NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci., 2025; 14(2), 760-774



Niğde Ömer Halisdemir Üni**ver**sitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences

Araștırma makalesi / Research article

www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh / www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh



Jeodezik ağlarda matematiksel model seçiminin dengeleme sonuçlarına etkisi

Effect of mathematical model selection on adjustment results in geodetic networks

Nihal Tekin Ünlütürk^{1*}¹⁰, Uğur Doğan²

¹Erciyes Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38030, Kayseri, Türkiye ²Yıldız Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu araştırmanın temel amacı, jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin kullanımının dengeleme sonuçları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, 13 noktalı, doğrultu ve kenar ölçüleri gerçekleştirilmiş bir yatay kontrol ağı kullanılmıştır. Analizlerde, kenardoğrultu, yalnızca doğrultu ve yalnızca kenar ölçüleri olmak üzere üç farklı ölçü grubu tanımlanmış ve serbest ile dayalı ağ dengeleme yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları, tüm ölçü grupları için fazla ölçü paylarını, ölçülerde tespit edilebilen hata sınır değerlerini, belirlenemeyen kaba hataların diğer ölçüler üzerindeki etkisini ve nokta konum hatalarıyla hata ve güven elipslerini kapsamlı bir sekilde ortaya koymustur. Elde edilen sonuçlar, jeodezik ağların güvenilirliğinin belirlenmesinde matematiksel (fonksivonel ve stokastik) model seçiminin kritik bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Jeodezik ağlar, Dengeleme yöntemleri, Matematiksel model, Güvenilirlik

1 Giriş

Kullanım amaçlarına uygun olarak tasarlanan jeodezik ağların, önceden belirlenen güvenilirlik ve duyarlılık kriterlerini karşılaması gerekmektedir. Bu kriterlere ulaşabilmek için, hiçbir datum parametresi (dış parametre) sabit kabul edilmeden, ölçülerdeki düzeltmelerini ve koordinat bilinmeyenlerini en aza indiren "En Küçük Kareler Yöntemi" uygulanmaktadır. Bu yöntem, ölçü farklarının kareleri toplamını minimize ederek ağın doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır [1-4]. Ancak dolaylı ölçülerde, jeodezik ağların dış parametrelerinin tamamının belirlenmesi mümkün olmayabilir. Örneğin; nivelman ağlarında 1 dış parametre (yükseklik), nirengi ağlarında 4 dış parametre (iki öteleme, bir ölçek, bir dönüklük), üç boyutlu jeodezik ağlarda ise 7 (üç öteleme, üç dönüklük, bir ölçek) dış parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin önceden belirlenmesi durumunda, dayalı dengeleme yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, bu parametrelerin hatasız olduğu varsayımı doğru olmadığından, hatalar dengeleme sonuçlarına yansıyabilir. Bu sorunun önüne geçebilmek için, ağın dış parametreleri de

Abstract

The main objective of this study is to explore the impact of various mathematical models on adjustment outcomes in geodetic networks. This was accomplished by using a horizontal control network with 13 stations that included distance and direction measurements. The analyses classified and examined three distinct measurement groups: distance and direction, direction only, and distance only, using free and constrained adjustment approaches. The study's findings provide a comprehensive evaluation of redundancy values for each measurement group, threshold values for detecting measurement errors, the influence of undetected gross errors on other observations, position errors, error ellipses, and confidence ellipses. The results highlight that choosing an appropriate mathematical model, including both functional and stochastic components, is a key factor in ensuring the reliability of geodetic networks.

Keywords: Geodetic networks, Adjustment methods, Mathematical model, Reliability

bilinmeyenler arasına eklenerek, klasik dayalı dengeleme yerine serbest ağ dengelemesi yöntemi uygulanmaktadır [5].

Jeodezik ağların duyarlılık ve güvenilirlik açısından değerlendirilmesine yönelik ilk araştırmalar, Baarda (1968) [6] ve Pope (1976) [7] tarafından uyuşumsuz ölçülerin analizi üzerine yapılmıştır [8,9]. Daha sonraki çalışmalarda, Öztürk [10,11], model hatalarının güvenirlik kriterleriyle değerlendirilmesi, kaba hataların tespitinin yapılması ve uyuşumsuz ölçülerin incelenmesi konularını ele almıştır. Kaba hatalar, ölçü sırasında yapılan belirgin hatalar olup ayıklanabilirken; uyuşumsuz ölçüler, model veya veri ile tutarsızlık gösteren, her zaman kaba hata içermeyen ölçülerdir. Çalışmada bu iki kavram birbirinden ayrılarak ele alınmış ve jeodezik ağların kalitesini belirlemek için duyarlılık ölçütlerinin önemine dikkat çekilmiştir. Papo [12], ağ geometrisinin noktaların konum doğruluğu üzerindeki etkisini inceleyerek, hata ile güven elipsoidi elemanlarının yönü ve büyüklüğünün noktalar arasındaki mesafeye bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Avrıca. serbest ağ dengelemesinde konum doğruluğunun, referans (datum) noktalarının ağ içerisindeki dağılımıyla doğrudan ilişkili olduğunu vurgulamıştır.

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nihaltekin@erciyes.edu.tr (N. Tekin Ünlütürk) Geliş / Received: 28.02.2025 Kabul / Accepted: 27.03.2025 Yayımlanma / Published: 15.04.2025 doi: 10.28948/ngumuh.1648138

Bu bağlamda çalışmada, jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiş ve seçilen modelin duyarlılık analizine katkısı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla çalışmanın temel amacı, jeodezik ağlar için seçilen fonksiyonel ve stokastik modelin duyarlılık ölçütlerine etkilerini belirlemektir. Ayrıca, bu analizler sonucunda duyarlılık ölçütlerinin farklı parametrelere göre nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Jeodezik ağ ve veri seti

Çalışmanın amacı, farklı dengeleme yöntemlerinin 2boyutlu jeodezik ağın doğruluğu ve güvenilirliği üzerindeki etkilerini karşılaştırılması sonucu en uygun yöntemin belirlenmesidir. Kullanılan jeodezik ağ, kenar-doğrultu ölçüleri, yalnızca doğrultu ölçüleri (kısa oklar) ya da yalnızca kenar ölçülerini (kısa çizgiler) içermektedir. Şekil 1, çalışma kapsamında kullanılan jeodezik ağ ve noktalarını göstermektedir.



Şekil 1. Jeodezik ağ

Analizlerin tutarlı bir referans sisteminde gerçekleştirilmesi amacıyla veriler 3° dilim genişlikli Gauss-Krüger projeksiyon sistemine dönüştürülmüştür. Bu sistemde, Y_G (sağa) değeri 500.000 çıkarılarak hesaplanmış, X_G (yukarı) değeri ise kuzey yönlü mesafeyi temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Toplam 83 ölçünün ilk 54 tanesi doğrultu ölçüsü, 55-83 arasındaki ölçüler ise kenar ölçüsü olup, bu indirgeme işlemi yatay konum hatalarının minimize edilmesi ve jeodezik hesaplamaların ortak bir koordinat sisteminde gerçekleştirilmesi için tercih edilmiştir.

Kullanılan fonksiyonel ve stokastik modelin elde edilen sonuçlara etkisini karşılaştırmak amacıyla dört farklı dengeleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemler;

- I nolu yöntem: *Tüm iz minimum*
- II nolu yöntem: Kısmi iz minimum
- III nolu yöntem: Zorlamasız klasik dengeleme
- IV nolu yöntem: Dayalı dengeleme

olup ağın hata dağılımı ve güvenilirliği açısından en uygun modelleme stratejisini belirlemek için seçilmiştir. Tüm doğrultular için aynı doğrultu standart sapması σ_r kullanıldığı için, doğrultu ölçülerinin ağırlıkları 1 olarak kabul edilmiştir. Ağırlıklar, ölçülerin duyarlılığı ile ters orantılı olup, kenar ölçülerinin ağırlıkları alet duyarlılığına bağlı olarak 5 mm + 2 ppm şeklinde hesaplanmıştır. Bu hesaplama yaklaşımı, stokastik modelin oluşturulmasında temel alınmıştır. Ayrıca, I nolu yöntemde kenar-doğrultu ağında stokastik modelin duyarlılık kriterleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla birim matris kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, redündans değerleri ile iç ve dış güvenilirlik kriterleri analiz edilmiştir.

2.2 Jeodezik ölçülerin analizi

Jeodezik hesaplamalarda doğrudan ölçülemeyen büyüklükler, dolaylı ölçüler ile belirlenmektedir. Eğer ölçü sayısı bilinmeyenlerden fazlaysa, *En Küçük Kareler Yöntemi* kullanılarak bilinmeyenlerin en uygun değerleri hesaplanmaktadır. Bu süreçte, noktaların koordinatları (x, y), doğrultu ve uzunluk ölçüleri kullanılarak dolaylı olarak belirlenmekte, sistematik hatalar minimize edilmekte ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

Jeodezik ağların dengeleme süreci, matematiksel modellere dayanmakta olup, ölçüler n boyutlu rassal bir vektörün gerçekleşmiş değerleri olarak değerlendirilmektedir. Bu vektörün n boyutlu normal dağılım gösterdiği varsayılmaktadır. Ölçülerin dengelemesinde kullanılan matematiksel model iki temel bileşenden oluşmaktadır: fonksiyonel model ve stokastik model [13].

Jeodezik ağları dengeleme işlemlerinde fonksiyonel model, ölçüler ile bilinmeyen değişkenler arasındaki matematiksel bağıntıları tanımlamaktadır. Bu model, ölçülerin geometrik ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak şekillenmekte olup, genellikle doğrusal olmayan yapıda olduğu için Taylor açılımı ile doğrusal forma getirilmektedir.

$$l + v = Ax \tag{1}$$

Denklem (1)'de, ölçülere uygulanacak düzeltmeleri içeren v vektörü, kesin değerleri elde etmek amacıyla ölçülere getirilecek düzeltmeleri ifade etmektedir. l, küçültülmüş ölçüler vektörü olarak tanımlanırken, Adüzeltme denklemlerine ait katsayılar matrisini, x ise bilinmeyenler vektörünü ifade etmekte olup, fonsiyonel modelin temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

Matematiksel modelin ikinci bileşeni olan stokastik model, ölçülerin fiziksel olarak modellenemeyen bilesenlerini, bağımlılıklarını ve duyarlılıklarını tanımlamaktadır. Ölçülerin hata yapısını ve güvenilirliğini belirleyen bu model, varyans-kovaryans matrisi ile ifade edilir ve hata bileşenlerinin etkisini en aza indirerek ölçülerin güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynar. [13,14]. Stokastik modelin temel bileşeni olan ağırlık matrisi P, ölçülerin doğruluk seviyelerini ve hata bileşenlerini yönetmektedir. Fonksiyonel ve stokastik modeller birlikte kullanılarak, sistemin genel matematiksel modeli olusturulmaktadır.

Dengeleme işlemi, ölçü düzeltmelerinin ağırlıklı toplamının minimum olması ($v^T P v = min$) koşulu altında gerçekleştirilmektedir. Bu optimizasyon prensibi doğrultusunda normal denklemler oluşturularak bilinmeyenler kestirilmektedir.

$$Nx - n = 0$$

$$x = N^{-1}n = Q_{xx}n$$
 (2)

Denklem (2)'de:

 $N = A^T P A$: Normal denklem katsayılar matrisi,

 $n = A^T P l$: Yalın terim vektörü ve

 $Q_{xx} = N^{-1}$: Bilinmeyenlere ilişkin kofaktör matrisidir.

Bu eşitliklerde, *P* ağırlık matrisini ifade etmektedir. Bu denklemler, jeodezik ağlarda dolaylı ölçüler dengelemesini gerçekleştirmek için kullanılan temel matematiksel ifadeleri sunmaktadır. Yöntemin hassasiyeti, ölçülerin ağırlıkları, ağın geometrik yapısı ve ölçü duyarlılığı ile doğrudan ilişkilidir.

2.3 Serbest ağ dengelemesi

Serbest ağlar, belirli bir koordinat sistemine doğrudan bağlı olmayan ve ölçülerden bağımsız olarak konumları belirlenemeyen jeodezik ağlardır [1,15-17]. Serbest ağ dengelemesi, minimum maliyetle yeterli doğruluğun sağlanması amacıyla optimizasyon süreçlerini içerir. Bu süreçte, nokta yerleri belirlenir, ölçü doğrulukları analiz edilir ve Gauss-Markoff modeli kullanılarak ağın duyarlılık ve güvenilirlik değerlendirmesi yapılır [18]. Yatay kontrol ağları genellikle sabit ve yöneltme noktalarından oluşur; sabit noktalar referans olarak kullanılırken, yöneltme noktaları ağın yöneltilmesi için tesis edilir, ancak günümüzde pek tercih edilmemektedir. Ağın geometrik yapısı, ölçülerin güvenilirliğini artıracak şekilde planlanmalı ve kaba ölçü hatalarına karşı duyarlı olmalıdır [19]. Sabit noktalardan uzaklaştıkça nokta konum hataları artmakta ve doğruluk seviyesi değişmektedir. Bu nedenle, serbest ağlarda datum seçimi önemli bir unsurdur.

Serbest ağlarda, ağdaki tüm noktalar bilinmeyen kabul edildiğinden normal denklem katsayılar matrisi tekillik göstermektedir. Determinantı sıfır olan bu matrisin rank bozukluğu (defekt sayısı), serbest ağ dengelemesine ait serbest datum parametrelerinin (d) sayısına eşittir. Eğer bilinmeyenlerin sayısı u ile ifade edilirse, normal denklemler katsayılar matrisinin rankı Denklem (3)'te gösterilmiştir.

$$rank(N) = u - d \tag{3}$$

Serbest ağ dengelemesinde oluşan rank bozukluğunu giderebilmek için farklı dengeleme yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler;

- 1. Zorlamasız klasik dengeleme
- 2. Tüm iz minimum yöntemi ile dengeleme
- 3. Kısmi iz minimum yöntemi ile dengeleme

Bu yöntemler, *S* dönüşümü kullanılarak birbirlerine dönüştürülebilir ve farklı modelleme yaklaşımlarına uygun hale getirilebilir. Serbest ağ dengelemesi, jeodezik hesaplamalarda model hassasiyetini artırmak ve ölçü hatalarını minimize etmek için önemli bir yaklaşımdır [1,20]. Bu çerçevede dengeleme yöntemlerini ele almak gerekirse:

1. Zorlamasız Klasik Dengeleme: Normal denklem katsayılar matrisi tam sıralı olduğunda, yani determinantı sıfırdan farklı olduğunda uygulanan bir dengeleme tekniğidir. Bu koşul sağlandığında, dengeleme işlemi ek bir datum kısıtlamasına ihtiyaç duymadan gerçekleştirilebilir. Bu yöntemde, tüm noktalar bilinmeyen kabul edilmektedir. Oluşturulan düzeltme denklemlerinde tüm noktaların bilinmeyen olduğu katsayılar matrisi A_g 'den, defekt sayısı kadar sütunun çıkarılması veya belirli koordinat bilinmeyenlerinin sabit kabul edilmesiyle rank bozukluğu giderilmektedir. Böylece, normal denklem katsayılar matrisi, $N = A^T P A$ ifadesiyle determinantı sıfırdan farklı olan regüler bir matrise dönüştürülür [21].

2. Tüm İz Minimum Yöntemi ile Dengeleme: Bu yöntem, jeodezik ağda tüm noktaların bilinmeyen olarak tanımlanmasını ve ağın datum tanımına katkıda bulunmasını sağlayarak, ölçü duyarlılığını artırmaya yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Yöntemin temel prensibi, tüm noktaları içeren küçültülmüş koordinat bilinmeyenleri ile ağırlık katsayıları matrisinin (kofaktör) izinin en küçük değere ulaşmasını sağlamaktır. Analizlerde, doğrusal fonksiyonel model; düzeltme denklemleri ile koordinat bilinmeyenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan koşul denklemlerinden oluşmaktadır.

$$v = A_g x_g - l$$

$$G^T x_g = 0$$
(4)

Denklem (4)'te x_g , koordinat bilinmeyenleri vektörünü ve ağın tüm noktalarını ifade etmektedir. Bu yöntemde ağın datumu, G^T matrisi ile tanımlanmakta ve tüm noktalar datum tanımına dahil edilmektedir. Bu yöntemin çözümü için, ağırlık katsayıları matrisi Q_g normal denklem katsayılar matrisi $N_g = A_g^T P A_g$ üzerinden Denklem (5)'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_g = (N_g + G^T G)^{-1} - G^T (G^T G G^T G)^{-1} G$$
(5)

Elde edilen Q_g kullanılarak koordinat bilinmeyenleri vektörü Denklem (6)'da gösterildiği gibi hesaplanır:

$$x_g = Q_g A_g^T P l \tag{6}$$

Bu yöntemin temel avantajlarından biri, bilinmeyen koordinatların tamamının hata dağılımına eşit şekilde dahil edilmesidir. Özellikle deformasyon analizlerinde güvenilir sonuçların elde edilmesi için önemli bir yaklaşımdır. Bu yöntemde, koordinat bilinmeyenlerinin normu ve ağırlık katsayıları matrisinin izi minimize edilmektedir:

$$iz(Q_g) = min, x_g^T x_g = min$$
⁽⁷⁾

Bu özellik sayesinde, toplam koordinat varyanslarının toplamı en küçük değeri almakta ve nokta konum hataları homojen şekilde dağılmaktadır (Denklem 7).

Sonuç olarak, tüm iz minimum yöntemi, bilinmeyen koordinatlar için hata dağılımını homojen hale getiren ve ölçü doğruluğu üzerinde dış etkileri azaltan etkili bir dengeleme yöntemidir.

3. Kısmi İz Minimum Yöntemi ile Dengeleme: Bu dengeleme yöntemi, jeodezik ağdaki tüm noktaların koordinat bilinmeyenlerinin yalnızca bir kısmının datum tanımına katkıda bulunmasını sağlayan bir dengeleme yöntemidir [1]. Bu yöntemde, koordinat bilinmeyenlerinin normu ve ağırlık katsayıları matrisinin ilgili alt matrisinin izi minimize edilmektedir. Böylece, ağın yalnızca belirli noktalarının datum tanımına dahil edilmesiyle, diğer noktalar bağımsız bir şekilde modellenmektedir. Tüm iz minimum yönteminde ağın tamamı datum tanımına dahil edilirken, kısmi iz minimum yönteminde belirli noktalar bu tanıma dahil edilmemektedir. Bu fark, dengeleme sürecinde doğrusallastırılmış fonksiyonel kullanılan modelin yapılandırılmasını değiştirmektedir. Doğrusallaştırılmış model, tüm noktalara ait koordinat bilinmeyenlerini içeren G matrisinden dönüştürülen B matrisinin kullanımıyla oluşturulmaktadır. Bu durumda, datum tanımlamayan noktalar için denklemler sıfır kabul edilerek model sadeleştirilmektedir. Dengeleme modelinde kullanılan temel eşitlikler Denklem (8) ve Denklem (9)'da gösterilmiştir.

$$v = A_g x_i - l$$

$$B_i^T x_i = 0$$
(8)

$$Q_{i} = (N_{g} + B_{i}B_{i}^{T})^{-1} - G(G^{T}B_{i}B_{i}^{T}G)^{-1}G^{T}$$

$$x_{i} = Q_{i}A_{g}^{T}Pl$$
(9)

2.4 Hata ve güven elipsleri

Hata ve güven elipsleri, jeodezik ölçülerde doğruluğun ve güvenilirliğin görsel olarak değerlendirilmesini sağlayan önemli araçlardır (Şekil 2). Hata elipsi, ölçülerin olası hata aralığını iki boyutlu bir düzlemde gösterirken, güven elipsi bu hataların belirli bir güven aralığında meydana gelme olasılığını ifade etmektedir.



Şekil 2. Hata ve güven elipsi [22]

Hata elipsinin dönüklük açısı θ , Denklem (10)'daki gibi

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2Q_{xy}}{Q_{xx} - Q_{yy}}\right) \tag{10}$$

hesaplanmaktadır. Burada, Q_{xx} , Q_{xy} ve Q_{yy} bir noktanın koordinat bileşenlerine ilişkin kofaktör değerleridir. Elipsin eksen uzunluklarını belirlemek için kullanılan büyüklük Wolup, Denklem (11)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$W = \sqrt{(Q_{xx} - Q_{yy})^2 + 4Q_{xy}^2}$$
(11)

 Q_{xx} matrisinin öz değerleri, Denklem (12)'deki gibi,

$$\lambda_{1} = \frac{Q_{xx} + Q_{yy} + W}{2}$$

$$\lambda_{2} = \frac{Q_{xx} + Q_{yy} - W}{2}$$
(12)

 $s_0 = \sqrt{[Pvv]/f}$ birim ağırlıklı ölçünün standart sapması ise [Pvv] düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamı ve *f* serbestlik derecesi kullanılarak belirlenir.

$$A = s_0 \sqrt{\lambda_1}, \qquad B = s_0 \sqrt{\lambda_2} \tag{13}$$

Hata elipsinin eksenleri A ve B olarak belirlenirken (Denklem 13), güven elipsinin eksenleri a ve b ise bu değerlere bağlı olarak hesaplanmaktadır.

Güven elipsi, hata elipsinin yarı eksenlerinin anlamlılık düzeyine (α) bağlı olarak yeniden boyutlandırılmasıyla elde edilmektedir. Genellikle $\alpha = 0.05$ veya $\alpha = 0.01$ gibi değerler kullanılmaktadır. Güven elipsinin yarı eksenleri Denklem (14)'teki gibi hesaplanır:

$$a = \gamma A$$
, $b = \gamma B$, $\gamma = \sqrt{F_{2,f,1-\alpha}}$ (14)

Burada, $F_{2,f,1-\alpha}$, F dağılımının belirlenen anlamlılık düzeyi ve serbestlik derecesine bağlı olarak güven sınırını temsil etmektedir. Bu sınır, istatistiksel olarak hipotez testlerinde hata olasılığını kontrol etmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Üç boyutlu ağlarda bu formülde yer alan 2 yerine 3 değeri kullanılmaktadır. Güven elipsleri, ölçü sonuçlarının belirli bir güven aralığında ne kadar güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu sayede, jeodezik ağların doğruluğu ve hassasiyeti hakkında daha net bir fikir elde edilmektedir.

2.5 Güvenilirlik ölçütü

Güvenilirlik ölçütü, jeodezik ağlarda ölçü hatalarının denetlenebilirliğini belirleyen önemli bir parametredir. Bu ölçüt, özellikle kaba hataların tespit edilmesine olanak sağlamakta ve bir ölçünün ne kadar kontrol edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Jeodezik ağ içerisinde, *n* sayıda ölçü için aynı sayıda güvenilirlik ölçütü hesaplanmaktadır (Denklem 15).

$$iz(Q_{vv}P) = iz(E) - iz(\bar{Q}P) = n - u + d = r$$
(15)

Fazla ölçü payları r_i Denklem (16)'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$(Q_{vv}P) = Q_{vv}P_i = 1 - \bar{Q}_{ii}P_i = r_i = n - u + d$$
(16)

Burada *r*, fazla ölçü sayısını (kısmi redündans payı) veya serbestlik derecesini, Q_{vv} düzeltmelerin kofaktör matrisini, $\bar{Q}_{ii} = (AQ_g A^T)_{ii}$ dengeli *i* ölçüsüne ilişkin kofaktör değerini göstermektedir.

Redündans payı, bir ölçünün hatalarının ne ölçüde denetlenebileceğini belirlemektedir. Eğer r_i sıfıra eşit veya çok küçükse, ilgili ölçünün hatası düzeltmelere

yansımamakta ve hata doğrudan ortaya çıkarılamamaktadır. Bu durumda, ölçü güvenilir olmaktan çıkmaktadır. Genel olarak, $r_i < 0.10$ olan ölçüler zayıf kontrollü, $r_i > 0.30$ olanlar ise iyi kontrol edilen ölçülerdir. Fazla ölçü paylarının dengeli ve yüksek olması ideal kabul edilmektedir.

Ayrıca öngörülen test gücüne bağlı olarak hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceği, iç güvenilirlik ölçütüyle değerlendirilirken; tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına olan etkileri dış güvenilirlik ölçütü ile belirlenmektedir. Tüm ölçülerin eşit düzeyde kontrol edilebilmesi, yüksek bir iç güvenilirlik sağlarken, tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçları üzerindeki etkilerinin sınırlı olması ise dış güvenilirliğin güçlü olduğuna işaret etmektedir [1,23,24].

2.6 Uyuşumsuz ölçülerin tespiti

Jeodezik ölçüler sırasında, belirli bir ölçünün güvenilirliği, fazla ölçü payı ile değerlendirilmektedir. Ölçü verilerinde kaba hataların tespit edilmesi ve ayıklanması, dengeleme sonuçlarının doğruluğunu korumak ve ölçü hatalarının olumsuz etkilerini en aza indirmek açısından kritik öneme sahiptir. Bir ölçü kaba hata içeriyorsa, bu hatanın belirlenebilmesi için fazla ölçü payının yüksek olması gerekmektedir. Fazla ölçü payının düşük olması durumunda, ölçüdeki hata düzeltmelere yeterince yansımamakta ve hatalı ölçünün tespiti güçleşmektedir.

Dengeleme sürecinde, ölçülerin değerlendirilmesi yalnızca bilinen parametrelerle sınırlı kalmayıp, diğer ölçüleri etkileyen faktörler de dikkate alınarak gerçekleştirilir. Bu sayede, matematiksel modelin ölçülerin geometrik ve fiziksel özellikleriyle en iyi uyumu sağlaması amaçlanmaktadır. Ancak, ölçüleri etkileyen bazı parametrelerin tam olarak anlaşılamaması veya göz ardı edilmesi model hatalarına yol açabilmektedir. Bu hatalar, dengeleme sonuçlarını doğrudan etkileyerek jeodezik ağda bozulmalara neden olabilir. Bu sebeple, istatistiksel testler kullanılarak modelin doğruluğu değerlendirilmeli ve eğer uyuşumsuz ölçüler tespit edilirse bunlar ayıklanmalıdır [13].

Hatalara karşı ölçülerin kontrol edilebilirliği ve istatistiksel yöntemler ile ortaya çıkarılamayan hataların dengeleme sonuçlarına etkileri, güvenilirlik ölçütleri yardımıyla belirlenmektedir. Bu bağlamda, kaba hataların analizinde, doğrusal hipotez testine dayalı olarak standartlaştırılmış düzeltme \tilde{v}_i kullanılmaktadır. Standartlaştırılmış düzeltme, ölçünün düzeltme değerinin kendi standart sapmasına oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklem 17):

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_{\tilde{\mathbf{v}}_i}} \tag{17}$$

Ölçülerin tutarlılığını değerlendirmek amacıyla çeşitli test yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında Baarda'nın *Data-Snooping testi*, *Pope testi* ve *t-testi* en yaygın kullanılanlar arasındadır. Söz konusu testler, önsel (apriori) ve sonsal (aposteriori) varyans faktörlerine dayalı çeşitli analizleri içermekte olup, aşağıda verilen formüller ile tanımlanmaktadır [13]. *Baarda testi:* σ_0^2 önsel varyans olup, \tilde{v}_i değerlerinin standart normal dağılım N(0,1) koşullarını sağlayıp sağlamadığı değerlendirilir (Denklem 18).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{\nu_i}{\sigma_0 \sqrt{Q_{\nu_i \nu_i}}} \tag{18}$$

Pope testi: s_0^2 sonsal varyans olup \tilde{v}_i değeri, Tau (τ) dağılımı kullanılarak analiz edilmektedir (Denklem 19).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_0 \sqrt{Q_{v_i v_i}}} \tag{19}$$

*t-testi:*İlgili ölçü çıkarıldıktan sonra kalan ölçülerin dengelemesi ile s_{0i}^2 sonsal varyans elde edilir. Bu varyansa bağlı olarak, \tilde{v}_i değerleri *t*-dağılımı temel alınarak istatistiksel olarak incelenmektedir (Denklem 20).

$$\tilde{\mathbf{v}}_i = \frac{v_i}{s_{0i}\sqrt{Q_{v_iv_i}}} \tag{20}$$

Bu testlerin uygulanması sonucunda elde edilen test büyüklükleri Denklem (21)'de gösterilmiştir. Hesaplanan test büyüklükleri, belirlenen anlamlılık düzeyi α_0 ve ilgili serbestlik derecesi *f* kullanılarak elde edilen kritik değerlerle karşılaştırılır. Bu kritik değerler, standart normal dağılım (*u*), Tau dağılımı (τ) ve Student's t-dağılımı (*t*) çizelgelerinden de alınabilir. Bir ölçü hatasının varlığına karar verebilmek için, hesaplanan test büyüklüğünün tablo değerinden büyük olması gerekmektedir [6].

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{i_{max,B}} &> u_{1-\alpha_0/2} \\ \tilde{v}_{i_{max,P}} &> \tau_{f,1-\alpha_0/2} \\ \tilde{v}_{i_{max,t}} &> t_{f-1,1-\alpha_0/2} \end{aligned}$$
 (21)

2.7 İç ve dış güvenirlik

Ölçülerde meydana gelebilecek kaba hatalar kesin olarak tespit edilemediğinden, bu hataların dengeleme modelinde doğrudan dikkate alınması mümkün değildir. Ancak, en küçük hata sınır değeri hesaplanarak bu hataların etkileri belirli bir seviyede kontrol altına alınabilmektedir [3-5,25]. İstatistiksel kestirim açısından, standartlaştırılmış düzeltme $v_{i,1}$ yerine istatistiksel kestirim değeri δ_0 kullanıldığında, ∇l_i kaba hatalar belirlenebilir ve $\nabla_0 l_i$ hata sınır değerine dönüşür. Denklem (22)'de r_i büyüklüğü ağın geometrisini tanımlamakta olup, *i*. ölçüdeki kaba hataların v_i düzeltmesi içindeki payını göstermektedir [13]. Burada s_i ölçülerin standart sapmalarını göstermektedir.

$$\nabla l_i = \frac{s_{i*\delta_0}}{\sqrt{r_i}} \tag{22}$$

Dışmerkezlik parametresi δ_0 , α_0 yanılsama olasılığı ve Υ_0 test gücü arasındaki foksiyonel ilişkiyi ifade etmektedir. δ_0 , standart normal dağılımın $u_{1-\alpha_{0/2}}$ ve $u_{1-\Upsilon_0}$ belirli sınır değerleri kullanılarak $\delta_0 = (u_{1-\alpha_{0/2}} - u_{1-\Upsilon_0})$ biçiminde hesaplanabilir [3-5,26]. Örneğin, $\Upsilon_0 = 0.80$ ve $\alpha_0 = 0.01$ için $\delta_0 = 3.42$, aynı Υ_0 değeri ve $\alpha_0 = 0.001$ değeri için $\delta_0 = 4.13$ olur.

İç güvenilirlik, ölçülerin kaba hatalara karşı ne derece kontrol edilebildiğini göstermektedir. İç güvenilirliğin yüksek olması için hata sınırlarının küçük ve ölçülerin hata kontrol edilebilirliğinin eşit olması beklenir. Bu doğrultuda, ölçülerde tespit edilmesi mümkün olan hata sınır değerleri, iç güvenilirlik ölçütleri olarak tanımlanmaktadır.

Ağın dış güvenilirliği, ortaya çıkarılamayan ölçü hatalarının dengeleme sonuçlarına olan etkileri ile tanımlanmakta ve ağın doğruluk ile güvenilirlik açısından değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Tespit edilemeyen kaba hataların nokta koordinatları veya bunların fonksiyonları üzerindeki etkisi, ağın güvenilirlik seviyesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Hata sınır değerinin dengeleme sonuçları üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olması, ağın dış güvenilirliğinin sağlandığını göstermektedir.

Hata sınır değerinin, tüm bilinmeyenler üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Koordinatlar arasındaki en büyük etkiye sahip olan değer, dış güvenilirlik ölçütü olarak değerlendirilir. Hata sınırının büyük olmasına rağmen, etki faktörünün düşük olması, ağın güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, dış güvenilirlik analizinde ölçü hatalarının etkisinin en aza indirilmesi ve dengeleme sonuçlarının kararlılığının sağlanması büyük önem taşımaktadır.

$$\bar{\delta}_{0,i} = \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} \delta_0^* \mathbf{s}_i \tag{23}$$

Denklem (23)'te $\overline{\delta}_{0,i}$, etki faktörü veya dışmerkezlik parametresi olarak adlandırılır ve datumdan bağımsız bir dış güvenirlik ölçütüdür [13]. Güvenilir bir jeodezik ağda, etki faktörünün olabildiğince düşük tutulması amaçlanmaktadır. Böylece, tespit edilemeyen ölçü hatalarının dengeleme sonuçları üzerindeki etkisi en aza indirgenmiş olur.

İç güvenilirlik, belirli bir test gücü çerçevesinde hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceğini ifade ederken, dış güvenilirlik ise tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına olan etkisini değerlendirir. Yüksek iç güvenilirlik, tüm ölçülerin eşit derecede kontrol edilebilmesini sağlarken, yüksek dış güvenilirlik, belirlenemeyen hataların sonuçlar üzerindeki etkisinin minimal olmasını gerektirir [3-5,15,23,24].

3 Bulgular ve tartışma

3.1 I nolu yöntem (Tüm iz minimum)

Bu yaklaşımda, ağdaki tüm noktalar bilinmeyen olarak tanımlanmıştır. Şekil 3'te, Pope test yöntemi kullanılarak kenar-doğrultu ağı, doğrultu ağı ve kenar ağı için uyuşumsuz ölçü araştırması gerçekleştirilmiştir. Pope test yöntemine göre, bir ölçünün uyuşumsuz olarak kabul edilebilmesi için standartlaştırılmış düzeltme değeri \tilde{v}_i , kritik sınır değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}}$ 'den büyük olmalıdır. Bu koşul sağlandığında, standartlaştırılmış düzeltme değeri en büyük olan ölçü, uyuşumsuz ölçü olarak değerlendirilir. Buna göre, kenardoğrultu ağı için yapılan analizde, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} =$ 3.27 esas alındığında, herhangi bir uyuşumsuz ölçü tespit edilmemiştir. Doğrultu ağı için yapılan değerlendirmede, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} = 2.97$ 'ye göre uyuşumsuz ölçü tespit edilmemiştir. Kenar ağı için gerçekleştirilen incelemede ise, ölçüt değeri $\tau_{f,1-\alpha_{0/2}} = 2.30$ olup, herhangi bir uyuşumsuz ölçüye rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, tüm ağ türleri için ölçülerin istatistiksel olarak tutarlı olduğunu göstermektedir [27].



Şekil 3. I nolu yöntem için uyuşumsuz ölçü testi sonucu

Tablo 1, farklı ağ türlerinde gerçekleştirilen ölçülere ait maksimum, minimum ve ortalama standart sapma değerlerini göstermektedir. Sonuçlar, doğrultu ağının en düşük standart sapma ile en kararlı ölçü hassasiyetine sahip olduğunu, kenar ağının ise en yüksek hata değişkenliği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kenar-doğrultu ağı, maksimum standart sapma değeri yüksek olmasına rağmen, ortalama hata seviyesi açısından daha dengeli bir yapı sergilemektedir.

Tablo 1. I nolu yönteme göre ölçülerin standart sapma değerleri

Ağ Türü	$\sigma_{maks}(\text{cm/mgon})$	$\sigma_{ort}(cm/mgon)$	$\sigma_{min}(cm/mgon)$
Kenar-Doğrultu	6.29	0.50	0.40
Doğrultu	0.16	0.14	0.11
Kenar	4.89	1.95	0.02

Kenar ağına ait düzeltmelerin standart sapmaları incelendiğinde, serbest dengeleme yöntemleri arasında teorik olarak eşit değerler elde edilmesi beklenirken belirli farklılıklar tespit edilmiştir. Şekil 4'te II ve III numaralı yöntemlerle hesaplanan dengeli ölçülerin standart sapma değerleri aynı kalırken, I numaralı yöntemde bu değerler ortalama 0.20 cm daha düşük olarak hesaplanmıştır. Bu durum, tüm iz minimum yönteminin hata yayılımını daha etkin bir şekilde optimize ederek standart sapmaları düşürdüğünü göstermektedir. Diğer yöntemlerde ise, standart sapmaların aynı kalması veya daha yüksek olması, modelin hata kontrol mekanizmasının farklı işleyişinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. Kenar ağı farklı yöntemler için dengeli ölçülerin standart sapmaları

Serbest dengeleme analizlerinde, kenar-doğrultu ve doğrultu ağı ölçüleri; kenar-doğrultu ve kenar ağına ilişkin redündans değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Kenardoğrultu ağı ve dengeli doğrultu ağı ölçüleri için redündans değerleri, sırasıyla, 0.50-0.90, ve 0.40-0.80 aralığındadır. Kenar-doğrultu ağı ve kenar ağı ölçüleri için redündans değerleri, sırasıyla 0.40-0.80 ve 0.10-0.50 seviyelerine düşmektedir. Bu sonuçlar, kenar ağının daha düşük kontrol edilebilirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, bazı ölçülerin redündans değerlerinin sıfıra yaklaşması, bu ölçülerin kaba hatalara karşı kontrol gücünün düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Dengeli ölçülerin redündans değerleri

Hata tespit kapasitesi ve hata yayılımı açısından en uygun senaryonun belirlenmesi amacıyla üç farklı dışmerkezlik parametresi senaryosu değerlendirilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7, farklı dışmerkezlik parametrelerine bağlı olarak iç ve dış güvenirlik değerlerindeki değişimi göstererek, hata tespit kapasitesi ve hata yayılımı bakımından en güvenilir senaryonun belirlenmesine katkı sağlamaktadır. 4.27 değeri, hata tespit kapasitesini artıran ve hata yayılımını optimize eden en uygun dışmerkezlik parametresi olarak belirlenmiş olup, literatürde yaygın olarak kullanılan Υ_0 ve α_0 değerleri doğrultusunda hesaplanmıştır. Yapılan analizler, bu değerin ağın iç ve dış güvenirlik performansını en iyi şekilde sağladığını göstermektedir.

İç güvenirlik açısından, 4.27 senaryosu en yüksek hata tespit edilebilirliğini sağlarken, 3.42 senaryosu daha düşük güvenirlik sergilemektedir. Özellikle 60-80 numaralı ölçüler arasında iç güvenirlik değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dış güvenirlik analizinde ise, 4.27 senaryosu hata yayılımı açısından en yüksek değerlere sahip olup, 40 numaralı ölçüden itibaren dış güvenirlikte belirgin bir artış görülmektedir. Buna karşın 3.42 senaryosu, hata yayılımını daha az etkileyerek daha düşük dış güvenirlik değerleri sergilemektedir.

Genel olarak, 4.27 senaryosu hem iç hem de dış güvenirlik açısından en güvenilir seçenek olarak öne çıkmakta olup, hata tespit kapasitesini artırmak ve hata yayılımını kontrol altına almak amacıyla detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, çalışmanın geri kalanındaki analizler 4.27 etki faktörüne dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerin tercih edilme nedeni, ağın hatalara karşı duyarlılığını en iyi şekilde yansıtmasıdır. Yapılan analizler, bu etki faktörünün iç ve dış güvenirlik değerlerini optimize ettiğini ve hata tespit kapasitesini en uygun seviyeye getirdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 8'de, I numaralı yönteme ait her bir ölçü grubunun x-y koordinat düzlemindeki nokta konum hataları görselleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, kenar-doğrultu ölçüleri kullanıldığında hata miktarı ortalama 3.40 cm, doğrultu ölçüleri kullanıldığında ortalama 2 cm, kenar ölçüleri kullanıldığında ise ortalama 6.40 cm olarak hesaplanmıştır. Doğrultu ölçülerinin hata miktarının daha düşük olması, bu ölçü grubunun daha yüksek duyarlılığa sahip olduğunu ve ölçü hassasiyetinin arttığını göstermektedir.

Noktalara ait hata ile güven elipsleri, seçilen datum noktalarına bağlı olarak belirlenmiştir. Hata ve güven elipslerine ilişkin eksen uzunluklarının değerlendirilmesi amacıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te farklı parametreler sunulmuştur.

Tablo 2'de, hata ve güven elipslerine ait maksimum eksen uzunlukları verilmiştir. Bu kapsamda, max(A) ve max(B), hata elipslerinin sırasıyla büyük ve küçük eksenlerindeki maksimum hata değerlerini ifade etmekte olup, ölçü hatalarının en büyük olduğu yönleri göstermektedir. Benzer şekilde, max(a) ve max(b) parametreleri, güven elipslerinin büyük ve küçük eksenlerindeki maksimum güvenlik değerlerini temsil etmekte ve ölçülerin en az doğruluk gösterdiği durumları yansıtmaktadır.

Tablo 3'te ise hata ve güven elipslerine ilişkin minimum eksen uzunlukları sunulmuştur. min(A) ve min(B), hata elipslerinin büyük ve küçük eksenlerindeki minimum hata değerlerini ifade ederek, hata dağılımının en düşük olduğu yönleri göstermektedir. min(a) ve min(b) ise güven elipslerinin büyük ve küçük eksenlerine ait minimum güvenlik değerleri olup, ölçülerin en yüksek doğruluk seviyesine ulaştığı durumları belirlemektedir. Elde edilen sonuçlar, doğrultu ağının hata elipsi eksen uzunluklarını minimize ederek hata dağılımını en aza indirdiğini ve güven elipslerinde daha düşük eksen uzunlukları sağlayarak ölçülerde en yüksek doğruluk seviyesinin elde edilmesine katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, kenar ağı, hata elipslerinde en büyük eksen uzunluklarını sergileyerek hata dağılımının daha geniş olduğunu göstermekte ve güven elipslerinde daha düşük hassasiyet sunarak ölçü doğruluğunun görece düşük seviyelerde gerçekleştiğini işaret etmektedir.



Şekil 6. Kenar-doğrultu ağına ait üç farklı etki yöntemiyle iç güvenilirlik karşılaştırması



Şekil 7. Kenar-doğrultu ağına ait üç farklı etki yöntemiyle dış güvenilirlik karşılaştırması



Şekil 8. I nolu yöntem nokta konum hataları

Tablo 2. I nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	3.75	3.21	9.48	8.12
Doğrultu	2.49	1.62	6.60	4.31
Kenar	8.19	4.52	26.28	14.49

Tablo 3. I nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	1.79	3.21	4.52	3.74
Doğrultu	1.07	1.62	2.84	1.68
Kenar	4.02	4.52	12.90	8.79

Ölçülerin güvenilirliğini belirleyen ağırlık matrisi, hata seviyelerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. I nolu yöntemde, tüm doğrultular için aynı σ_r değeri esas alınarak doğrultu ölçülerinin ağırlıkları 1 olarak kabul edilmiş, kenar ölçülerinin ağırlıkları ise alet duyarlılığı doğrultusunda 5 mm + 2 ppm olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada farklı stokastik modellerin güvenilirlik ölçütleri üzerindeki etkisi, kenar-doğrultu ağı kullanılarak incelenmiştir. İncelemede *P* matrisi ağırlık matrisini, *E* matrisi ise birim matrisi temsil etmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizlerin sonuçları Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 9. Farklı stokastik modellere göre redündans değerleri

Şekil 9 incelendiğinde, stokastik model olarak birim matris kullanıldığında, doğrultu ölçülerinin redündanslarının bire yakın, kenar ölçülerinin ise sıfıra yakın olduğu belirlenmiştir. Redündans değerlerinin bu dağılımı, stokastik model seçiminin güvenilirlik analizleri ve hata tespit edilebilirliği üzerindeki doğrudan etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Farklı stokastik modellere göre iç güvenilirlik değerleri

Sekil 10'da iç güvenilirlik açısından, P matrisi kullanıldığında doğrultu ölçülerinin iç güvenilirlik değerlerinin genel olarak daha yüksek olduğu, P = Edurumunda ise değerlerin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle kenar ölçülerinde, P = E matrisi kullanıldığında iç güvenilirlik değerlerinde daha belirgin bir azalma görülmektedir. Şekil 11'de ise dış güvenilirlik analiz sonuçları sunulmuştur. P matrisi kullanıldığında kenar ölcülerinde dış güvenilirlik değerlerinin daha yüksek olduğu, P = E durumunda ise dış güvenilirlik değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, stokastik modelin hata yayılımı üzerindeki etkisini göstermekte ve ağırlık matrisinin kullanılması durumunda hata tespit kapasitesinin arttığını ortaya koymaktadır.



Şekil 11. Farklı stokastik modellere göre dış güvenilirlik değerleri

3.2 II nolu yöntem (Kısmi iz minimum)

Kısmi iz minimum yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen dengeleme işlemlerinde, 53, 62, 147 ve 149 numaralı noktalar datum noktalarıdır. Bu seçim, ağın geometrik stabilitesini korumak, hata yayılımını minimize etmek ve güvenilir bir referans sistemi oluşturmak amacıyla yapılmıştır. Seçilen noktalar, ağın belirli bölgelerinde stratejik olarak konumlandırılmış olup, dengeleme sürecinde hata dağılımını optimize etmeye ve ağın stabilitesini artırmaya katkı sağlamaktadır.

II numaralı yöntem kapsamında, her bir ölçü grubuna ait noktalara ilişkin nokta konum hataları Şekil 12'de görselleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, doğrultu ağı, ortalama 2.20 cm ile en düşük nokta konum hatasına sahipken, kenar ağında bu değer ortalama 7.60 cm'ye ulaşarak en yüksek seviyeye çıkmıştır. Bu durum, II numaralı yöntemde kenar ağının model entegrasyonu sırasında hata oranlarının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında hata değerleri ortalama 3.60 cm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, doğrultu ölçülerinin konum hassasiyetine katkı sağladığını ve model entegrasyonu açısından daha güvenilir sonuçlar sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 12. II nolu yöntem nokta konum hataları

Dört noktanın datum tanımına katkı sağladığı II numaralı yöntem en düşük hata oranını sağlamış, ancak tüm iz minimum yöntemi ile karşılaştırıldığında daha büyük hata değerleri elde edilmiştir. Analiz sonuçları, doğrultu ağının kullanıldığı durumlarda hata ve güven elipslerinin eksen uzunluklarının daha küçük olduğunu, dolayısıyla hata dağılımının minimize edildiğini göstermektedir. Buna karşılık, kenar ağında hata ve güven elipsi eksen uzunluklarının diğer iki ağ türüne kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kenar ağının modelleme sürecinde oranlarının hata görece daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilmektedir (Tablo 4 ve Tablo 5).

Tablo 4. II nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	4.50	3.55	11.39	8.99
Doğrultu	3.29	1.88	8.74	4.99
Kenar	12.28	5.45	41.77	18.53

Tablo 5. II nolu yönteme	göre	minimum	eksen	değerleri
--------------------------	------	---------	-------	-----------

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	1.88	3.55	4.76	3.71
Doğrultu	1.23	0.02	3.26	0.06
Kenar	3.61	5.45	12.27	10.29

3.3 III nolu yöntem (Zorlamasız dengeleme)

Zorlamasız klasik dengeleme yöntemi kapsamında gerçekleştirilen analizlerde, ağın stabilizasyonunu sağlamak ve çözüm tekilliğini önlemek amacıyla belirli noktalar datum olarak tanımlanmıştır. Doğrultu ağı için yapılan analizlerde, toplam 4 datum parametresi kullanılmış olup, 54 ve 62 numaralı noktalar datum olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, 54 ve 62 numaralı noktaların hem x hem de y koordinat bileşenleri datum olarak kullanılmıştır. Kenar ve doğrultukenar ağları için yapılan analizlerde ise datum parametre sayısı 3 olarak belirlenmiş, bu kapsamda 54 numaralı noktanın x ve y koordinat bileşenleri datum olarak tanımlanmış, 62 numaralı noktanın ise yalnızca x koordinat bileşeni datum olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, ağın serbestlik derecesinin korunmasını sağlarken, minimum kısıtlama ile optimum stabilitenin elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 13, doğrultu ağında nokta konum hatalarının en düşük seviyede olduğunu, kenar ağında ise en yüksek değere ulaştığını göstermektedir. Kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında ise hata değerleri ortalama 5.70 cm olarak hesaplanmıştır. Dengelenme işlemi sonucunda, noktalar arasındaki konum hatalarındaki farklılıkların, sabit kabul edilen nokta seçimi ve koordinat sistemine bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Klasik dengeleme yönteminde, yalnızca iki noktanın datum tanımına katkı sağladığı zorlama durumu altında hata ve güven elipslerinde maksimum eksen değerlerine ulaşılmıştır. Bu durum, sınırlı datum tanımının ağ güvenilirliği üzerindeki olumsuz etkisini ortaya koymaktadır.



Şekil 13. III nolu yöntem nokta konum hataları

Bu yöntemde elde edilen hata ve güven elipslerine ilişkin minimum ve maksimum eksen uzunlukları Tablo 6 ve Tablo 7'de sunulmaktadır. Yapılan analizler, doğrultu ağının kullanıldığı durumlarda hata elipsi eksen uzunluklarının daha küçük olduğunu ve hata dağılımının daha homojen bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle doğrultu ağı, hata elipsi büyüklükleri açısından en düşük değerlere sahip olup, ölçü duyarlılığı açısından en avantajlı ağ türü olarak öne çıkmaktadır. Buna karşın, kenar ağında hata elipsi değerlerinin diğer iki ağ türüne kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, kenar ağının modelleme sürecinde hata oranlarının görece daha yüksek olması ve ölçü duyarlılığının doğrultu ölçülerine kıyasla daha düşük olması ile ilişkilendirilmektedir.

Elde edilen bulgular, stokastik modelin seçiminden datum tanımına kadar birçok faktörün hata ve güven elipsleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Bu doğrultuda, optimum güvenilirlik düzeyine ulaşmak için ağ tasarımında hem ölçü kombinasyonlarının hem de datum seçim stratejilerinin dikkatle belirlenmesi gerekmektedir.

Tablo 6. III nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	8.12	5.32	20.51	13.45
Doğrultu	6.42	3.19	17.04	8.47
Kenar	19.56	7.80	66.53	26.52

Tablo 7. III nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	3.10	5.32	7.84	2.07
Doğrultu	1.67	3.19	4.44	2.08
Kenar	6.01	7.80	20.46	3.93

3.4 IV Nolu Yöntem (Dayalı dengeleme)

Dayalı dengeleme, belirli noktaların sabit kabul edildiği veya ölçü parametrelerine kısıtların uygulandığı bir dengeleme yöntemidir. Jeodezik ağlarda, mühendislik projelerinde ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) tabanlı ölçülerde, belirli datum noktalarının sabit tutulması ile ölçülerin mutlak doğruluğu artırılmakta ve hata yayılımı kontrol edilmektedir. Serbest dengeleme ile karşılaştırıldığında, dayalı dengelemede sabit noktalar belirlenerek güvenilirlik artırılır, ancak hata dağılımı bu sabit noktalara bağlı olarak değişebilir.

 Tablo 8. IV nolu yönteme göre ölçülerin standart sapma değerleri

Ağ Türü	$\sigma_{maks}(cm/mgon)$	$\sigma_{ort}(cm/mgon)$	$\sigma_{\min}(cm/mgon)$
Kenar-Doğrultu	7.63	2.13	0.38
Doğrultu	0.31	0.27	0.23
Kenar	11.30	4.28	0.03

Dayalı dengeleme yöntemiyle gerçekleştirilen değerlendirmeler sonucunda elde edilen dengeli ölçülerin standart sapmaları Tablo 8'de sunulmuştur. Buna göre doğrultu ağı, en düşük hata seviyesine sahip ağ türü olarak belirlenmiştir. Minimum ve maksimum hata değerlerinin birbirine oldukça yakın olması, hata dağılımının homojen olduğunu ve ölçülerin güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, kenar-doğrultu ağı, ortalama hata seviyesi açısından kabul edilebilir bir seviyede olup, hata dağılımı dengeli bir yapı sergilemektedir. Maksimum hata seviyesi bazı ölçülerde hata seviyelerinin arttığını gösterse de, genel hata kontrolü sağlanmıştır. Kenar ağı ise en yüksek hata seviyesine sahip ağ türüdür. Maksimum hata değeri bazı ölçülerin güvenilirlik açısından daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, IV. yöntemin doğrultu ağı için daha stabil sonuçlar ürettiğini, ancak kenar ağı ölçülerinde hata seviyelerinin daha değişken ve yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 14'te, farklı ölçü kombinasyonlarının redündans değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ölcüleri kullanıldığında doğrultular için redündans değeri 0.60-0.90, yalnızca doğrultu ölçüleri kullanıldığında ise 0.40-0.70 arasında değiştiği tespit edilmistir. İkinci grafikte, kenar-doğrultu ölcüleri kullanıldığında kenarlar için redündans değeri 0.40-0.80, yalnızca kenar ölçüleri kullanıldığında ise 0-0.30 arasında değişmiş ve kontrol edilebilirlik açısından daha düşük bir değer gözlenmiştir. Ayrıca, bazı ölçülerin redündans değerlerinin sıfıra yaklaşması, bu ölçülerin, kaba hata tespiti açısından zayıf bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 14. Dengeli ölçülerin redündans değerleri

Şekil 15'te, IV nolu yöntem için iç güvenilirlik değerlerinin, ölçü türüne göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ölçüleri kullanıldığında dengeli doğrultu ölçüleri için iç güvenilirlik değeri 0.70-0.90 cm/mgon, yalnızca doğrultu ölçüleri için ise 0.75-1.00 mgon arasında değişmiştir. İkinci grafikte, yalnızca kenar ölçüleri için iç güvenirlik değerleri ortalama 14 cm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 15. Dengeli ölçülerin iç güvenirlik değerleri

Şekil 16'ya göre, kullanılan ağ türüne bağlı olarak dış güvenilirlik değerlerinde farklılık gözlemlenmiştir. İlk grafikte, kenar-doğrultu ağında dengeli doğrultuların dış güvenilirlik değeri 0.20-0.60 cm/mgon, yalnızca doğrultu ağında ise 0.34-0.75 mgon aralığındadır. İkinci grafikte, kenar-doğrultu ağında dengeli kenarların dış güvenilirlikleri ortalama 3.73 cm, yalnızca kenar ağında ise bu değer ortalama 11.75 cm'ye yükselmektedir.



Şekil 16. Dengeli ölçülerin dış güvenirlik değerleri

IV numaralı yöntem için farklı ölçü gruplarına ait nokta konum hataları Şekil 17'de görselleştirilmiştir. Yapılan analizler, doğrultu ağında ortalama 4.30 cm ile en düşük, kenar ağında ise ortalama 14.25 cm ile en yüksek konum hatalarının meydana geldiğini göstermektedir. Kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ yapısında ise hata değerleri ortalama 4.57 cm olarak hesaplanmıştır. Dengeleme işlemi sonucunda, konum hatalarındaki farklılıkların, sabit nokta seçimine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 17. IV nolu yöntem nokta konum hataları

Hata ve güven elipsleri üzerinde yapılan analizler, kenar ağının en yüksek hata ve güven elipsi eksen uzunluklarına sahip olduğunu, doğrultu ağının ise en düşük değerlere ulaştığını göstermektedir. Tablo 9 ve Tablo 10'daki maksimum ve minimum eksen uzunlukları incelendiğinde, doğrultu ağının hata ve güven elipsleri açısından en küçük değerlere sahip olduğu, buna karşın kenar ağının en büyük hata ve güven elipsi eksen uzunlukları ile karakterize edildiği belirlenmiştir. Bu durum, doğrultu ağının hata dağılımını minimize etmede ve ölçü doğruluğunu artırmada daha avantajlı olduğunu, kenar ağının ise modelleme sürecinde hata oranlarının görece daha yüksek olması nedeniyle daha az güvenilir sonuçlar ürettiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 9. IV nolu yönteme göre maksimum eksen değerleri

Ağ Türü	maxA(cm)	maxB(cm)	maxa(cm)	maxb(cm)
Kenar-doğrultu	7.17	4.43	18.08	11.17
Doğrultu	7.55	5.00	19.89	13.17
Kenar	21.86	11.08	63.78	32.32

Tablo 10. IV nolu yönteme göre minimum eksen değerleri

Ağ Türü	minA(cm)	minB(cm)	mina(cm)	minb(cm)
Kenar-doğrultu	2.07	1.96	5.23	4.95
Doğrultu	1.57	1.31	4.15	3.46
Kenar	6.05	4.36	17.64	12.73

3.5 Sonuçların karşılaştırılması

Tablo 11'de, farklı dengeleme yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yöntemlerin hata yayılımı ile güvenilirlik üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sunulan veriler, her yöntemin farklı ağ türleri üzerindeki performansını ortaya koymaktadır. I nolu yöntem, en düşük hata yayılımını sağlayarak en güvenilir sonuçları sunmuştur. Bu yöntemde iz(Q) değerleri diğer yöntemlere kıyasla en düşük seviyede olup, özellikle kenar-doğrultu ağı için 523.47 olarak belirlenmiştir. Birim ağırlıklı ölçünün standart sapması açısından da bu yöntem, doğrultu ağında en düşük hata seviyesine ulaşmıştır. II nolu yöntem, hata seviyelerini artırmadan stabil bir dengeleme sağlamıştır. iz(Q) değerleri bir miktar artmış, ancak hata kontrolü açısından dengenin korunduğu görülmüştür. III nolu yöntem, hata yayılımını önemli ölçüde artırmış ve güvenilirliği düşürmüştür. iz(Q)değerleri belirgin bir şekilde artarak, doğrultu ağında 4714.28, kenar ağında ise 5205.04 seviyesine ulaşmıştır. IV nolu yöntem, en yüksek hata seviyelerine sahip olup, ağın en az güvenilir olduğu yöntemi göstermektedir. PVV ve s₀ değerleri diğer yöntemlere kıyasla en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Sonuç olarak, en güvenilir ve stabil yöntem, hata seviyede en düşük tutarak yayılımını ölcülerin güvenilirliğini artıran I nolu yöntem olarak belirlenmiştir. Bu yöntemin, ağın genel stabilitesini koruduğu ve optimum dengeleme sağladığı görülmektedir.

Gerçekleştirilen analizlerde I, II, III ve IV numaralı yöntemlere ait nokta konum hataları, dengeli ölçülerin standart sapma değerleri, redündans oranları ve iç-dış güvenilirlik analizleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 18'de, ilk sırada kenar-doğrultu ağı, ikinci sırada doğrultu ağı ve son sırada kenar ağına ait nokta konum hataları görselleştirilmiştir. Kenar-doğrultu ağına ait analizlerde, en yüksek nokta konum hatasının III numaralı yöntemde, 150 numaralı noktada 9.70 cm olarak, en düşük konum hatasının ise I numaralı yöntemde, 152 numaralı noktada 2.41 cm olarak tespit edildiği belirlenmiştir. Bu farklılıklar, kullanılan yöntemlerin ağ yapılandırmasına ve hata yayılımına olan etkisini ortaya koymaktadır. Doğrultu ağı için yapılan değerlendirmelerde, IV numaralı yöntemde 150 numaralı noktada 9.06 cm ile en yüksek, II numaralı yöntemde ise 148 numaralı noktada 1.23 cm ile en düşük konum hatası belirlenmiştir. Kenar ağı analizlerinde ise, IV numaralı yöntemde 54 numaralı noktada 23.22 cm ile en yüksek, II numaralı yöntemde 149 numaralı noktada 4.71 cm ile en düşük hata değerleri elde edilmiştir.

Tablo 11. Dengeleme sonuçları

	I nolu yönten	1	
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar
PVV	14.06	0.63	1.56
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51
$iz(Q)(cm^2)$	523.47	1658.63	2132.36
	II nolu yönten	n	
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar
PVV	14.06	0.63	1.56
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51
$iz(Q)(cm^2)$	628.72	2213.66	2713.69
	III nolu yönter	n	
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar
PVV	14.06	0.63	1.56
s ₀ (cm)	0.55	0.18	0.51
$iz(Q)(cm^2)$	1418.52	4714.28	5205.04
	IV nolu yönter	n	
Ağ Türü	Kenar-Doğrultu	Doğrultu	Kenar
PVV	18.65	2.45	4.29
s ₀ (cm)	0.61	0.34	0.85
iz(Q)(cm ²)	634.58	1939.75	3246.40

Bu sonuçlar, farklı yöntemlerin ağ türlerine göre konum hatası dağılımlarında belirgin farklılıklar oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle, IV numaralı yöntemin kenar ağında en yüksek hata değerlerine sahip olması, bu yöntemin hata yayılımına daha duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. II numaralı yöntemin hem doğrultu hem de kenar ağında en düşük hata değerlerini sağlaması ise, bu yöntemin stokastik modelleme sürecindeki etkinliğini ve ağ yapılandırmasına olumlu katkısını göstermektedir. Sonuçlar, yöntem ve ağ türü seçiminin konum doğruluğu üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, farklı ağ yapılarına uygun yöntemlerin titizlikle değerlendirilmesi ve konum hata analizlerinin yöntem bazında ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Şekil 19'da, I ve IV numaralı yöntemlere ait dengeleme sonrası elde edilen standart sapma değerleri karşılaştırılmıştır. Standart sapma değerleri kenar-doğrultu ağı için I numaralı yöntemde 0.40-0.52 cm, IV numaralı yöntemde ise 0.38-0.58 cm arasında değişmektedir. Kenar ağı için ise I numaralı yöntemde 2.66-6.29 cm, IV numaralı yöntemde 3.00-7.63 cm aralığında değerler elde edilmiştir. Bu sonuçlar, I ve IV numaralı yöntemlerin ölçü duyarlılığı üzerindeki etkilerini ortaya koymakta olup, IV numaralı yöntemin kenar ağı üzerindeki hata yayılımına daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Analizlerin daha net yorumlanabilmesi amacıyla tüm yöntemler yerine I ve IV numaralı yöntemlerin karşılaştırılması tercih edilmiştir.



Şekil 18. Nokta konum hataları



Şekil 19. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin standart sapmalarının karşılaştırması

Şekil 20'de, I ve IV numaralı yöntemlere ait redündans değerleri karşılaştırılmıştır. Kenar-doğrultu ağı için, doğrultu ölçülerinin redündans değerleri I numaralı yöntemde 0.52-0.90, IV numaralı yöntemde ise 0.39-0.91 arasında bir değişim göstermektedir. Bu değerler incelendiğinde, IV numaralı yöntemde doğrultu ölçülerinin redündans değerlerinin daha geniş bir aralıkta dağıldığı, dolayısıyla daha fazla varyasyon sergilediği görülmektedir. Kenar ölçülerinde ise I numaralı yöntemin redündans değerleri 0.43-0.83, IV numaralı yöntemin ise 0.49-0.88 aralığında hesaplanmış olup, bu iki yöntem arasında belirgin bir varyasyon farkı gözlenmemektedir. Bu analiz, farklı yöntemlerin ağ yapılarına göre redündans değerlerinde nasıl bir değişim gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 21, I ve IV numaralı yöntemlerin iç güvenilirlik değerlerinin dağılımını göstermektedir. Doğrultu ölçülerinde, I numaralı yöntemde değerler 0.78-2.23 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.82-2.41 cm/mgon aralığında değişim göstermiştir. Bu değerler incelendiğinde, doğrultu ölçülerinde her iki yöntemin benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Kenar ölçülerinde, I numaralı yöntemde değerler 9.72-22.97 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.48-0.85 cm/mgon aralığında değişime sahiptir. IV numaralı yöntemin kenar ölçülerinde iç güvenilirlik değerlerini önemli ölçüde azalttığı (yani güvenilirliği artırdığı), doğrultu ölçülerinde ise I numaralı yöntemle benzer bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

Şekil 22'de, I ve IV numaralı yöntemlere ait dış güvenilirlik değerleri karşılaştırılmıştır. Dış güvenirlik değerleri doğrultu ölçülerinde, I numaralı yöntemde 0.25-1.54 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.25-1.63 cm/mgon aralığındadır. Kenar ölçülerinde ise, I numaralı yöntemde 4.44-15.14 cm/mgon, IV numaralı yöntemde ise 0.21-0.53 cm/mgon aralığındadır. IV numaralı yöntemin kenar ölçülerindeki dış güvenilirlik değerleri oldukça düşük olup, büyük hataların tespit edilme ihtimalinin daha sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, ağın belirli ölçüler için hata tespit kapasitesinin zayıflamasına neden olabilir.



Şekil 20. Kenar-doğrultu ağı I-V nolu yöntemlerin redündanslarının karşılaştırılması



Şekil 21. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin iç güvenirliklerinin karşılaştırılması



Şekil 22. Kenar-doğrultu ağı I-IV nolu yöntemlerin dış güvenilirliklerinin karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Bu çalışma, jeodezik ağlarda kullanılan farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçlarına etkilerini karşılaştırmalı bir yaklaşımla analiz etmektedir. Çalışmada, doğrultu ve kenar ölçülerinden oluşan bir jeodezik ağ, serbest ve dayalı dengeleme yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sürecinde, doğrultu ve kenar ölçüleri hem tek tek hem de birlikte değerlendirilerek farklı dengeleme yaklaşımlarının etkileri incelenmiştir. Dengeleme sonrası elde edilen güvenilirlik ve duyarlılık ölçütleri, hata ve güven elipsleri ile nokta konum hataları karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, ağların dengeleme süreçlerinde kullanılan fonksiyonel ve stokastik modellerin, duyarlılık ve güvenilirlik değerleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Jeodezik ağların güvenilirliğini değerlendirmede yalnızca dengeleme sonuçları ve doğruluk ölçütleri yeterli olmayıp, fazla ölçü paylarının (redündans) ve matematiksel modelin doğruluğunun da dikkate alınması gerekmektedir. Redündans değerinin artmasıyla birlikte, iç ve dış güvenilirlik ölçütlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, belirlenen test gücüne bağlı olarak hangi büyüklükteki ölçü hatalarının tespit edilebileceği (iç güvenilirlik) ve tespit edilemeyen hataların dengeleme sonuçlarına etkisinin ne düzeyde olacağı (dış güvenilirlik) analiz edilmelidir. Bu bulgular, jeodezik ağların güvenilirliğinin artırılması için redündans seviyesinin, datum noktalarının konumlandırılmasının ve istatistiksel test yöntemleriyle model hatalarının belirlenmesinin büyük önem taşıdığını göstermektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen farklı dengeleme yöntemlerinin karşılaştırılması sonucunda, kenar ve doğrultu ölçülerinin birlikte kullanıldığı ağ modelinin yüksek duyarlıklı bir sonuç verdiği belirlenmiştir. Tek başına kenar ölçülerinin kullanıldığı modellerde hata ve güvenilirlik ölçütlerinin olumsuz yönde etkilendiği, doğrultu ölçülerinin eklenmesiyle birlikte ağın genel güvenilirlik seviyesinin arttığı tespit edilmiştir. Jeodezik ağların güvenilirlik açısından optimize edilmesi için kullanılan matematiksel modelleme yaklaşımlarının büyük önem taşıdığı ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, en uygun dengeleme yönteminin seçilmesi, ölçülerde hataların minimize edilmesi güvenilirlik detaylı ve analizlerinin bir şekilde gerekmektedir. Çalışma bulguları, gerçekleştirilmesi farklı modelleme stratejilerinin ağ jeodezik ağlarda güvenilirliği üzerindeki etkilerini anlamada önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] H Konak, Yer merkezli üç boyutlu jeodezik ağlarda datum sorunu. Harita Dergisi, 116:55-61, 1996.
- [2] C. Aydın, N. Arslan ve H. Demirel, Deformasyon analizinde duyarlılık. Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 90:12-18, 2004.
- [3] C. Aydın, N. Arslan ve H. Demirel, Kanıtlanamayan kaba hataların deformasyon analizine etkisi. TUJK Scientific Assembly, Zonguldak, Türkiye, 14-16 Ekim 2004.
- [4] M. Yalçınkaya, K. Teke ve T. Bayrak, GPS ile ölçülen jeodezik ağlarda duyarlılık ve güven optimizasyonu. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, Kony, Türkiye, 24-26 Eylül 2003.

- [5] W.A. Baarda, Testing procedure for use in geodetic networks. Publication on Geodesy, New Series 2, no.5., Netherlands Geodetic Commission, Delft, 1968.
- [6] H. Demirel, Dengeleme hesabı. YTÜ, İstanbul, 2009.
- [7] A.J. Pope, The Statistics of residuals and the detection of outliers. NOAA Technical Report, NOS 65, NGS 1, Rockville, MD, 1976.
- [8] P. Küreç, H. Konak, A priori sensitivity analysis for densification GPS networks and their capacities of crustal deformation monitoring: A real GPS network application. Natural Hazards and Earth System Sciences, 14:1299-1308, 2014. DOI:10.5194/NHESS-14-1299-2014.
- [9] B. Erdogan, An outlier detection method in geodetic networks based on the original observations. Boletim de Ciencias Geodesicas, 20:578-589, 2014. https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000300033.
- [10] E. Öztürk, Jeodezik ağlarda güven ölçütleri ve ölçme planının optimizasyonu. KTÜ Yayınları, 87-92, Trabzon, 1982.
- [11] E. Öztürk, Jeodezik ağlarda duyarlık ve güven ölçütleri. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 641-671, Ankara, Türkiye, 1987.
- [12] H.B. Papo, Datum accuracy and its dependence on network geometry. International Scientific And Technical Conference, 4-9, 1999.
- [13] H. Demirel, Nirengi ağlarının dengelenmesi ve sonuçlarının test edilmesi. Harita Dergisi, 98: 22-33, 1987.
- [14] C. Demir, EDM aletlerindeki ölçek uyuşumsuzluğunun değişik lineer hipotez testlerle irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1990.
- [15] B. Erdoğan, Statik deformasyon analizinin güvenilirliğinin yatay kontrol ağlarında araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [16] M. Bak, Jeodezik çalışmalarla İzmit Körfezi ve yakın çevresi kabuk deformasyonlarının belirlenmesi.

Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

- [17] T. Bayrak, Dengeleme hesabi-II jeodezik ağların dengelenmesi. ISBN:978-605-61712-1-5, Gümüşhane, 2011.
- [18] T. Ayan, Bağıl güven elipsleri ile deformasyon analizi. Harita Dergisi, Sayı 91, 1983.
- [19] W.S. Caspary, Concepts of network and deformation analysis, University of New South Wales. School of Surveying, 1987.
- [20] T. Ayan, Jeodezik ağlarda deformasyon analizine genel bakış. İTÜ. Dergisi, Sayı I, 1982.
- [21] H. Demirel, S-Transformasyonu ve deformasyon analizi. Türkiye I. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 1987.
- [22] N. Tekin, Jeodezik ağlarda farklı matematiksel modellerin dengeleme sonuçlarına etkilerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [23] S. Bülbül, Yatay yöndeki deformasyonların belirlenmesinde bağıl güven elipsleri ve Cholesky çarpanlarına ayırma yönteminin kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
- [24] G. Even-Tzur, Datum definition and its influence on the sensitivity of geodetic monitoring networks. 12th FIG Symposium, Baden, 22-24 May 2006.
- [25] S. Doğanalp, Kinematik modelde kalman filtreleme yöntemi ile deformasyon analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2005.
- [26] U. Dogan, G. Lachapelle, L. Fortes, and S. Ergin, A study of the tectonically active Marmara Region, Turkey, using a Global Positioning System (GPS). Canadian Journal of Earth Sciences, 40:1191-1202, 2003. https://doi.org/10.1139/e03-041.
- [27] https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchan ge/3435-taucv, Accessed 6 January 2025.

