11}^2 & 0 & Y_{12}^2 \\ Y_{21}^1 & 0 & Y_{22}^1 & 0 \\ 0 & Y_{21}^2 & 0 & Y_{22}^2 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$Y_p(D) = \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 6.25 - j18.75 & -1.25 + j3.75 & 0 & -5 + j15 & -1.66667 + j5 & 0 & 0 \\ -1.25 + j3.75 & 12.9167 - j38.75 & 0 & -1.66667 + j5 & -10 + j30 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 3.75 - j11.25 & 0 & 0 & -2.5 + j7.5 & -1.25 + j3.75 \\ -5 + j15 & -1.66667 + j5 & 0 & 6.6667 - j20 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -10 + j30 & 0 & 0 & 10 - j30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.5 + j7.5 & 0 & 0 & 4.1667 - j12.5 & -1.66667 + j5 \\ 0 & 0 & -1.25 + j3.75 & 0 & 0 & -1.66667 + j5 & 2.9167 - j8.75 \end{array} \right]$$

Yukarıda elde edilen değerler,

$$Y_{BARA} = Q_c * Y_p(D) * Q_c^T \quad (5.25)$$

denkleminde yerine konularak aşağıdaki bara admitans matrisi elde edilmiştir.

$$Y_{BARA} = \left[ \begin{array}{cc|cc|cc} 6.25 - j18.75 & -1.25 + j3.75i & 0 & -5 + j15 & 0 & \\ -1.25 + j3.75 & 12.9167 - j38.75 & 0 & -1.6667 + j5 & -10 + j30 & \\ \hline 0 & 0 & 3.75 - j11.25 & -2.5 + j7.5 & -1.25 + j3.75 & \\ -5 + j15 & -1.6667 + j5 & -2.5 + j7.5 & 10.8333 - j32.5 & -1.6667 + j5 & \\ \hline 0 & -10 + j30 & -1.25 + j3.75 & -1.6667 + j5 & 12.9167 - j38.75 & \end{array} \right] \quad (5.26)$$

Son ifadeyle birlikte aranan matematiksel model;

$$Y_{BARA} \cdot V_{BARA} = I_{BARA} \quad (5.27)$$

şeklinde bulunmuş olmaktadır.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Elektrik enerji sistemlerinin, modern devre teorisinde çok iyi bilinen çok-uçlu eleman kavramı yardımıyla modellenmesi ele alınmıştır. Benzer biçimde büyük boyutlu sistemlerinin de çok uçlu eleman kavramı yardımı ile ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile matematiksel modelleri kurulmuştur. Bu yöntemde, düğümlerden parçalama yolu ile alt-şebekelere bölünen büyük boyutlu şebekede, her bir alt şebeke birçok uçlu olarak modellenmiş ve bu modeller (çok-uçlular) parçalamadan önceki bağlantı biçimine uygun olarak bir araya getirilerek büyük sistemin çözümü elde edilmiştir. Elde edilen şebeke modeli, ‘Blok Diyagonal Band’ biçiminde sparse bir katsayılar matrisi  $Y_{BARA}$ ’ya sahip bir model olarak formüle edilmiştir. Tezde bu yolla sparse olarak elde edilmiş olan büyük boyutlu şebeke modeli kullanılarak yük akışı analizi; Newton-Raphson metodu ile literatürde kabul gören örnek bir şebeke verileri ile yapılmaya çalışılmıştır.

Böylece, elektrik enerji şebekelerinin planlanması ve işletilmeleri sırasında karşılaşılan temel problemlerin çözümüne yeni bir yaklaşımla bakılması ve bilgisayar tekniğine oldukça uygun, kolay anlaşılabilir ve yorumlanabilen matematik bağıntılar ile verilen çözümler (matematiksel modeller) verilmiştir.

Elektrik şebekelerinin çok-uçlu eleman olarak göz önüne alınması ile türetilen matematiksel modeller, her türlü kuplaj bağıntılarını kabul eden ve simetrik olmayan dengesiz yüklü şebekelerin analizine de olanak sağlayan modeller olarak elde edilmiştir. Diğer bir deyişle ele alınan şebekelerin genel koşulları içeren matematiksel modelleri; anlaşılır ve basit bir algoritma ile programlanabilir bir biçimde verilebilmiştir.

Bilindiği gibi elektrik enerji sistemlerinin normal işletilmeleri sırasında şebekedeki bara gerilimlerinin ve hat yüklenmelerinin sürekli kontrol edilmeleri gerekmektedir. Diğer yandan enerji sistemlerinin, yük akışı dışındaki tüm analizlerinde, ilk koşulların ne olduğunun da bilinmesi gerekmektedir. Bu ise yük akışı sonucu elde edilen bilgiler olarak bulunabilmektedir.

Bu nedenle enerji sistemlerinin normal işletme koşullarındaki işleyişi hakkında bilgilerin toplandığı ve hesap edildiği yük akışı analizleri sistemde olmazsa olmaz temel analizlerdir. Bu amaçla, güç sistemlerinin belli üretim ve belli yük durumlarındaki, sürekli hal çözümleri olan yük akışı analizleri ile bara gerilimlerinin hesaplanması gerekir.

Burada elde edilen 'Blok Diyagonal Band' biçimindeki bara admitans matrisi ( $Y_{BARA}$ ) bu yapıyla özellikle matris tersi alma işleminde bilgisayar belleğinde, işlem sayısında ve süresinde önemli tasarruf sağlamaktadır. Büyük boyutlu şebekelerde analiz sonunda tersi alınması gereken bu matrisin 'Blok Diyagonal Band' yapısı, bu matrisin tersinin her adımda daha küçük mertebeden matrislerin tersleri alınmasıyla, adım adım hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' çok büyük sistemlerin 'Paralel Hesaplama Yöntemi' ile analizi için de çok uygun bir modeldir.

Tez çalışmasında, incelenen yöntemin örnek sistem üzerinde uygulaması MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Yönteme ilişkin algoritma parça parça programlar biçiminde oluşturulmuş, göz önüne alınan örnek sistemin bara admitans matrisi  $Y_{BARA}$ ; 'Blok Diyagonal Band' biçiminde sparse olarak kolaylıkla elde edilmiştir. Elde edilen bara admitans matrisi kullanılarak yük akışı analizi yapılmış ve sonuçlar klasik yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Yük akışı analizinde her iterasyon adımında yeniden oluşturulması ve tersinin alınması gereken Jacobian matrisinin de bara admitans matrisi formunda olması, yük akışı için kullanılan N-R metodunda Jacobian matrisin tersinin alınmasında, uygun bir ters alma algoritması (Housholder formülü gibi) kullanıldığında fayda sağlayacaktır. Başka bir deyişle, büyük boyutlu bir matrisin tersi, sadece köşegendeki blok matrislerin terslerinin alınmasına dayanan bir algoritmanın kullanılması ile işlem zamanını kısaltacak, bellek ve işlemci yükünü hafifletecektir.

Gelecek çalışmalar için öneriler olarak; bu tez çalışmasında parça parça programlar oluşturularak örnek sistemler üzerinde uygulaması yapılan yöntemin, yük akışı analizi programı ile entegrasyonun gerçekleştirilmesi, kullanıcı dostu bir ara yüz geliştirilerek programın bir bütün şeklinde yüzlerce baraya sahip güç sistemi analizlerinde kullanılabilmesi verilebilir.

Yine bu tez çalışmasında üzerinde durulmayan ‘Paralel Hesaplama’ ve bununla bağlantılı konular üzerinde de çalışmalar yapılabilir.

Tezde enerji sistemlerinin bara admitans matrisi hesabı çok-uçlu eleman kavramından yararlanarak ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile yapılmış ve yük akışı analizi yapılmıştır. ‘Blok Diyagonal Band’ biçimindeki bara admitans matrisinin b (bkz. 1. Giriş) ile gösterilen band kısmındaki baralar sadece parçalamaya giren baralardır. Yani bu baralar farklı sistemler olarak ele alınabilecek çok-uçluların birbirleri ile bağlantı uçlarıdır. Yük akışı sonrası bu grup baralar için bulunacak güçler ise sistemler arasındaki güç-alışverişleri olacaktır.

Büyük boyutlu şebekelerde ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile bulunacak bara empedans matrisi yardımı ile de iletim kayıpları ve kısa devre analizleri gibi problemlerin ele alınması bu konularda da faydalar sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Al-Dabbagh, M.** (1994). Computer Aided Power System Analysis And Design, *IEEE First International Conference on (0-7803-1963-X)* p.347-353, Australia.
- [2] **Url-1** < <http://www2.epdk.org.tr>>, alındığı tarih: 04.09.2011.
- [3] **Tokad, Y.** (1977). Devre Analizi Dersleri, Kısım I, , İ.T.Ü. Müh. Ve Mim. Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- [4] **Kaypmaz, A.** (1981). Elektrik Şebekelerinin Çok-Uçlu Eleman Kavramı Yardımıyla İncelenmesi, Doktora tezi, İ.T.Ü. Müh. – Mim. Fakültesi, İstanbul.
- [5] **Kaypmaz, A., Tokad, Y., Usta, Ö.** (1994). Diacopectics – A Parallel Processing Approach For The Analysis Of Large-Scale Power Systems
- [6] **Grainger, J. J., Stevenson W. D.** (1994). *Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, Newyork.
- [7] **Kothari, D. P., Nagrath I. J.** (2008). *Modern Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, Newyork.
- [8] **Stagg, G., W., El-Abiad, A., H.** (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, Newyork.
- [9] **Tokad, Y.** (1977). Devre Analizi Dersleri, Kısım II, , İ.T.Ü. Müh. Ve Mim. Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- [10] **Happ, H. H.** (1970). *Diacopectics and Piecewise Methods*, 1. Baskı, Academic Press, Newyork.
- [11] **Roy, L.** (1972). Piecewise Solution Of Large Electrical Systems By Nodal Admittance Matrix, *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on (0018-9510)*. 4; p. 1386-1396.
- [12] **Abacı K., Yalçın M. A, Uyaroğlu Y.** (2005). Güç Sistemlerinde Farklı Salınım Barası Seçiminin Gerilim Kararlılığı Açısından İncelenmesi, Sakarya Üni. Elektrik-Elektronik Müh. Fakültesi, Sakarya.
- [13] **Url-2** < <http://www.nptel.com>>, alındığı tarih: 08.05.2011.
- [14] **Glover, J. D., Sharma M.** (1994). *Power System Analysis and Design*, PWS Publishing,Boston.

- [15] **Gönen, T.** (1988). Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design, 43-51, John Wiley.
- [16] **Url-3** < <http://www.docstoc.com> >, alındığı tarih: 30.01.2012.
- [17] **Url-4** < <http://www.mathpower.com>>, alındığı tarih: 14.10.2011.
- [18] **Pamuk, N.** (2011). Sakarya İli Elektrik İletim Şebekesinin Matlab/Simulink Programı Kullanılarak Modellenmesi ve Analiz Edilmesi, *Erciyes Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*.

## **EKLER**

**EK A:** 14 baralı şebekenin tek hat diyagramı [22].

**EK B.1:** 14 baralı şebekenin bara, generatör ve hat bilgileri.

**EK B.2:** 14 baralı şebekenin bara, generatör ve hat bilgileri.

**EK C.1:** Sistemin 'Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

**EK C.2:** Sistemin 'Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

**EK C.3:** Sistemin 'Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

**EK C.4:** Sistemin 'Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

**EK C.5:** Sistemin 'Parçalama ve yeniden birleştirme yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

**EK D :** Sistemin matpower ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

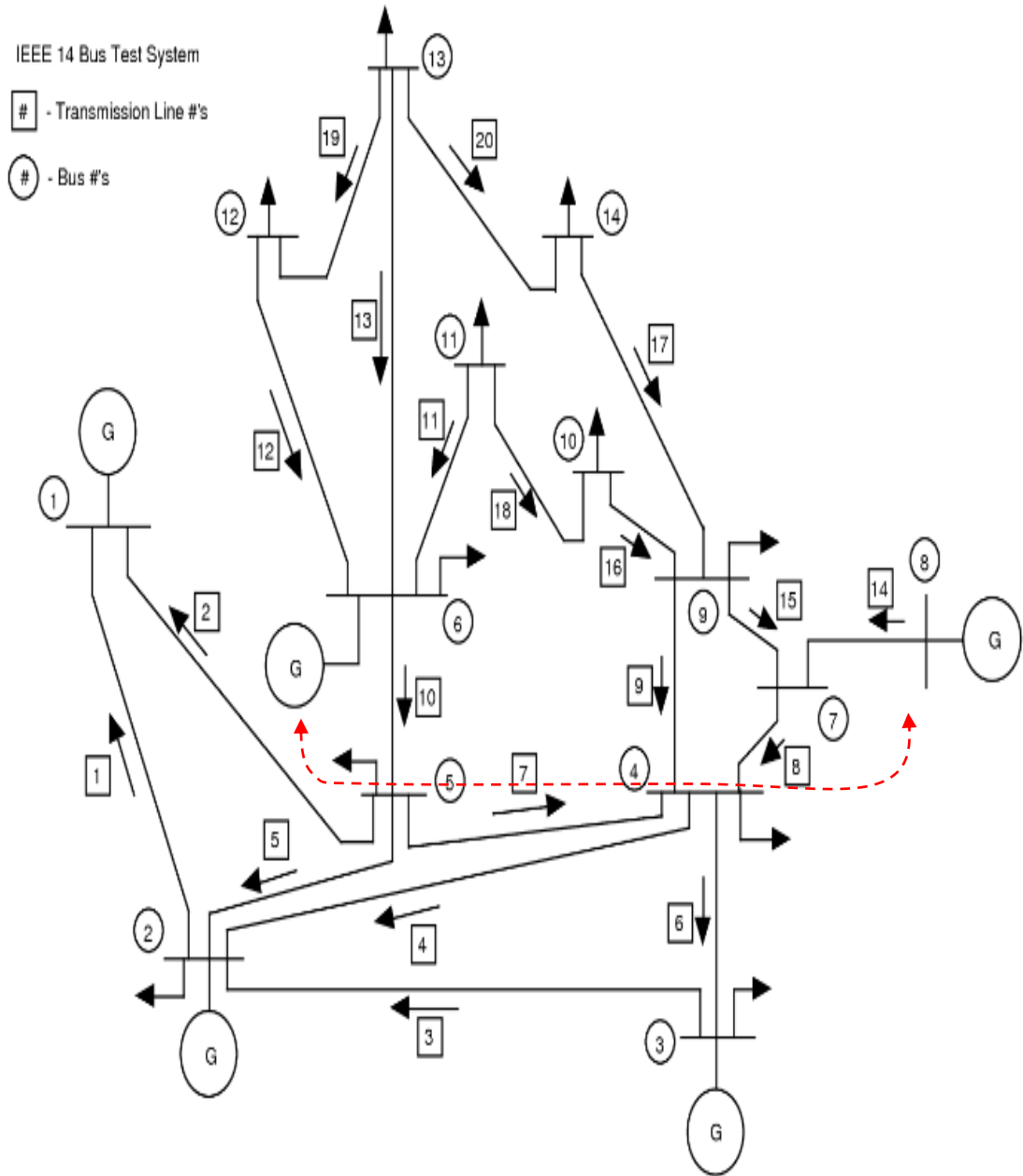
**EK E.1 :** Yük akışı sonuçları.

**EK E.2 :** Yük akışı sonuçları.





**EK A:** 14 baralı şebekenin tek hat diyagramı [22].



## EK B.1: 14 baralı şebekenin bara, generatör ve hat bilgileri.

Sistem baz MVA

mpc.baseMVA = 100;

Bara bilgileri

```
      bara_i tip   Pd Qd Gs Bs area   Vm Va bazKV zone
Vmax   Vmin
mpc.bus = [
  1  3  0      0  0  0  1  1.06   0  0  1  1.06
0.94;
  2  2 21.7    12.7  0  0  1  1.045 -4.98  0  1  1.06
0.94;
  3  2 94.2    19  0  0  1  1.01  -12.72  0  1  1.06
0.94;
  4  1 47.8    -3.9  0  0  1  1.019 -10.33  0  1  1.06
0.94;
  5  1  7.6     1.6  0  0  1  1.02  -8.78  0  1  1.06
0.94;
  6  2 11.2     7.5  0  0  1  1.07  -14.22  0  1  1.06
0.94;
  7  1  0       0  0  0  1  1.062 -13.37  0  1  1.06
0.94;
  8  2  0       0  0  0  1  1.09  -13.36  0  1  1.06
0.94;
  9  1 29.5    16.6  0  19  1  1.056 -14.94  0  1
1.06  0.94;
 10  1  9       5.8  0  0  1  1.051 -15.1  0  1  1.06
0.94;
 11  1  3.5     1.8  0  0  1  1.057 -14.79  0  1  1.06
0.94;
 12  1  6.1     1.6  0  0  1  1.055 -15.07  0  1  1.06
0.94;
 13  1 13.5     5.8  0  0  1  1.05  -15.16  0  1  1.06
0.94;
 14  1 14.9     5  0  0  1  1.036 -16.04  0  1  1.06
0.94;
];
```

Generatör bilgileri

```
      bara Pg Qg Qmax   Qmin   Vg mBase   statü Pmax   Pmin
Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30
ramp_q apf
mpc.gen = [
  1  232.4 -16.9  10  0  1.06  100  1  332.4  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0  0  0;
  2  40  42.4  50 -40  1.045  100  1  140  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0;
  3  0  23.4  40  0  1.01  100  1  100  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0;
  6  0  12.2  24 -6  1.07  100  1  100  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0;
  8  0  17.4  24 -6  1.09  100  1  100  0  0  0  0
0  0  0  0  0  0  0;
```

**EK B.2: 14 baralı şebekenin bara, generatör ve hat bilgileri.**

```
Hat bilgileri
p.bara   q.bara   r   x   b   rateA   rateB   rateC   ratio
açılı   statü   minaçı   maxaçı
mpc.branch = [
  1  2  0.01938 0.05917 0.0528 9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  1  5  0.05403 0.22304 0.0492 9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  2  3  0.04699 0.19797 0.0438 9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  2  4  0.05811 0.17632 0.034  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  2  5  0.05695 0.17388 0.0346 9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  3  4  0.06701 0.17103 0.0128 9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  4  5  0.01335 0.04211 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  4  7  0  0.20912 0  9900  0  0  0.978 0  1  -360
360;
  4  9  0  0.55618 0  9900  0  0  0.969 0  1  -360
360;
  5  6  0  0.25202 0  9900  0  0  0.932 0  1  -360
360;
  6  11 0.09498 0.1989 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  6  12 0.12291 0.25581 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  6  13 0.06615 0.13027 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  7  8  0  0.17615 0  9900  0  0  0  0  1  -360  360;
  7  9  0  0.11001 0  9900  0  0  0  0  1  -360  360;
  9  10 0.03181 0.0845 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  9  14 0.12711 0.27038 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  10 11 0.08205 0.19207 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  12 13 0.22092 0.19988 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
  13 14 0.17093 0.34802 0  9900  0  0  0  0  1  -360
360;
];
```

**EK C.1: Sistemin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile  $Y_{\text{BARA}}$  hesabı.**

$$Z_p^1 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.01938+j0.05917 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.05403+j0.22304 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04699+j0.19797 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05811+j0.17632 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05695+j0.17388 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.06701+j0.17103 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01335+j0.04211 \end{bmatrix}$$

$$Y_p^1 =$$

$$\begin{bmatrix} 4.9991-j15.2631 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0259-j4.2350 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1350-j4.7819 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.6860-j5.1158 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.7011-j5.1939 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9860-j5.0688 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.8410-j1.5786 \end{bmatrix}$$

$$Q_1^1 =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q_2^1 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

**EK C.2:** Sistemin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile  $Y_{\text{BARA}}$  hesabı.

$Z_{p2} =$

$0 + j0.20912$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	$0 + j0.55618$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	$0 + j0.2520$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	$0.09498 + j0.1989$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$0.12291 + j0.25581$	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$0.06615 + j0.13027$	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	$0 + j0.17615$	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	$0 + j0.1100$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	$0.08205 + j0.19207$	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0.22092 + j0.19988$	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0.03181 + j0.0845$	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0.12711 + j0.27038$	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0.17093 + j0.34802$

**EK C.3:** Sistemin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

$Y_p^2 =$

0 - 4.7819i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0 - 1.7980i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0 - 3.9679i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.9550 - 4.0941i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1.5260 - 3.1760i	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3.0989 - 6.1028i	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0 - 5.6770i	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0 - 9.0909i	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1.8809 - 4.4029i	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.4890 - 2.2520i	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.9020 - 10.3654i	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.4240 - 3.0291i	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1370 - 2.3150i	0

**EK C.4:** Sistemin 'Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi' ile  $Y_{BARA}$  hesabı.

$Q_1^2 =$

0	0	-1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

$Q_2^2 =$

1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$Q_c =$

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0

**EK C.5:** Sistemin ‘Parçalama ve Yeniden Birleştirme Yöntemi’ ile  $Y_{\text{BARA}}$  hesabı.

$Y_{\text{BARA}} =$

6.0250-j19.4470	-4.9991+j15.2630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.02589+j4.2349	
-4.9991+j15.2630	9.5213-j30.2721	-1.1350+j4.7818	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.6860+j5.1158	-1.7011+j5.1939
0	-1.1350+j4.7818	3.1209-j9.8223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.9859+j5.0688	0	
0	0	0	6.5799-j17.3407	0	0	0	0	-1.9550+j4.0940	-1.5259+j3.1759	-3.0989+j6.1027	0	0	0	0	0+j4.2574	
0	0	0	0	0-j19.5490	0+j5.6769	0+j9.09	0	0	0	0	0	0	0	0+j4.8895	0	
0	0	0	0	0+j5.6769	0-j5.6769	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0+j9.0900	0	5.3260-j24.0925	-3.9020+j10.3653	0	0	0	-1.4240+j3.029	0+j1.8554	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	-3.9020+j10.3653	5.7829-j14.7683	-1.880+j4.4029	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	-1.9550+j4.0940	0	0	0	-1.8808+j4.4029	3.8359-j8.4970	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	-1.5259+j3.1759	0	0	0	0	0	4.0149-j5.4279	-2.4890+j2.2519	0	0	0	0	0	
0	0	0	-3.0989+j6.1027	0	0	0	0	0	-2.4890+j2.2519	6.7249-j10.6696	-1.1369+j2.3149	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	-1.4240+j3.0290	0	0	0	1.1369+j2.3149	2.5609-j5.3440	0	0	0	0	
0	-1.6860+j5.1158	-1.9859+j5.0688	0	0+j4.8895	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.5129-j38.6541	-6.8409+j21.578	
-1.0258+j4.2349	-1.7011+j5.1939	0	0+j4.2574	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6.8409+j21.5785	9.5680-j35.5336	



**EK D:** Sistemin matpower ile  $Y_{\text{BARA}}$  hesabı.

**YBARA=**

6.0250 -j19.4470	-4.9991+j15.2630	0	0	-1.0258+j4.2349	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4.9991+j15.2630	9.5213-j30.2721	-1.1350+j4.7818	-1.6860+j5.1158	-1.7011+j5.1939	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.1350+j4.7818	3.1209-j9.8223	-1.9859+j5.0688	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.6860+j5.1158	-1.9859+j5.0688	10.5129-j38.6541	-6.8409+j21.5785	0	0+j4.8895	0	0+j1.8554	0	0	0	0	0	0
-1.0258+j4.2349	-1.7011+j5.1939	0	-6.8409+j21.5785	9.5680-j35.5336	0+j4.2574	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0+j4.2574	6.5799-j17.3407	0	0	0	0	-1.9550+j4.0940	-1.5259+3.1759	-3.0989+j6.1027	0	0
0	0	0	0+j4.8895	0	0	0-j19.5490	0+j5.6769	0+j9.0900	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0+j5.6769	0-5.6769	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0+j1.8554	0	0	0+j9.0900	0	5.3260-j24.0925	-3.9020+j10.3653	0	0	0	0	-1.4240+j3.0290
0	0	0	0	0	0	0	0	-3.9020+j10.3653	5.7829-j14.7683	-1.8808+j4.4029	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1.9550+j4.0940	0	0	0	1.8808+j4.4029	3.8359-j8.4970	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-1.5259+3.1759	0	0	0	0	0	4.0149-j5.4279	-2.4890+j2.251	0	0
0	0	0	0	0	-3.0989+j6.1027	0	0	0	0	0	-2.4890+j2.2519	6.7249-j10.6696	-1.1369+j2.3149	2.5609-j5.3440
0	0	0	0	0	0	0	0	-1.4240+j3.0290	0	0	0	-1.1369+j2.3149	2.5609-j5.3440	0

**EK E.1: Yük akıŖı sonuçları.**

Newton-Raphson g akıŖı 2 iterasyon sonunda yakınsamıŖ ve bu süreç 0.14 saniye srmŖtir.

Bara #	Gerilim (pu)	Açı(deg)	retim P (MW)	Yük Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1.060	0.000*	232.39	-16.55	-	-
2	1.045	-4.983	40.00	43.56	21.70	12.70
3	1.010	-12.725	0.00	25.08	94.20	19.00
4	1.018	-10.313	-	-	47.80	-3.90
5	1.020	-8.774	-	-	7.60	1.60
6	1.070	-14.221	0.00	12.73	11.20	7.50
7	1.062	-13.360	-	-	-	-
8	1.090	-13.360	0.00	17.62	-	-
9	1.056	-14.939	-	-	29.50	16.60
10	1.051	-15.097	-	-	9.00	5.80
11	1.057	-14.791	-	-	3.50	1.80
12	1.055	-15.076	-	-	6.10	1.60
13	1.050	-15.156	-	-	13.50	5.80
14	1.036	-16.034	-	-	14.90	5.00
Toplam:			272.39	82.44	259.00	73.50

**EK E.2: Yük akıŖı sonuçları.**

## | Hat Bilgileri |

Hat #	p. Bara	q. Bara	Generatör		Yük		Kayıp ( $I^2 * Z$ )	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q
1	1	2	156.88	-20.40	-152.59	27.68	4.298	13.12
2	1	5	75.51	3.85	-72.75	2.23	2.763	11.41
3	2	3	73.24	3.56	-70.91	1.60	2.323	9.79
4	2	4	56.13	-1.55	-54.45	3.02	1.677	5.09
5	2	5	41.52	1.17	-40.61	-2.10	0.904	2.76
6	3	4	-23.29	4.47	23.66	-4.84	0.373	0.95
7	4	5	-61.16	15.82	61.67	-14.20	0.514	1.62
8	4	7	28.07	-9.68	-28.07	11.38	0.000	1.70
9	4	9	16.08	-0.43	-16.08	1.73	0.000	1.30
10	5	6	44.09	12.47	-44.09	-8.05	0.000	4.42
11	6	11	7.35	3.56	-7.30	-3.44	0.055	0.12
12	6	12	7.79	2.50	-7.71	-2.35	0.072	0.15
13	6	13	17.75	7.22	-17.54	-6.80	0.212	0.42
14	7	8	-0.00	-17.16	0.00	17.62	0.000	0.46
15	7	9	28.07	5.78	-28.07	-4.98	0.000	0.80
16	9	10	5.23	4.22	-5.21	-4.18	0.013	0.03
17	9	14	9.43	3.61	-9.31	-3.36	0.116	0.25
18	10	11	-3.79	-1.62	3.80	1.64	0.013	0.03
19	12	13	1.61	0.75	-1.61	-0.75	0.006	0.01
20	13	14	5.64	1.75	-5.59	-1.64	0.054	0.11
					-----		-----	
					Toplam:	13.393		54.54



## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Fatma YAPRAKDAL

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Burdur – 1986

**Adres:** Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**E-Posta:** fatma.yaprakdal@yahoo.com

**Lisans:** Yıldız Teknik Üniversitesi