



Assesment of soft error sensitivity of power flow analysis

Emrullah Fatih Yetkin*

Department Management Information Systems, Kadir Has University, 34083, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Soft-error resiliency of power flow simulations,
- Accuracy problems due to soft-error occurrence,
- Need for a stable and efficient soft-error detection and correction mechanism.

Keywords:

- Soft-errors
- Power Flow
- Newton-Krylov approach
- Resiliency
- Iterative solvers

Article Info:

Research Article

Received: 13.04.2021

Accepted: 27.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.913867

Correspondence:

Author: Emrullah Fatih

Yetkin

e-mail:

fatih.yetkin@khas.edu.tr

phone: +90 212 533 6532

Graphical/Tabular Abstract

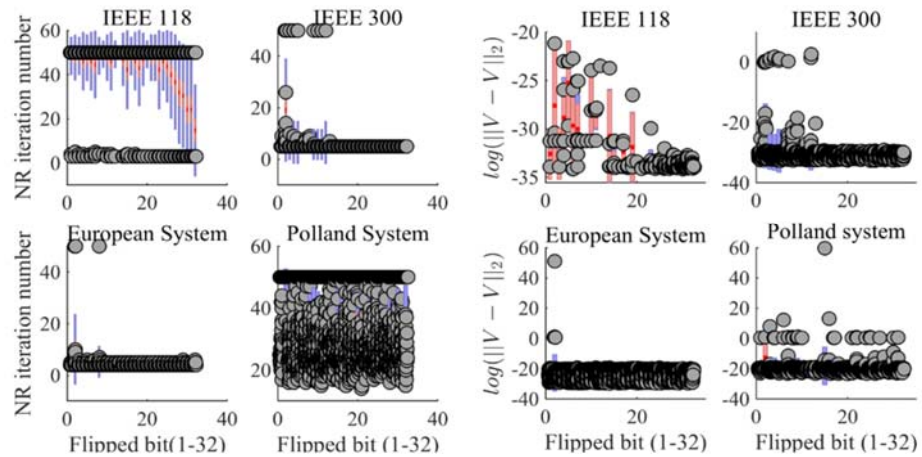


Figure A. Convergence delays (left) and converged cases with errors (right) for several power flow test systems

Purpose: Soft errors can be defined as failures arising from several fluctuations due to x-rays, cosmic particle effects, etc. These types of errors usually appear at any time of computation as a bit-flip in any floating-point operations. In this paper, we will investigate the soft-error effects on large-scale power flow simulations. Generally, power flow calculations are performed by using Newton Raphson Method. The system is modeled by nonlinear equations and the solution process requires a linear solver is employed to take the inverse of the Jacobian matrix at each iteration. In this study, the soft-error sensitivity of the numerical methods used in load flow was examined, and the problems that may be encountered were revealed.

Theory and Methods:

An experimental methodology is applied to obtain soft-error sensitivity results of load flow problems. Four different test systems are examined with 7680 different soft-error scenarios in the experiments.

Results:

The experimental study shows that Newton-Raphson iteration is highly sensitive to soft-errors especially for ill-conditioned systems. In most of the soft-error scenarios, Newton-Raphson converges with a delay. These delays can cause extra computation and the simulation times can be longer than expected. Even the non-linear solver converges in a reasonable number of iterations, the results may not represent the physical system behavior accurately. The convergence delays and converged cases with errors due to soft-errors are depicted in Figure A. As shown in the Figure A, the error between the cases without soft-error and with soft-error can be dramatic in most of the cases.

Conclusion:

If the next generation high performance computing systems are involved for the solution of power flow problem, the obtained results should be investigated carefully. Without a soft-error protection (either in hardware or algorithmic level), the simulation results may not be reliable.



Güç akışı analizinin geçici hata duyarlılığının değerlendirilmesi

Emrullah Fatih Yetkin*^D

Kadir Has Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 34083, İstanbul., Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Güç akışı benzetimlerinin geçici hata dayanımlarının incelenmesi
- Geçici hataya bağlı ortaya çıkan güvenilirlik problemlerinin incelenmesi
- Kararlı ve etkin bir geçici hata tespit ve düzeltme mekanizması ihtiyacının vurgulanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 13.04.2021

Kabul: 27.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.913867

Anahtar Kelimeler:

Geçici hata,
güç akışı,
Newton-Krylov yaklaşımları,
dayanıklılık,
yineleme yöntemleri

ÖZ

Günümüzün güç sistemleri detaylı modelleme ihtiyaçları nedeniyle çok büyük boyutlara ulaşabilmektedir ve belirli koşullar için sistemin tek bir anlık görüntüsünün çözümü bile büyük boyutlu denklem sistemlerinin çözümünü gerektirir. Bu nedenle de makul bir sürede sonuçları elde etmek için modern yüksek başarılı hesaplama ortamları kullanılmalıdır. Bununla birlikte, yüksek başarılı hesaplama ortamlarında artan bileşen sayısı nedeniyle, geçici hata olasılığı da artar. Geçici hatalar, x-ışınları, kozmik parçacık etkileri gibi nedenlerle cihaz bileşenlerinde oluşabilen çeşitli dalgalanmalardan kaynaklı arızalar olarak tanımlanabilir. Bu tür hatalar genellikle herhangi bir hesaplama anında herhangi bir kayan nokta işleminde yaşanan bir bit-kayması ile modellenir. Bu makalede, büyük ölçekli güç akışı simülasyonları üzerindeki geçici hata etkileri incelenmektedir. Genel olarak yük akışı hesaplamaları, sistem doğrusal olmayan denklemlerle modellendiği için, Newton-Raphson yöntemi kullanılarak yapılır ve çözüm süreci, her yinelemede Jakobiyen matrisinin tersini almak için doğrusal bir çözücünün kullanılmasını gerektirir. Bu çalışmada, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının sistemlere eklenmesi ile çok büyük boyutlara ulaşabilen elektrik yük akışı problemlerinde kullanılan matematiksel yöntemlerin geçici-hatalara karşı hassasiyetleri incelenerek, karşılaşılabilecek sorunlar ortaya konulmuştur.

Assesment of soft error sensitivity of power flow analysis

H I G H L I G H T S

- Soft-error resiliency of power flow simulations,
- Reliability problems due to soft-error occurrence,
- Need for a stable and efficient soft-error detection and correction mechanism

Article Info

Research Article

Received: 13.04.2021

Accepted: 27.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.913867

Keywords:

Soft-errors,
power flow,
Newton-Krylov approach,
resiliency,
iterative solvers

ABSTRACT

Today's power systems are large and interconnected to each other with many buses, lines, loads, and generators. Even the solution of a single snapshot of the system for specific conditions requires the solution of systems of equations with large sizes. Thus, to obtain the results in a reasonable time for large problems like electrical power flow simulations, modern large computational environments should be employed. However, because of the increasing number of components in the modern computational environment, the possibility of soft errors also increases. Soft errors can be defined as failures arising from several fluctuations due to x-rays, cosmic particle effects, etc. These types of errors usually appear at any time of computation as a bit-flip in any floating-point operations. In this paper, we will investigate the soft-error effects on large-scale power flow simulations. Generally, power flow calculations are performed by using Newton Raphson Method. The system is modeled by nonlinear equations and the solution process requires a linear solver is employed to take the inverse of the Jacobian matrix at each iteration. In this study, the soft-error sensitivity of the numerical methods used in load flow was examined, and the problems that may be encountered were revealed.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *fatih.yetkin@khas.edu.tr / Tel: +90 212 533 6532

1. Giriş (Introduction)

Kuramsal olarak, güneş ışığı ya da diğer kaynaklardan gelen radyasyonun veya ani elektrik dalgalanmalarının işlem sırasında bir bit değerinde değişiklik yaratması olarak tanımlanan bit-kayması problemleri aslında hesaplama ortamlarının tüm donanımsal bileşenlerinde görülebilir. Bit-kaymasının yol açtığı problemler için literatürde kullanılan diğer isimlendirmeler Sessiz Veri Bozulması ya da geçici-hata (Silent Data Corruption-SDC veya soft-error) şeklindedir [1]. Bilgisayarların hesaplamalarda yuvarlama hatalarından kaynaklı hatalara yol açtıkları ilk zamanlarından beri biliniyor olsa da, geçici-hata probleminin yarattığı etkilerin ilk olarak gözlemlenmesi seksenli yıllarda yapılan uzay araştırmalarında olmuştur [2]. Özellikle atmosfer korumasına sahip olmayan ortamlara gönderilen hesaplama cihazlarının (örneğin uzay araçlarında bulunan hesaplayıcılar) doğrudan güneş ışığına maruz kalmaları, o alanda çalışan araştırmacıları geçici-hata problemi üzerinde çalışmaya yönlendirmiştir [3]. Halen radyasyon yoğun ortamlarda kullanılan ya da hayati önem taşıyan hesaplamaları yapan cihazlarda üçlü hesaplama (triple redundancy) yöntemi ile hesaplamanın güvenilirliği garanti altına alınmaktadır [4]. Bu yöntemde aynı hesaplama üç farklı cihazla yapılmakta ve en az iki cihazın aynı sonuca ulaşması durumunda sonuç doğru kabul edilmekte, böylelikle de ulaşılan sonucun doğruluğu garanti altına alınmaktadır. Bir diğer yaklaşım ise ikili hesaplama (double redundancy) olarak adlandırılmakta ve benzer şekilde aynı hesaplamanın iki farklı cihazda yapılması esasına dayanmaktadır. Yalnız ikili hesaplama ile sadece olası bir geçici hatanın tespit edilmesi garanti altına alınmakta ve dolayısıyla sonucun güvenilirliği artırılmaktadır. Yöntem, iki hesaplama sonucu arasındaki farkın probleme özgü kabul edilebilir hata sınırının üzerinde olması durumunda hesaplamanın tekrarlanmasına dayanır [4]. Bir elektronik cihazın geçici-hata duyarlılığı SER (soft-error ratio) birimi ile ölçülür. Güneşe bağlı radyasyondan kaynaklanabilecek bit-kayması problemlerinin gerçekleşme olasılığı, atmosfer koruması nedeniyle oldukça düşüktür ve istatistikî çalışmalarda 10^{-18} civarında olduğu gösterilmiştir [5]. Dolayısıyla sıradan hesaplama ortamlarında (masaüstü/dizüstü bilgisayarlar, küçük çaplı küme-hesaplayıcılar, vb.) geçici-hata kaynaklı bir problem oluşması beklenmez. Ancak saniyede yapılan kayar-noktalı işlem sayısının artması (floating-point operation per second-flops) halinde, durum bir Poisson sürecine evrilmektedir. Bilindiği üzere Poisson süreci, çok düşük gerçekleşme olasılığı olan olayların deney sayısının yüksek düzeyde artmasına bağlı olarak gerçekleştirilebilir hale geçmesi olarak bilinir [6]. Geçici hatanın düşük olan gerçekleşme olasılığı da benzer şekilde kayar-noktalı işlem sayısının astronomik şekilde artışı ile karşılaşılabilecek bir problem olarak ortaya çıkmakta ve günümüz yüksek başarımlı hesaplama ortamlarının güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu iddianın arkasındaki temel nedenlerden birisi, günümüzde yüksek başarımlı hesaplama ortamlarının gelişim hızı ve özellikle grafik işlemcilerin (GPU) aktif olarak hızlandırıcı (accelerator) hesaplama bileşeni olarak kullanılmasıyla Tera-ölçekli olarak isimlendirilen düzeye ulaşmış duruma gelmesidir. Tera-ölçekli sistemler Teraflops (saniyede 10^{15}) düzeyinde işlem yapabilme kapasitesini işaret etmektedir. Yüksek başarımlı hesaplama ortamlarının düzenli olarak güncellendiği Top500 listesi incelendiğinde birçok bilgisayarın artık Tera-ölçekli sınıfa girdiği görülebilir [7]. Günümüzdeki araştırma yönelimi ise hesaplama sistemlerini aşırı ölçek (exa-scale) sınıfa taşımaktır. Henüz pratikte mevcut olmayan bu yüksek başarımlı hesaplama sistemlerinde oluşması beklenen bazı problemler ve çözümleri (minimum haberleşme ile hesaplama (communication-avoiding), hesaplama esnekliği (computational resiliency), şu an bilgisayar bilimleri alanında aktif araştırma alanı haline gelmişlerdir [8]. Yüksek hesaplama kapasitesine sahip olan bu sistemlerin gerçekleştirilebilmesi için çok yüksek sayıda mevcuttan daha küçük

boyutlu bileşenin birbiriyle birleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum da aslında yeryüzü koşullarında oldukça nadir karşılaşılan geçici-hataların ortaya çıkma olasılıklarını yüksek seviyelere taşımaktadır [9]. O yüzden, gelecekteki hesaplama platformları göz önüne alındığında geçici-hata problemlerinin kullanılacak olan matematiksel yöntem üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve bu etkileri ortadan kaldıracak denetimler eklenmesi güvenilir hesaplama için bir zorunluluk hale gelmiştir. Bu çalışmada, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının boyutları masaüstü bilgisayarlarla çözülebilecek boyutta olup, çalışma sırasında yüksek performanslı mimariler kullanılmamıştır. Öte yandan kullanılan ve bir sonraki bölümde anlatılan modelleme tekniği ile yüksek başarımlı hesaplama platformlarında karşılaşılabilecek geçici hata problemlerinin yaratabileceği olası problemler hakkında sonuçlara ulaşmamıza olanak vermektedir. Bu çalışmadaki tüm benzetimler Mac-M1 yonga setine sahip 8 çekirdekli 16 GB belleği olan bir masaüstü bilgisayar kullanılmıştır.

Sonraki bölümlerde ilk önce yük akışı problemi özet olarak verilecek ve çözüm sırasında izlenebilecek metodolojiler aktarılacaktır. Daha sonra geçici hata problemi ile ilgili yapılmış çalışmalar aktarılacak ve bu çalışmada kullanılmış olan hesaplamalı deney düzeneği tanıtılacaktır. Sonrasında ise yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar yorumları ile birlikte sunulacaktır. Son olarak da çalışma sonucu elde edilen nesnel değerlendirmeler ve bu değerlendirmelerin gerektirdiği gelecek çalışmalar aktarılacaktır.

2. Problemin Tanımlanması (Definition of the Problem)

2.1. Yük Akışı Problemi (Load Flow Problem)

Elektrik güç sistemleri doğrusal olmayan denklem takımları ile modellenirler [10]. Bu nedenle de bilgisayar ortamı benzetimlerinde çözüme ulaşmak için genellikle Newton-Raphson tabanlı yöntemler kullanılır. Modelin genel biçimi $y=f(x)$ şeklindedir. Buradaki x , faz açıları (δ) ve gerilim büyüklüklerinden (V) ve y ise baralara ait aktif ve reaktif güç bileşenlerinden oluşur. N baraya sahip bir sistem içinden seçilmiş herhangi bir k . bara için bu denklemler Eş. 1 ile aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{aligned} P_k(x) &= V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}) \\ Q_k(x) &= V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k + \delta_n - \theta_{kn}) \end{aligned} \quad (1)$$

Bu denklemlerde $V_k, Y_{kn}, \theta_{kn}, \delta_{kn}$ sırasıyla, k barası üzerindeki gerilimi, k ve n baraları arasındaki admitansı, admitans açısı ve faz açısını göstermektedir. Newton-Raphson tabanlı çözüm yaklaşımlarında öncelikle sağ yandaki gerilim ve faz açıları bir ilk değer ataması yapılır. Sonra, $i=0$ adımı için, bu ilk değer atamaları kullanılarak J_1 ve J_3 aktif ve reaktif güçlerin faz açılarına göre; J_2 ve J_4 ise gerilim büyüklüklerine göre kısmi türevlerini göstermek üzere Eş. 2 ile verilen Jakobiyen matrisi hesaplanır:

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada genel olarak $J_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta}$, $J_2 = \frac{\partial P}{\partial V}$, $J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \delta}$ ve $J_4 = \frac{\partial Q}{\partial V}$ olarak tanımlanır. Daha sonrasında, $i=0$ ile başlatılarak, Eş. 3 ile verilen doğrusal denklem takımı ($Jx = F$) çözülür;

$$\begin{bmatrix} J_1(i) & J_2(i) \\ J_3(i) & J_4(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Bu doğrusal denklem takımının çözümünden elde edilen faz açılara ve gerilimlere ilişkin güncelleme değerleri bir önceki adımda bulunmuş olan değere Eş. 4 ile verilen biçimde eklenerek önceden belirlenmiş olan tolerans değerine ulaşıncaya dek yineleme işlemi tekrarlanır.

$$\begin{bmatrix} \delta(i+1) \\ V(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta(i) \\ V(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta(i) \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yük akışı problemine ilişkin Newton-Raphson algoritması genel hatları ile Algoritma 1 ile verilmiştir [10]:

Algoritma 1: Yük akışı problemi için Newton-Raphson algoritması

- Bilinmeyen tüm gerilim büyüklük ve açıları için bir ilk tahmin yap.
- Yük denge denklemlerini güncel gerilim ve açı denklemleri ile çöz.
- (2) denklemi ile verilen Jakobiyen matrisini hesapla
- Doğrusal (3) denklemini çöz.
- Gerilim ve açı değerlerini (4) denkleminde verildiği şekilde güncelle.
- Yakınsama olmadıysa adım-2'ye geri dön.

Literatürde yük akış probleminin çözümü için önerilen farklı yaklaşımlar söz konusudur. Bunlardan birisi, Eş. 3 ile verilen Jakobiyen matrisinin köşegen bloğu dışında kalan bileşenlerini yok sayarak bir yaklaşımdır Hızlı Ayrık Yük Akışı (Fast Decoupled Load Flow-FDLF) yaklaşımıdır [10]. FDLF yönteminde ihmal edilen köşegen dışı elemanlar neden ile Jakobiyen matrisi simetrik pozitif tanımlı bir nitelik kazanmakta ve bu duruma oldukça uygun olan Eşlenik Gradyan (Conjugate Gradient) yöntemi ile çözülebileme imkanına kavuşmaktadır [11]. Öte yandan FDLF yönteminde Jakobiyen matrisinin köşegen dışı bloklarının ihmal edilmesi nedeniyle çözümde doğruluk kaybı olmaktadır. Tam çözüm için genel olarak izlenen yol, Jakobiyen matrisinin tümünü göz önüne almaktır. Ancak bu yapıldığında Jakobiyen matrisinin simetrik olmayan yapısı nedeniyle önkoşullandırılmış bi-Eşlenik Gradyan-stabil (biCG-stab Preconditioned bi-Conjugate Gradient-stabilized) ya da GMRES (Generalized Minimal Residuals) gibi yöntemler kullanılmaktadır [12]. Krylov tabanlı bir yöntem olan biCG-stab, standart eşlenik gradyanlar (Conjugate Gradient) yaklaşımının genelleştirilmiş halidir ve katsayı matrisi A'nın güç akışı probleminde olduğu gibi simetrik olmaması durumunda da çalışır. Bu durumda, Algoritma 1 ile verilen yük akışı çözümünde (4) numaralı adımda verilen doğrusal denklem takımı, Algoritma 2 ile verilen biCG-stab ile çözümlenerek bilinmeyenler bulunabilir [21].

Algoritma 2: Önkoşullandırılmış bi-eşlenik Gradyanlar Yöntemi (biCG-stab)

Girdiler: F, J, x₀

Çıktılar: x

$$r_0 = F - Jx_0$$

(\hat{r}_0, r_0) ≠ 0, olacak şekilde bir \hat{r}_0 vektörü seç. Ör: $\hat{r}_0 = r_0$

$$\rho_0 = \alpha = \omega_0 = 1$$

$$v_0 = p_0 = 0$$

For i = 1, 2, 3, ...

$$\rho_i = (\hat{r}_i, r_{i-1})$$

$$\beta = (\rho_i / \rho_{i-1}) (\alpha / \omega_{i-1})$$

$$p_i = r_{i-1} + \beta(p_{i-1} - \omega_{i-1}v_{i-1})$$

$$y = K^{-1}p_i$$

$$v_i = Jy$$

$$\alpha = \rho_i / (\hat{r}_i, v_i)$$

$$h = x_{i-1} + \alpha y$$

If h yakınsamışsa then $x_i = h$ atamasını yap ve çık

$$s = r_{i-1} - \alpha v_i$$

$$z = K^{-1}s$$

$$t = Jz$$

$$\omega_i = (K^{-1}t, K^{-1}s) / (K^{-1}t, K^{-1}t)$$

$$x_i = h + \omega_i z$$

If x_i yakınsamışsa then çık

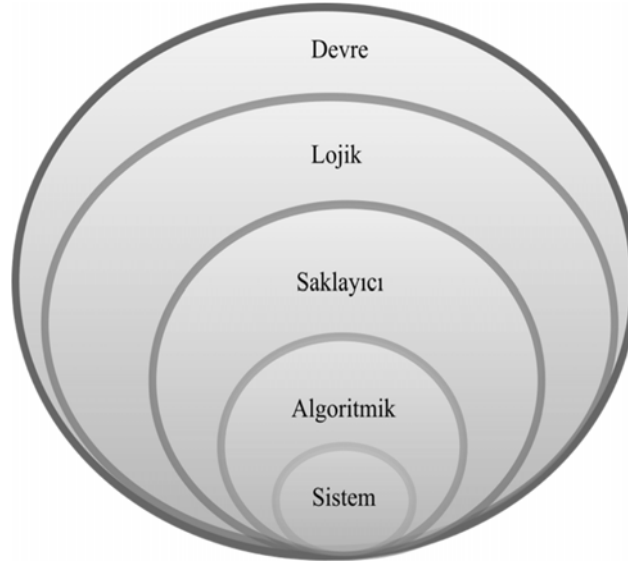
$$r_i = s - \omega_i t$$

Her ne kadar küçük boyutlu sistemlerin çözümünde her iki durumda da LU gibi doğrudan yöntemler kullanılsa da literatürde gösterildiği üzere, özellikle problem boyutu çok büyüdüğünde paralel hesaplama tekniklerine başvurulması bir zorunluluk haline almaktadır. Gerek daha az veri bağlılığına sahip olmaları, gerekse de algoritmik olarak paralel hesaplamaya doğrudan yöntemlere göre daha uygun olmaları yinelemeli yöntemlerin ölçeklenebilirliklerini arttırmakta ve bu nedenle de yüksek başarılı hesaplama sistemlerinde doğrudan yöntemlere göre tercih edilmelerine yol açmaktadır [13]. Elektrik güç sistemlerinin modellenmesinde ortaya çıkan matrisler, seyrek (sparse) yapıdadırlar. Çoğunluk elemanı sıfır olan bu matrislerin yer aldığı büyük boyutlu doğrusal denklem sistemlerinin çözümünde yinelemeli yöntemler bellek, haberleşme, ölçeklenebilme ve hesaplama süresi konusunda önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada yük akışı probleminin geçici hata hassasiyeti, seçilmiş olan uygun yinelemeli yöntem (biCG-stab) açısından değerlendirilecektir.

2.2. Yük Akışı Probleminde Geçici Hata Modellemesi

(Modelling the Silent Data Corruption Problem in Power Flow Simulation)

Geçici hataların hesaplama biriminin bellek, ALU (Arithmetic Logic Unit) ya da bellek ile işlemci arasındaki veri hatlarında çoğunlukla bit-kayması formunda görülebildiği literatürde sıklıkla tartışılmış ve gösterilmiştir [14]. Devre tasarımı açısından değerlendirilecek olursa geçici hata problemi, devre elemanlarının ışınım dayanımlarının bir ölçüsü olarak da kurgulanabilir. Buna bağlı olarak literatürde çip üzerindeki devre elemanlarının artırılmış ışınım karşı dayanımlarını test eden çok sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır [15]. Yine benzer bir şekilde, büyük ölçekli entegre devrelerin farklı tasarım seviyelerinde geçici hataların etkilerinin incelenmesine ilişkin birçok çalışma da literatürde mevcuttur [16]. Öte yandan eğer geçici hatanın daha yüksek seviyelerdeki etkileri (örneğin sayısal simülasyonlar üzerindeki etkisi) ölçülmek isteniyorsa bu tip donanım seviyesinde yapılacak modellemeler yetersiz kalacaktır. Bunun en temel nedeni ise düşük seviyede kurgulanan bir geçici-hata modelinin tasarımın üst seviyedeki bir uygulamaya çıktısına yansıma olasılığının oldukça düşük olmasıdır. Dolayısıyla hassasiyeti ölçülecek olan seviyeye göre modelleme yapılması literatürde kabul gören bir yaklaşımdır [17]. Bu çalışmada geçici hataların elektrik güç sistemi problemleri üzerindeki etkileri üzerinde durulacağı için geçici hatalar yazılım seviyesindeki bit-kaymaları olarak modellenmiştir. Farklı tasarım seviyeleri ile birlikte bizim bu çalışmada kullandığımız yazılım seviyesi geçici hata modelleri arasındaki ilişki Şekil 1 ile verilmiştir. Her ne kadar fiziksel bit-kaymalarının yazılım seviyesinde ne şekilde modellenmesi gerektiği halen tartışılan açık bir problem olsa bile genel kabul gören (ve bu çalışmada kullanılacak olan) yöntem, bellekte bulunan kayar-noktalı sayılardan rastgele seçilen birisinin herhangi bir bitinde değişiklik yapmaktır [16]. Bu soyutlama seviyesi olası bir geçici hatanın sayısal benzetim prosedürü üzerindeki etkilerinin ölçülmesini olası kılacaktır. Ancak burada elde edilen sonuçların oldukça kötümser çıkacağı da göz ardı edilmemelidir. Geçtiğimiz son on yılda geçici hataların incelenmesine yönelik çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Özellikle yakın bir gelecekte kullanıma sunulacak olan exa-ölçekli hesaplama sistemlerinin bu tip hatalara karşı daha duyarlı olacağı gerçeği bu çalışmaları hızlandırmıştır [9]. Bir örnek olarak



Şekil 1. Hesaplama birimlerinin tasarım aşamalarının sınıflandırılması (Classification of design steps for computational units).

BlueGene/L hesaplama sisteminin L1 belleğinde her 4-6 saatte bir geçici hata oluştuğu gösterilmiştir [18]. Geçici hataların oluşma sıklıkları SER (Soft Error Ratio) olarak isimlendirilir ve genellikle cihaz karakteristiklerinde FIT (Failure in Time) ya da MTBF (Mean Time between Failures) birimleri ile ölçülürler. FIT, 10^9 cihaz-saat operasyonuna karşılık düşen birim hata sayısını ve MTBF olarak yılda bir hataya denk düşerler. Her ne kadar bu değerler çok düşük olasılıklara işaret etseler bile saniyede 10^{18} işlem yapabilme kapasitesine sahip hesaplama sistemleri olan exa-ölçekli sistemlerde bu sürelerin her dakikada bir geçici hataya denk düşeceği öngörülebilir [19]. Tüm bu nedenlerden ötürü bu çalışmada özellikle yüksek boyutlu sistemlerin yüksek hızlarda çözülmesini gerektirebilen elektrik güç sistemi problemlerinde karşılaşılabilecek geçici hataların etkileri incelenmiştir.

Geçici-hataların sayısal yöntemler üzerinde oluşturabileceği hataları açıklayabilmek için bir örnek olay üzerinden gidilebilir. Bilindiği üzere doğrusal denklem sistemleri birçok bilimsel problemin çözümü sırasında ortaya çıkabilmektedir [20]. Esas olarak Eş. 3 ile de bir benzerini vermiş olduğumuz doğrusal denklem sistemi J ($n \times n$) boyutlu katsayılar matrisi, F ($n \times 1$) boyutlu sağ yan vektörü ve x ($n \times 1$) boyutlu bilinmeyen vektörü olmak üzere Eş. 5 ile verildiği gibi yazılabilir;

$$Jx = F. \quad (5)$$

Bu denklem takımının çözümü için literatürde doğrudan ve yinelemeli olacak şekilde birçok farklı metodoloji önerilmektedir [21]. Doğrudan çözümler arasında en sık kullanılanlardan birisi olan LU ayrıştırması yönteminin (5) denkleminin çözümünde kullanıldığı düşünülür. LU yöntemi, katsayılar matrisinin bir altüçgen (L) diğeri ise üstüçgen (U) formunda olacak şekilde iki matrise ayrıştırılması ve sonrasında geriye ve ileriye doğru yerine koyma işlemleri yapılarak çözüme ulaşılmasını sağlar [22]. Ayrıştırma ve çözüm aşamalarında herhangi bir anda, işlemde kullanılmakta olan herhangi bir vektör/matris elemanında bir geçici-hata yaşanması durumunda bu hata söz konusu işlemten sonra gelen bütün adımları ve doğal olarak sonucu etkileyebilecektir [23]. LU ayrıştırması sırasında oluşacak olan geçici hataların ekonomik bir şekilde tespit edilip düzeltilmesine yönelik bazı algoritmik hata toleransı yaklaşımları literatürde bulunabilir [24]. Her ne kadar bu yaklaşımların birçoğunda katsayılar matrisinin yoğun (dense) olduğu durumlar göz önüne alınmıyor olsa da elektrik güç

sistemlerinde olduğu gibi seyrek (sparse) matrisler için yine elektrik güç sistemlerinde kullanılan bir diğer yaklaşım olan Hızlı Ayrıştırılmış Yük Akışı (Fast Decoupled Load Flow) yöntemine ilişkin çözüm öneren araştırmalar da söz konusudur [25]. Ayrıca literatürde hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde karşılaşılan geçici hatalar ile ilgili çalışmalar da mevcuttur [17]. Söz konusu çalışmada kısmi türevli denklemlerin ayrıştırılması ile elde edilen düzenli yapıya sahip matrislerden oluşan doğrusal olmayan sistemlerde geçici hata etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada farklı bir geçici hata davranış modeline sahip olan ve fiziksel sistemden ayrıştırma yoluyla değil de doğrudan elde edilen ve bu nedenle de hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinde ortaya çıkan denklem sistemlerinden tümüyle farklı niteliklere sahip elektrik güç sistemi problemlerinde uygulanan Newton/Krylov yaklaşımlarının geçici hata dayanımları incelenecektir.

Literatürde simetrik olmayan denklemlerin çözümü için kullanılan farklı yöntemler bulunsun da, özellikle daha az haberleşme ihtiyacı duyacak şekilde modifiye edilebilmesi biCG-stab yöntemini modern bilgisayar mimarileri için daha kullanışlı kılmaktadır [26]. Doğrusal olmayan Eş. 1 denkleminin herhangi bir Newton adımının herhangi bir Krylov yinelemesinde (biCG-stab) ortaya çıkan herhangi bir matris/vektör ya da skaler bileşende beklenmedik bir bit-kayması oluşabilir. Oluşacak olan bit-kayması, nerede oluştuğuna, hangi yineleme adımında oluştuğuna hangi bitte gerçekleştiğine bağlı olarak da biCG-stab yöntemi iraksayabilir. Bu iraksamanın dış Newton yinelemesinde yol açabileceği üç önemli sonuç söz konusudur. Çözüm vektörü, iç yinelemedeki bit kaymasından dolayı hatalı olarak bulunduğu, Newton-Krylov iterasyonunda, a) dış yinelemenin yakınsaması gecikebilir b) doğrudan doğruya hatalı bir değere yakınsayabilir c) iraksayabilir. Özellikle büyük boyutlu sistemlerde yakınsama gecikmesi problem çözümünde çok ciddi hesaplama maliyetleri getirebilmektedir ve çoğunlukla kabul edilemez. Sadece bit kaymalarının değil yuvarlama ve kesme hatalarının da yakınsamada gecikmelere yol açtığı ve bu gecikmelerin gerektiği literatürde gösterilmiştir [20].

3. Deneysel Metot (Experimental Method)

Geçici-hataların benzetiminde kullanılan bit-kayması yaklaşımının literatürde kabul görmüş herhangi bir fiziksel/matematiksel modeli bulunmamaktadır [14]. Bit-kaymasının hesaplamasının herhangi bir

adımında, herhangi bir veri üzerinde gerçekleşebileceği gerçeği, geçici-hatalara karşı duyarlılığı inceleme çalışmasını yarı istatistiksel bir çalışmaya çevirmektedir. Bu çalışma çerçevesinde bit-kaymasının olabileceği mümkün tüm durumlar göz önüne alınarak, aşağıda özetlenen parametrelerin düzgün dağılımı üzerinden deneysel bir çalışma yapılacaktır. Bunun için literatürce kabul gören güç akış modellerinde aşağıdaki dört durum göz önüne alınmalıdır. Öte yandan, tüm örnek uzayının incelenmesinin yaratabileceği bilgi kirliliği de göz önüne alınarak, güncel literatürdeki çalışmaların çerçevesinde bazı ek kısıtlar kullanılmıştır.

Genel çerçevede bit kaymasının;

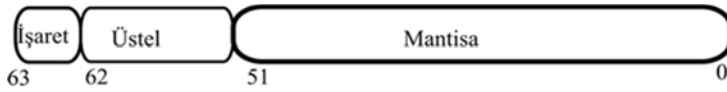
- IEEE754 64 bit kayar noktalı gösterilimdeki 64 bitin herhangi birisinde (Eş. 6'da IEEE-754 kayar noktalı gösterilime ilişkin genel bilgi bulunabilir),
- Newton yinelemesinin herhangi bir adımında
- Jakobyen matrisinin tersinin alınması sırasında kullanılan yinelemeli yöntemin (biCG-stab) herhangi bir adımında
- biCG-stab yönteminin her bir adımında ortaya çıkan matris veya vektörlerin herhangi bir elemanında
- ortaya çıkabileceği düşünülebilir.

Bu çalışmada kullanılan IEEE*754 64-bit kayar noktalı aritmetik standartı Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisleri Kuruluşu (IEEE) tarafından geliştirilmiştir [REFERANS <https://ieeexplore.ieee.org/document/30711>]. Günümüz bilgisayar mimarilerinde çokça yer bulan 64-bitlik gösterilim de bu standart çerçevesinde tanımlanmıştır. Buna göre 64-bitlik kayar noktalı sayılar Şekil 2'de verildiği gibi gösterilir. Çalışmanın sonuç bölümünde yer alan şekillerde gösterim kolaylığı açısından bit numaraları 1-64 arasında gösterilmiş olup 1 numaralı bit işaret bitine denk düşürülmüştür.

Bu gösterilimle herhangi bir gerçel sayının (örneğin n sayısının) bitlerine göre gösterilimi Eş. 6'da verildiği gibi yapılabilir.

$$n = (-1)^{b_{63}} \left(1 + \sum_{i=1}^{52} b_{52-i} 2^{-i} \right) x 2^{e-1023} \quad (6)$$

Burada; b_{63} işaret biti, $b_{0:51}$ mantisa ve e ($b_{62:51}$) üstel bitleri göstermektedir. Geçici hata modellemesinde kabul gören yaklaşımlardan birisi, n sayısına ait bu bitlerden herhangi birisini 0 ise 1'e ve 1 ise 0'a çevirmektir.



Şekil 2 IEEE-754 kayar noktalı gösterilimdeki bitlerin dağılımı. (Distribution of bits in IEEE-754 floating point representation.)

Tablo 1. Bilimsel akış şemasındaki parametre ve kısıtların açıklaması (Explanation of the parameters and limitations appeared in scientific workflow)

Parametre	Açıklama	Olası Değer aralığı
IEEE Test Sistemi	Literatürde kabul gören 4 standart test sistemi kullanılmıştır	Test Sistemleri: IEEE-118 [29], IEEE-300 [29], Avrupa Sistemi [30], Polonya Sistemi [28]
NR iterasyonu	Geçici-hata olmaması durumundaki (hatasız çözümde) yineleme sayısına dek hangi NR/FDLF yineleme adımındaki bit-kayması olacak?	Algoritma 1 2. adımında verilen döngü değişkeni. Seçilen test sistemleri hatasız çalıştırmada en fazla 5 NR iterasyonunda yakınsamaktadırlar.
Geçici-hata yeri	Geçici-hata yinelemeli yöntemin hangi işleminde gerçekleşti?	Algoritma 2-5e ile verilen matris vektör işlemi test için seçilmiştir.
Geçici-hata biti	Geçici-hata seçilen değer hangi bitinde gerçekleşti?	IEEE-754 gösterilimindeki İlk 32 bit kullanılmıştır.
Geçici-hata konumu	Geçici-hata seçilmiş olan vektörün hangi elemanında gerçekleşti?	Her bir test sistemi için rastgele 30 farklı eleman seçilmiştir.

Öte yandan, Agullo vd. [2] çalışmalarında gösterdiği gibi bit-kaymasının etkileri en belirgin olarak IEEE754 64 bit kayar noktalı gösteriliminde işaret biti, üstel kesim ve mantisanın en önemli (most significant part) kısmında oluşması durumunda gözlenmektedir. Bu nedenle yapılan testlerde ilk 32 bit göz önüne alınmıştır. Yine aynı çalışmada vurgulandığı üzere, Krylov altzayına dayalı yinelemeli yöntemlerde, bit kayması oluşmasında asıl risk taşıyan yinelemeler öncül yinelemelerdir. Bu çalışmanın temel araştırma sorusu Newton yönteminin Krylov tabanlı yöntemlerde oluşan bit kaymalarına karşı olan hassasiyetlerinin incelenmesi olmasından ötürü, biCG-stab yönteminde bit kaymasının oluşacağı yineleme sayısı öncül bir yineleme sayısında (10) sabit tutulmuştur. Böylelikle iç döngünün (biCG-stab) yineleme sayısı parametre uzayından çıkarılmıştır. Geçerli yinelemelerdeki bit kaymalarının etkileri hakkında detaylı bilgi için okuyucu [27] kaynağından faydalanabilir. Geçici hata benzetiminin güç akışı problemi özelinde gerçekleşmesi için öncelikle, Algoritma 1'in 4. Adımında ortaya çıkan doğrusal denklem çözümü Algoritma 2 ile çözülmekte ve bu çözüm işlemi sırasında Tablo 1 ile verilen parametreler uyarınca ilk Matris-vektör çarpımı işlemi (5-e adımı) gerçekleştirilirken, girdi vektörü y 'nin seçilen rastgele bir elemanındaki bitlerden seçilen bir tanesinde bit-kayması uygulanmaktadır. Bit-kayması işlemi yapılırken, eğer ilgili bit değeri 1 ise 0'a ve 0 ise 1'e dönüştürülmektedir. Tüm bu parametrik yapı göz önüne alınarak bir deneysel tasarım yapıldığında çok yüksek sayıda farklı senaryo ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak, m yinelemede yakınsayan bir Newton yinelemesinde, eğer doğrusal sistem çözümlenirken biCG-stab ile çözüme gidiliyorsa, bit kayması herhangi bir Newton yinelemesindeki biCG-stab iç yineleme adımlarından herhangi birisinde (bu çalışma için sabit olarak 10. Yinelemede) oluşan herhangi bir vektörün herhangi bir elemanındaki herhangi bir bitte oluşabilir. Bu nedenle güvenilir bir istatistiksel veri elde edebilmek için söz konusu benzetimin farklı hata senaryoları ile birçok kez çalıştırılması ve olasılık uzayının tümünün taranması gerekmektedir. Bu çalışmada tüm olası bit kayması senaryoları ile ilgili veri üretimi yerine bazı kısıtlar çerçevesinde daha öz bir veri üretilerek gerekli analizler yapılmıştır. Bu çalışmada bulunan kısıtlar ve bilimsel nedenleri Tablo 1 ile verilmektedir. Farklı güç sistemi modelleri de göz önüne alındığında gerçekleştirilen deney sayısı onbinler mertebesine çıkabilmekte ve bu deneylerden elde edilerek analiz edilen veri miktarı, *bilimsel büyük veri* (scientific big data) sınıfına girmektedir. Bu nedenle de gerek veri üretimi gerekse de analiz aşamasında uygun bir bilimsel iş akışı yönteminin büyük veriye uygun olarak tasarlanması çalışmanın güvenilirliğini ve etkinliğini

arttıracaktır. Kurgulanan deneysel tasarım sadece bir kez çalıştırılarak olası farklı senaryolar için denklem sistemlerinde oluşacak farklı sayısal değerler (kalan, hata, yakınsama, vb.) duyarlılık ölçümünde kullanılmak amacıyla saklanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucu toplanan veri, iki farklı şekilde analiz edilmiştir. İlk aşamada güç akışı probleminin -dolayısıyla da kullanılan Newton-Raphson yönteminin-geçici-hataya karşı olan hassasiyeti incelenmiştir. İkinci aşamada ise iç yinelemede kullanılan çözüm yönteminin (biCG-stab) geçici hata duyarlılıkları tartışılmıştır.

Çalışma sırasında kullanılacak olan ve standart olarak kabul gören açık kaynak kodlu Matpower yazılımı detayları Tablo 1’de açıklanan parametreleri giriş değeri olacak şekilde değiştirilerek kullanılmıştır. Matpower, akademik çalışmalarda yoğun bir şekilde kullanılmakta olan güç sistemlerinin modellenmesi için Matlab dilinde geliştirilmiş bir kitaplıktır [28]. Bu yazılımın modüler yapısı, düzgün hazırlanmış kullanım kılavuzu ve aktif kullanıcı gruplarındaki güncel tartışmalar yapılacak değişikliklerin kolayca yapılabilmesini sağlamaktadır. Çalışmadan elde edilen duyarlılık analizi sonuçları hangi durumlarda oluşacak geçici-hataların problemin yakınsaması üzerinde daha çok etkiye sahiptir sorusunu yanıtlamaktadır. Özet olarak bu çalışma ile, doğrusal olmayan denklem çözümleri için kullanılan Newton-Krylov yönteminin geçici hata analizi ilk kez incelenmiş ve bunun doğrudan elektrik mühendisliği problemlerinin çözümünde yaratabileceği sorunlar tartışılmıştır. FDLF yönteminde oluşturulan yaklaşık Jakobiyen matrisi simetrik ve artı tanımlıdır. Bu nedenle PCG yöntemi ile çözülmesi mümkündür. Ancak klasik Newton metodu kullanıldığında, Jakobiyen matrisinin simetrik olmayan bir matris olduğu göze çarpmaktadır ve bu durumda kullanılan bir yöntem biCG-stab algoritmasıdır [12].

Güç sistemlerinin modellenmesi de dahil olmak üzere birçok mühendislik probleminin çözümünde (5) ile verilen doğrusal denklem sisteminin çözümü anahtar rol oynamaktadır. Üstelik, bu problemin çözümü çoğunlukla sistem çözümündeki temel hesaplama pahasını yaratmaktadır. Bu nedenlerle bu çalışmada (5) ile verilen doğrusal denklem sisteminin çözümünü daha *dayanıklı* (robust) ve *esnek* (resilient) kılacak ve dolayısıyla güç akışı benzetiminin güvenilirliğini arttıracak yaklaşımlar geliştirilmesini mümkün kılacak bir duyarlılık analizi araştırması yapılmıştır. Bu amaçla her bir test sistemi için 1920 farklı geçici hata senaryosu (toplamda 7680 farklı senaryo) incelenmiş ve tüm sonuçlar istatistikî olarak analiz edilerek geçici hataların simülasyon sonuçlarının güvenilirliğine olan etkisi ortaya konulmuştur.

4. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

Bu çalışmada temel olarak 4 farklı test sistemi (IEEE 118, IEEE 300, Avrupa modeli ve Polonya modeli) göz önüne alınmıştır. Bu seçimde sistem Jakobiyen matrisinin farklı sayısal özellikler taşımasına dikkat edilmiştir. Sistemlerin yinelemeli yöntem çözümünde önem taşıyan bazı sayısal özellikleri Tablo 2 ile verilmiştir. Burada özellikle sistemlerin koşul sayısı kullanılan yinelemeli yöntemin (biCG-stab) yakınsama hızı ile doğrudan ilintilidir. Ayrıca her bir matris için seyreklik oranı da hesaplanmıştır. Seyreklik oranı matrisin sıfır olmayan elemanlarının sayısının toplam eleman sayısına bölümü ile hesaplanmaktadır. Düşük seyreklik oranı, yinelemeli yöntemin (bu

çalışmada biCG-stab) doğrudan yöntemle (LU) kıyasla daha hızlı çalışabileceğini gösteren bir parametre olarak değerlendirilebilir. Seçilen test sistemleri ile yapılan sayısal deneylerde üç önemli soruya yanıt aranmıştır:

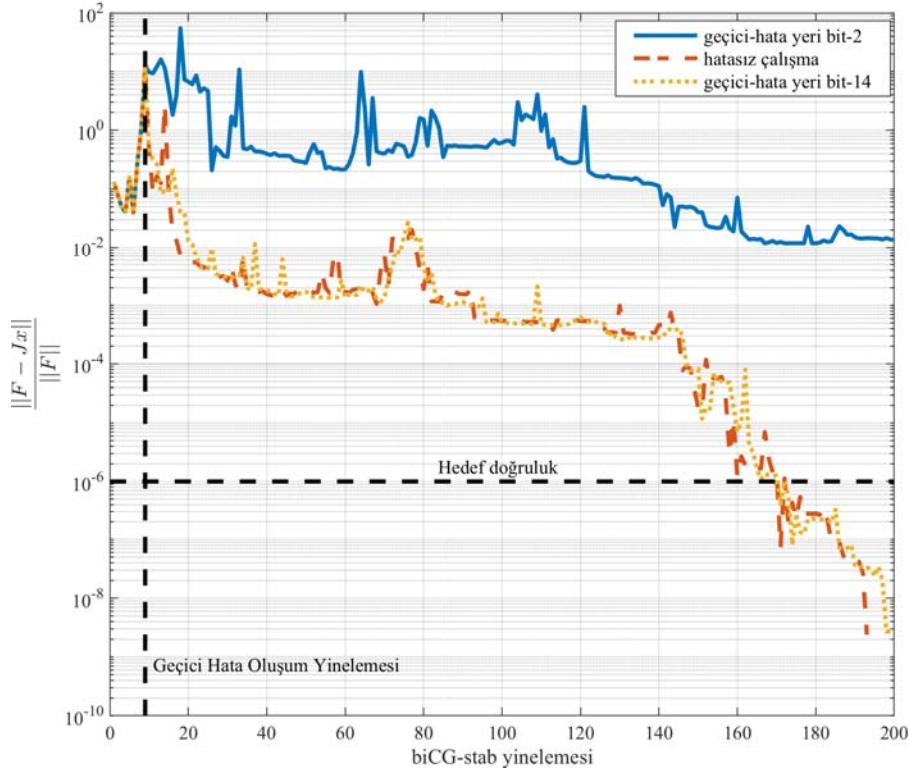
- Farklı geçici hatalar güç akışı probleminin yakınsamasına hangi oranda etki etmiştir?
- IEEE-754 kayar noktalı gösterilimdeki hangi bitlerde oluşan geçici hata Newton-Raphson iterasyonuna ne şekilde etki etmiştir?
- Newton-Raphson yakınsamasında hangi bitlerdeki geçici hatalar daha çok gecikmeye neden olmuştur?

İlk olarak IEEE-300 sistemi sadece iki farklı geçici hata durumu için ele alınmıştır. Sistemin çözümü aşamasında, Tablo 1 ile verilen parametreler aşağıda verildiği şekilde seçilerek, geçici hatanın Eş. 5 ile verilen $Jx=F$ doğrusal denklem takımının çözümünün yakınsamasına olan etkileri incelenmiştir. Burada, Newton-Raphson algoritması için yakınsama kriteri 10^{-3} ve biCG-stab algoritmasının hedef doğruluğu 10^{-6} olarak seçilmiştir. Tam olmayan Newton (Inexact Newton) çözümlerinde çoğunlukla iç yinelemeli çözücü (bu çalışmada biCG-stab) hedef doğruluğunun çok düşük seviyelerde seçilmesi çözüm süresini olumsuz etkileyeceği için istenmez. Geçici hata Newton-Raphson yinelemesinin ilk adımındaki biCG-stab çözümünün 10. yinelemesindeki ilk matris-vektör çarpımında (Algoritma 2-5.e) oluşturulmuştur. Bu matris vektör çarpımının girdi vektörü olan y vektörünün rastgele seçilmiş bir elemanında sırasıyla 2 (en yüksek üstel bit) ve 14 (2. En yüksek mantisa biti) numaralı bitlerde geçici hata oluşturularak biCG-stab algoritmasının yakınsaması üzerine etkileri incelenmiştir. Şekil 3 ile verilen sonuçlar incelendiğinde, 2 numaralı bitte 10.yinelemede oluşan geçici hatanın doğrudan etkisi gözlemlenebilir. 14 numaralı bitte oluşan geçici hata ise hatasız yakınsama grafiğine göre küçük pertürbasyonlar oluşturmak dışında bir etki göstermemiştir. Burada geçici hatanın IEEE-754 kayar noktalı gösterilimin iki bitinde (sırasıyla bit-2 ve bit-14) ortaya çıktığı göz önüne alınmıştır. Dahası bu iki farklı yakınsama davranışının, Newton-Raphson iterasyonu yakınsamasına bir etki göstermedikleri de gözlenmiştir. Öte yandan, sadece bu iki testten yola çıkarak nesnel bir sonuca ulaşılabileceği mümkün olmayacağından farklı geçici hata simülasyonlarının istatistikî olarak anlamlı olabilecek sayıda tekrarlanması gerekmektedir. Bu amaçla 4 farklı test sistemi için toplam 7.680 adet farklı geçici hata simülasyonu Tablo 1’de verilen parametrelere göre üretilerek sonuçları incelenmiştir.

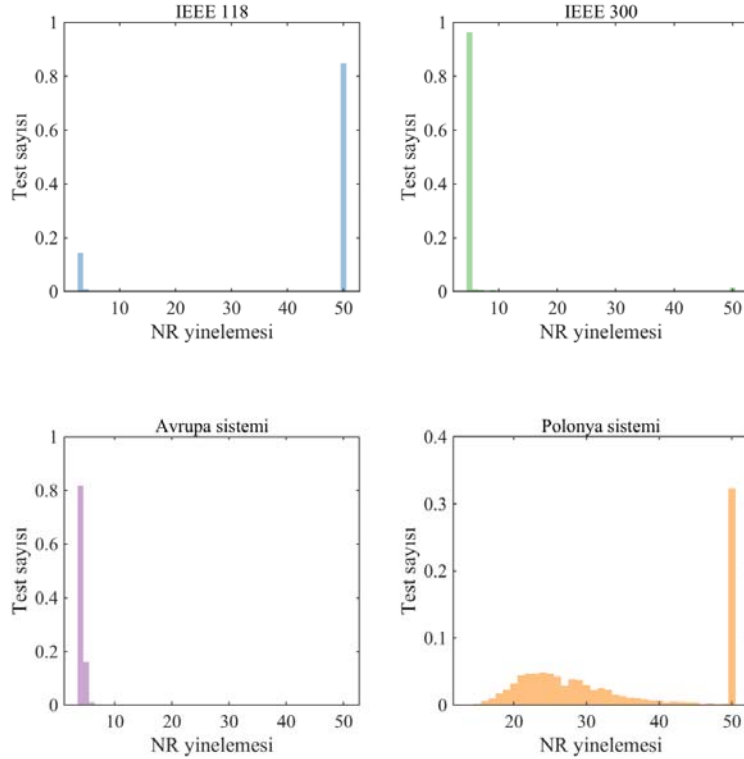
Şekil 4 geçici hataların Newton-Raphson (NR) yakınsamalarına olan etkilerinin genel bir görüntüsünü vermektedir. Bu şekilde, yapılan test sayılarının NR yinelemesi adetlerine göre normalleştirilmiş yaklaşık olasılık dağılımları verilmiştir. Test sistemlerinin herhangi bir geçici hata olmaması durumunda kaç NR yinelemesinde yakınsadıklarına ilişkin bilgi, Tablo 2’de verilmektedir. Maksimum NR yinelemesi sayısı 50 olarak seçilmiştir. 50 yinelemede NR yakınsaması gözlenmemişse MatPower yazılımı yakınsama olmadığını bildirerek çalıştırmayı sonlandırmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde, IEEE-300 ve Avrupa sisteminin geçici hataya karşı dayanımlarının iyi olduğu görülmektedir. Öte yandan IEEE-118 sisteminde oluşturulan geçici hataların %85 oranında iraksamaya yol açtıkları görülmektedir. Bu durum sistemin Jakobiyen matrisinin kullanılan test sistemleri içerisindeki en yoğun elemana sahip matris olup en küçük boyutlu

Tablo 2. Deneylerde kullanılan test sistemlerinin Jakobiyen matrislerinin sayısal özellikleri (Numerical properties of the Jacobian matrices of the test systems used in the experiments)

Test Sistemi	Boyut	Koşul sayısı	Norm	Seyreklik	NR yinelemesi
IEEE118 [29]	181	5,7106e+03	585,2739	0,0321	3
IEEE 300 [29]	530	2,5539e+05	4,6164e+03	0,0133	5
Avrupa Sistemi[30]	2447	6,7890e+05	2,3617e+04	0,0026	4
Polonya Sistemi [28]	4438	1,0926e+06	2,5347e+04	0,0014	25



Şekil 3. IEEE-300 test sisteminin iki farklı geçici hata durumu ile çalıştırılması durumunda biCG-stab algoritmasının yakınsama davranışı (The convergence behaviour of IEEE-300 test system under two different soft-error scenario)



Şekil 4. Dört farklı test sistemi için geçici hataların NR yinelemeleri üzerine etkisinin gösterilmesi. (Representation of the soft-error effects on the number of NR iterations for four different test system)

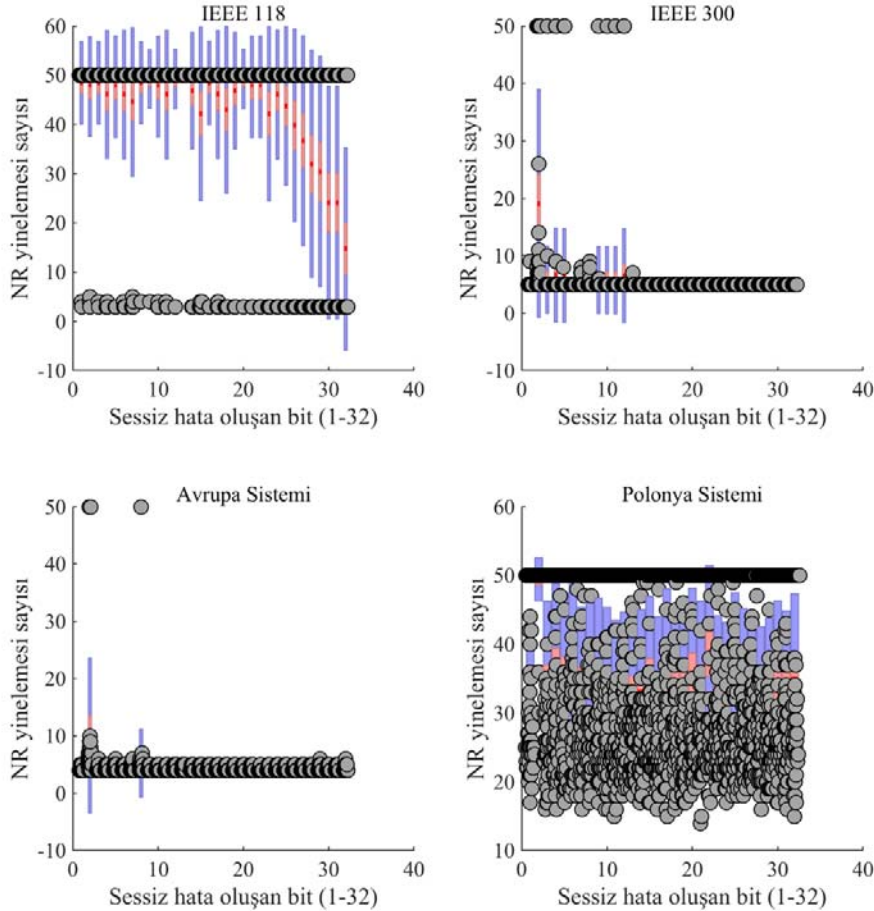
matris olması ile açıklanabilir. Bu ölçek problemi nedeniyle de yapılan geçici hata manipülasyonları Jakobiyen matrisinin tüm elemanlarına yayılmış ve çoğunluk senaryoda Newton-Raphson 586

iterasyonunun yakınsamamasına neden olmuştur. Son olarak Polonya sistemi incelendiğinde ise geçici hata karşısında Newton-Raphson yakınsaması sayılarının önemli bir değişkenlik gösterdiği

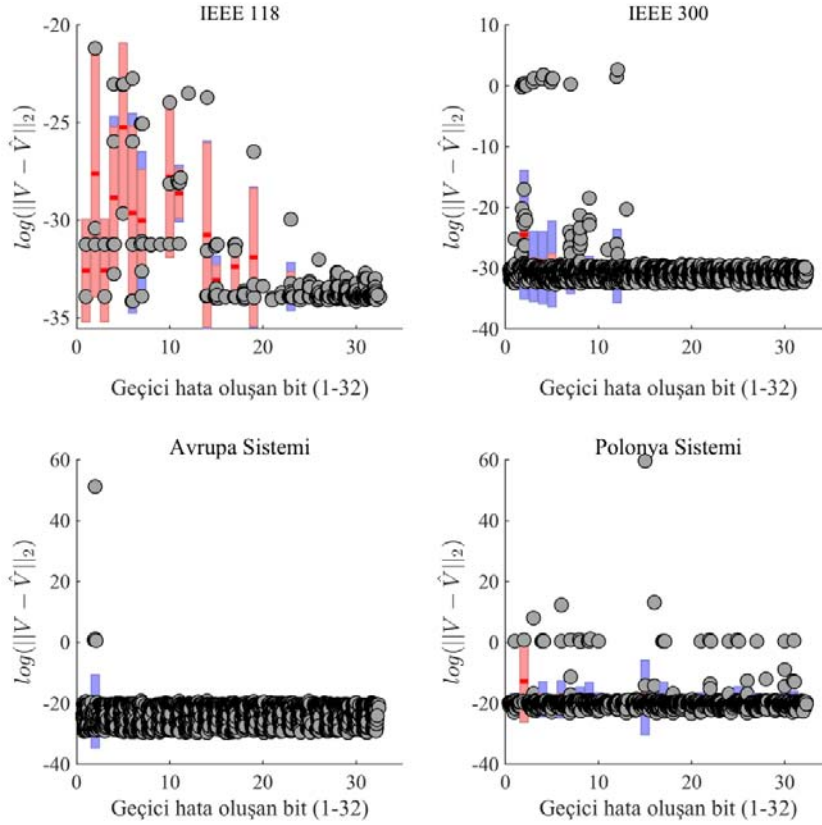
görülmektedir. Bu durum, söz konusu sistemin geçici hatalara karşı yüksek duyarlılık gösterdiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir. Bunun altında yatan temel neden ise bu sistemin Jakobiyen matrislerinin diğer test sistemlerine nazaran daha yüksek koşul sayısına ve daha düşük seyreklik katsayısına sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Yinelemeli yöntemlerin yakınsama özellikleri genellikle özdeğer dağılımları ile ilişkilendirilir ve yüksek koşul sayısı, Jakobiyen matrisinin özdeğer dağılımının yinelemeli yöntem yakınsamasını geciktirecek şekilde pertürbasyonlara duyarlı olması ile açıklanabilir. Şekil 4 ile verilen genel görülmü detaylandırmak için yapılan testlerin Newton-Raphson yakınsamasına geçici hatanın olduğu bite göre etkisi incelenmelidir. Bu incelemeye ilişkin sonuçlar Şekil 5 ile verilmiştir. Bu şekildeki her bir nokta yapılan bir geçici hata senaryosuna denk düşmektedir. Öte yandan istatistiki analiz yapılabilmesi için 1 ila 32 arasındaki her bir bit için (Eş. 6 detaylı bilgi bulunabilir) bir kutu grafiği çizilmiştir.

En kararsız davranış, Şekil 4 ile uyumlu olacak şekilde yine Polonya sisteminde gözlenmiştir. Polonya sisteminde neredeyse her geçici hata senaryosunun sistemin yakınsamasında farklı etkiler gösterdiği görülmektedir. Öte yandan Şekil 4'de göreceli olarak daha kararlı gözükürken IEEE-300 ve Avrupa sistemlerindeki Newton-Raphson yakınsaması için gerekli yineleme sayılarındaki değişimin çoğunlukla IEEE-754 gösterilimindeki üstel kısımlarda oluşan geçici hatalarda olduğu gözlenmektedir. Oransal olarak az sayıda olan bu değişimlerin toplam simülasyon süresine olan etkileri göz önüne

alındığında, özellikle üstel bitlerin (1-11) geçici hatalara karşı donanım ya da yazılım tabanlı yöntemlerle korunmalarının önemi ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak IEEE-300 test sistemine ilişkin şekil incelendiğinde, geçici hataların Newton-Raphson yönteminin yakınsamasını sadece küçük bir oranda engellediği ve bu durumun da çoğunlukla, ilk 15 bite (üstel kesim ve mantısanın anlamlı kısmı) oluşan geçici hatalarda oluşabildiği görülmektedir. Öte yandan yine aynı bölgede oluşan geçici hataların bir kısmının hatasız çalıştırmadaki Newton-Raphson yönteminin yakınsadığı yineleme sayısı olan 5'ten (Tablo 2) saparak 7-8-9-10 değerlerinde yakınsayabildiği gözlenmektedir. Bu yakınsama yinelemesindeki sapmalar Polonya sistemi için çok daha belirgindir. Şekil 5 ile verilen deneysel sonuçlar, farklı hata senaryolarının çoğunluğunda yük akışı probleminin çözüldüğü görülmektedir. Ancak genel kabul gördüğü üzere çözüme ulaşılmış olduğu Newton-Raphson yönteminin yakınsaması ile karara bağlanmaktadır. Öte yandan geçici hatanın yaratacağı sayısal gürültü bir anlamda sonlu rakamla işlem yapılmasından kaynaklanan kayar noktalı işlem hatalarının üzerine eklenerek, Newton-Raphson yönteminin doğal doğruluk sınırlarının değişmesine yol açabilecektir. Bu durumu deneysel olarak gösterebilmek için geçici hata senaryosu işletilerek bulunmuş olan gerilim değerleri (\hat{V}) ile hatasız çalışma sonucu bulunan gerilim değerleri (V) karşılaştırılmıştır. Şekil 5 ile birlikte değerlendirilebilmesi için sonuçlar geçici hatanın olduğu bit göz önüne alınarak Şekil 6'da verildiği gibi görselleştirilmiştir. Bu şekilde yük akışı çözümü olarak bulunan gerilim değerlerinin geçici hata



Şekil 5. Farklı test sistemleri için geçici hataların NR yinelemeleri üzerine etkisinin geçici hatanın olduğu bite göre gösterilmesi (Representation of the effect of soft errors with respect to the bits they occurred on the iteration numbers of Newton Raphson iterations of four different test systems)



Şekil 6. Dört farklı test sistemi için geçici hataların çözüm (gerilim değerleri) üzerine etkisinin geçici hatanın olduğu bite göre gösterilmesi (Representation of the effect of soft errors with respect to the bits they occurred on the solution of four different test systems)

oluşması durumunda ne şekilde değişimleri gösterilmiştir. Şekil 5 ile benzer şekilde her bir nokta farklı bir geçici hata senaryosuna denk düşmekte ve sonuçların istatistiksel dağılımları kutu grafikler ile gösterilmektedir. Küçük değerler arasındaki farkı vurgulamak için $\|V - \hat{V}\|_2$ hata değerinin logaritması alınmıştır. Burada sadece Newton-Raphson yönteminin yakınsamış olduğu sonuçlara ilişkin gerilim değerleri hatasız çalıştırmaya göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yakınsayan durumların neredeyse her birinin farklı bir sayısal değere yakınsadığı göz önüne alınabilir. Özellikle daha kararsız sistemlerde geçici hata ile bulunan gerilim değerlerinin fiziksel sistemi yansıtmaktan uzak olabildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Buradan yola çıkılarak, fiziksel güç sistemi modelinin bilgisayar simülasyonu ile bulunan sonuçlarla değerlendirilebilmesi için hesaplama sisteminin güvenilirliğinin sağlanması gerektiği görülmektedir. Bu amaçla da geçici hata oluşabilecek yüksek başarılı hesaplama sistemlerinde, bu durum mutlaka donanım veya yazılım destekli yaklaşımlarla kontrol altında tutulmalıdır. Aksi takdirde bilgisayar simülasyonu sonucu elde edilen değerler, fiziksel sistem davranışının yanlış değerlendirilmesine yol açabilir.

5. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışmada elektrik güç sistemi probleminin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerin geçici hatalara karşı duyarlılıkları incelenmiştir. Bu amaçla 4 farklı test sistemi kullanılarak 7680 farklı geçici hata senaryosu oluşturulmuş ve ortaya çıkan sonuçlar farklı kriterlere göre değerlendirilmiştir. Değerlendirmede kullanılan temel yaklaşım, geçici hataların Newton Raphson yinelemesinin yakınsamasında oluşturdukları gecikmenin ve yakınsama ile bulunan sonucun (gerilim değerleri) doğruluğunun karşılaştırılması şeklindedir. Yapılan sayısal

deneylere göre çalışmadan elde edilen üç temel sonuç vardır. İlk olarak, geçici hata oluşması durumunda sistem benzetimi beklenenden çok daha uzun sürelerde gerçekleşebilmekte (Şekil 5) ve hatta bazı durumlarda Newton-Raphson yöntemi yakınsamamaktadır. Yakınsamanın gecikmesi ise özellikle büyük boyutlu sistemlerde ve hızlı cevap alınması gereken hat çıkması analizi gibi problemlerde hesaplama zamanı ile ilgili sorunlara yol açabilir. Geçici hata oluşmasına karşın gecikmeyle de olsa yakınsayan Newton-Raphson sonuçları yuvarlama ve kesme hataları dışında bazı hatalar içermekte olup, güvenilirlikleri yoktur (Şekil 6). Bu sonuçların güvenle kullanılabilmesi için hesaplama esnasında herhangi bir geçici hata oluşmadığına ilişkin kanıtlar elde edilmesi gerekmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için ve hesaplamaların güvenilirliklerini arttırmak için, geçici hataların sistem davranışları üzerindeki etkisi Jakobiyen matrislerinin sayısal nitelikleri ve kullanılan yinelemeli yöntemlerin (Bu çalışmada Newton Raphson ve biCG-stab) yuvarlama hatalarına karşı olan hassasiyetleri çerçevesinde detaylı bir şekilde incelenmelidir. Geçici hataların büyük bir çoğunluğu etkisi artmış hesaplama sistemi mimarisinden kaynaklanmayan yuvarlama hataları olarak modellenebilmektedir.

Bu bulgular çerçevesinde özellikle çok büyük boyutlu elektrik güç sistemlerinin yüksek başarılı hesaplama sistemlerinde tam-olmayan Newton yöntemleri ile modellenmesi sırasında mutlaka geçici hata kavramının göz önüne alınması gerektiği söylenebilir. Gelecekte, geçici hataların güç sistemi modellerindeki oluşumlarının tespit edilmesine ve hesaplama süreci içerisinde otomatik olarak düzeltilmesine yönelik fiziksel sistemin niteliklerine dayalı yöntemler geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca kullanılan sayısal yöntemlerin yuvarlama hatalarına karşı olan kuramsal hata sınırlarının geçici hata tespitlerinde kullanılması planlanmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Mukherjee S., Architecture Design for Soft Errors. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2008.
2. May T.C., Woods M. H., Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Memories, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 26 (1), 2-9, 1979.
3. Binder D., Smith E.C, Holman A.B, Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 22 (6), 2675-2680, 1975.
4. Van Gils, W., A Triple Modular Redundancy Technique Providing Multiple-Bit Error Protection Without Using Extra Redundancy, *IEEE Transactions on Computers*, 35 (7), 623-631, 1986.
5. Agullo E., Cools S., Yetkin, E. F., Giraud L., Schenkels N., Vanroose W., On Soft Errors in the Conjugate Gradient Method: Sensitivity and Robust Numerical Detection. *SIAM Journal of Scientific Computing*. 42 (6), 335-358, 2020.
6. Klenke A., *Probability Theory*, Springer, Londra, Birleşik Krallık, 2014.
7. Top 500 The List, <http://top500.org>, Erişim Tarihi: Nisan 11, 2021.
8. Cappello F., Geist A., Gropp W., Kale S., Kramer B., Toward Exascale Resilience: 2014 Update, *International Journal of Supercomputing Frontiers and Innovation*, 1 (1), 5-28, 2014.
9. Snir M., Wisniewski R. W., Abraham J., Adve S. V., Bagchi S., Balaji P., Belak J., Bose P., Cappello F., Carlson B., Chien A., Coteus P., DeBardeleben N., Diniz P. C., Engelmann C., Erez M., Fazzari S., Geist A., Gupta R., Johnson F., Addressing failures in exascale computing, *International Journal of High Performance Computing Applications*, 28 (1), 129-173, 2014.
10. Powell, L., *Power System Load Flow Analysis*, McGraw-Hill, ABD, 2005.
11. Dag H., Semlyen A., A new preconditioned conjugate gradient power flow, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18 (4), 1248-1255, 2003.
12. Vorst H. A., *Iterative Krylov Methods for Large Linear Systems*, Cambridge University Press, Birleşik Krallık, 2009.
13. Grama A., Sameh A., *Parallel Algorithms in Computational Science and Engineering*, Springer-Nature, Cham, İsviçre, 2020.
14. Elliott J., Hoemmen M., Mueller F., Exploiting data representation for fault tolerance, *Journal of Computational Science*, 14, 51-60, 2016.
15. Fiala D., Mueller F., Engelmann C., Riesen R., Ferreira K., Brightwell R., Detection and correction of silent data corruption for large-scale high-performance computing, *Supercomputing12-Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, Salt Lake City-ABD, 1-12, 10-16 Kasım 2012.
16. Agullo E., Cools S., Giraud L., Moreau A., Salas P., Vanroose W., Yetkin E. F., Zounon M., Hard Faults and Soft-Errors: Possible Numerical Remedies in Linear Algebra Solvers, *VECPAR 2016, Porto-Portekiz, Lecture Notes in Computer Science*, 10150, 11-18, 2017.
17. Yetkin E.F., Pişkin Ş. Sensitivity of computational fluid dynamics simulations against soft errors, *Computing*, 103, 2687-2709, 2021.
18. Adiga N.R., Almasi G., An overview of the bluegene/l super-computer. In: *Supercomputing '02: Proceedings of the 2002 ACM/IEEE Conference on Supercomputing*, 60-60, 2002.
19. Lienig J., Bruemmer H., *Reliability Analysis*, Springer International Publishing, Cham, İsviçre, 45-73, 2017.
20. Carson E., Strakos Z., On the cost of iterative computations, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2020.
21. Saad Y., *Iterative Methods for Sparse Linear Systems Second Edition*, SIAM, ABD, 2003.
22. Golub G., Van Loan C. F., *Matrix Computations*, The John Hopkins Univ. Press, ABD, 2013.
23. Du P., Luszczek P., Dongarra J., High Performance Dense Linear System Solver with Soft Error Resilience, 2011 *IEEE International Conference on Cluster Computing*, Austin, TX, 272-280, 2011.
24. Yao E., Zhang J., Chen M., Tan G., Sun N., Detection of soft-errors in LU decomposition with partial pivoting using algorithmic-based fault tolerance, *Int. Journal of High Performance Comp. App.*, 29 (4), 422-436, 2015.
25. Yetkin E. F., Ceylan O., Soft-error resiliency of power flow calculations, 52nd *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion-Greece, 28-31 Ağustos 2017.
26. Cools S., Analyzing and improving maximal attainable accuracy in the communication hiding pipelined bigstab method, *Parallel Computing*, 86, 16-35, 2019.
27. Agullo E., Cools S., Yetkin E. F., Giraud L., Schenkels N., Vanroose W., A complementary note on soft errors in the Conjugate Gradient method: the persistent error case. (Teknik Rapor) RR-9360, Inria Bordeaux Sud-Ouest. 2020.
28. Zimmerman R. D., Murillo-Sanchez C. E., Thomas A. J., MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 (1), 12-1, 2011.
29. *IEEE Power systems test case archive*. <http://labs.ece.uw.edu/pstca/>, erişim tarihi: Mayıs 6, 2022.
30. Jozs C., Fliscounakis S., Maeght J., Panciatici P., AC Power Flow Data in Matpower and QCQP Format: iTesla, RTE Snapshots, and PEGASE, <https://arxiv.org/abs/1603.01533>, yayın tarihi: Mart 4, 2016. Erişim tarihi: Mayıs 6, 2022.

