KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ BOYUTLU ULUSAL DATUM DÖNÜŞÜM MODELİ

DOKTORA TEZİ

Şakir Levent ŞAHİN

TEMMUZ 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ BOYUTLU ULUSAL DATUM DÖNÜŞÜM MODELİ

Şakir Levent ŞAHİN
ORCID :

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (HARİTA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 07 / 2025
Tezin Savunma Tarihi : 18 / 07 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Faruk YILDIRIM
ORCID :

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

"İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli" isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Faruk YILDIRIM' a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Emine TANIR KAYIKÇI' ya ve Sayın Prof. Dr. Bekir Dizdaroğlu'na, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Yüksek Harita Mühendisi Ömer Faruk SÜER' e ve Murat YİĞİT' e teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Harita Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tanıştığımız günden beri elimi hiç bırakmayan, tanıştığımız süre boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim İpek KIRBOZ ŞAHİN'e ve kardeşim Hasan ŞAHİN'e teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Şakir Levent ŞAHİN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Faruk YILDIRIM' ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/07/2025

Şakir Levent ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VIII
SUMMARY IX
ŞEKİLLER DİZİNİ X
TABLOLAR DİZİNİ XIV
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Problemin Tanımı 4
1.2. Çalışmanın Amacı 6
1.3. Türkiye'de Haritacılık Faaliyetleri 8
1.3.1. TUD54 10
1.3.2. TUREF 12
1.3.3. TUTGA 13
1.3.4. TUSAGA Aktif 14
1.4. Datum Dönüşümü İhtiyacının Ortaya Çıkışı 15
1.5. Türkiye'de Kullanılan Datumlar 18
1.5.1. ED50 Datumu 18
1.5.2. ITRF Datumu 19
1.5.3. WGS84 Datumu 20
1.6. Türkiye'de Kullanılan Harita Projeksiyonları 21
1.6.1. UTM Projeksiyonu 23
1.6.2. Lambert Konform Konik (LKK) Projeksiyon 29
1.6.3. UTM-LKK Dönüşümü 33
1.7. İki Boyutlu Koordinat Dönüşüm Yöntemleri ve Dengeleme Yaklaşımları 34
1.7.1. İki Boyutlu Dönüşüm Yöntemleri İçin Ortak Çerçeve 35
1.7.2. Matematiksel Model 35
1.7.3. Fonksiyonel Model 35
1.7.4. Stokastik Model 36
1.7.5. Dengeleme Yaklaşımları 37

1.7.6. EKK Yöntemi 37
1.7.7. Robust Yöntemler 38
1.7.8. Duyarlık Ölçütleri 44
1.7.9. Hipotez Testleri 45
1.7.10. İki Boyutlu Dönüşüm Yöntemleri 46
1.7.11. Benzerlik Dönüşümü 46
1.7.12. Afin Dönüşümü 47
1.7.13. Projektif Dönüşüm 49
1.7.14. Polinomsal Dönüşüm 50
1.8. Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Datum Dönüşümü 52
1.8.1. Lineer Regresyon Modelleri 53
1.8.2. Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) 55
1.8.3. Gaussian Süreç Regresyonu 59
1.8.4. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM) 61
1.8.5. Kriging Yöntemi 64
1.8.6. Fraktal Tabanlı Modeler 67
1.8.7. Bayesyen Yöntemi 70
1.8.8. Thin Plate Spline (TPS) Yöntemi 73
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 77
2.1. Çalışma Alanı 78
2.2. Veri Seti 79
2.2.1. Verilerin Depolanması 79
2.2.2. Verilerin Okutulması 81
2.2.3. Verilerin Düzenlenmesi 83
2.2.4. Verilerin Unique Hale Getirilmesi 87
2.2.5. Dilim Numarası Kontrolü 87
2.2.6. Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi 91
2.2.7. Gruplayarak Kontrol 91
2.2.8. LKK Koordinatlara Geçiş 96
2.2.9. Veri Setinin Kullanıma Hazır Hale Getirilmesi 100
2.3. Klasik Datum Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi 101
2.3.1. Benzerlik Dönüşümü Algoritmalarının Üretilmesi 103
2.3.1. Afin Dönüşümü Algoritmalarının Üretilmesi 103
2.3.2. Projektif Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi 103

2.3.3. Polinomsal Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi 103
2.4. Ortak Nokta Belirleme Algoritmalarının Oluşturulması 108
2.4.1. En Yakın Nokta Algoritması 108
2.4.2. Açı Alan Algoritması 108
2.5. Uyuşumsuz Ölçü Belirleme Algoritmalarının Üretilmesi 111
2.5.1. T-testi Yöntemi 111
2.5.2. Robust Yöntemler 111
2.5.3. RANSAC Yöntemi 111
2.6. Makine Öğrenmesi Modellerinin Üretilmesi 115
2.6.1. ML Yöntemlerinin Eğitim Verisi 116
2.6.2. Makine Öğrenmesi Modelleri 117
2.6.3. Modellerin Eğitim Sonuçları 129
2.7. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli 134
2.7.1. TUM Modeli 134
2.7.2. TUTGA Modeli 142
2.7.3. CORS Modeli 149
2.7.4. ML Modeli 156
2.7.5. Modellerin Karşılaştırılması 162
2.7.6. Modellerin İrdelenmesi 171
2.8. Programda Kullanılacak Modelin Belirlenmesi 173
2.9. Programın Üretilmesi 173
2.9.1. Programın Farklı Platformlarda Sunulması 179
3. BULGULAR 182
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 187
5. KAYNAKLAR 190
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

İKİ BOYUTLU ULUSAL DATUM DÖNÜŞÜM MODELİ

Şakir Levent ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Faruk YILDIRIM
2025, 214 Sayfa

Türkiye'de ED50 ve ITRF96 datumlarına ait 3°'lik UTM koordinatlarının farklı kurum ve projelerde aktif olarak kullanılıyor olması, bu iki datumlar arasında yüksek doğruluklu dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Mevcut uygulamalarda dönüşümler genellikle yerel ölçekte, sınırlı sayıda ortak nokta ve bölgesel dönüşüm parametreleri ile yürütülmektedir. Ancak bu yaklaşım; ortak nokta sıklaştırma ihtiyacı, parametrelerin temininde yaşanan zorluklar ve farklılık gösteren dönüşüm doğrulukları gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Bu amaçla geliştirilen Ulusal Datum Dönüşüm Modeli (UDDM), kullanıcıdan dönüşüm parametresi temini gerektirmeksizin tüm Türkiye'de uygulanabilir, homojen ve yüksek doğruluklu bir dönüşüm sunmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında, 4200 grup ve 62500 noktadan oluşan ham veri seti analiz edilmiş; temizlik ve kontrol işlemleriyle 7313 yüksek güvenilirlikte ortak nokta belirlenmiş ve bu noktaları kullanan TUM Modeli oluşturulmuştur. Hesaplamalar dilim dönüşümü gerektirmeyen Lambert Konform Konik projeksiyonunda yapılmıştır. TUM, MATLAB ortamında uyuşumsuzluk testlerine tabi tutulmuş; iki boyutlu dönüşüm modelleriyle maksimum RMSE ±3 cm ile en yüksek doğruluğu sağlanmıştır. Ayrıca 611 TUTGA noktasını kullanan TUTGA Modeli, 181 TUSAGA Aktif noktasını kullanan CORS Modeli ve makine öğrenmesi modellerinin birlikteliğiyle çalışan ML Modeli oluşturulmuştur. Tüm modeller istatistiksel tabanlı yaklaşımlarla da test edilmiştir. UDDM bu dört modelin, nokta bazlı ürettiği en iyi sonucu ulusal ölçekte tek bir model yerine nokta bazlı model yaklaşım ile kullanıcıya sunmaktadır. Sonuç olarak UDDM, kullanıcıdan parametre temini gerektirmeyen, tüm Türkiye'de çalışabilen, ±9 cm RMSE şartını karşılayan, esnek, güvenilir ve sürdürülebilir bir dönüşüm modelidir.

Anahtar Kelimeler: Datum Dönüşümü, Lambert Konform Konik Tasvir, İki Boyutlu Koordinat Dönüşümü, Makine Öğrenmesi

PhD. Thesis

SUMMARY

TWO-DIMENSIONAL NATIONAL DATUM TRANSFORMATION MODEL

Şakir Levent ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geomatics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Faruk YILDIRIM
2025, 214 Pages

The widespread use of ED50 and ITRF96 datums in various institutions and projects across Türkiye necessitates a highly accurate transformation between these coordinate systems. Existing practices often rely on regional transformation parameters derived from a limited number of common points at local scales. However, this approach presents several challenges, including the need for densification of common points, difficulties in parameter acquisition, and varying transformation accuracies. To address these issues, the National Datum Transformation Model (UDDM) was developed, aiming to offer a homogeneous, high-accuracy transformation across Türkiye without requiring users to supply transformation parameters. A raw dataset consisting of 4,200 groups and 62,500 points was analyzed, leading to the identification of 7,313 high-reliability common points after rigorous cleaning and validation. Using these points, the TUM Model was developed within the Lambert Conformal Conic projection, which does not require zone transformation. The TUM Model was tested in MATLAB, yielding a maximum RMSE of ±3 cm with two-dimensional transformation models. Additionally, three alternative models were developed: the TUTGA Model (611 points TUTGA points), the CORS Model (181 TUSAGA-Active points), and the ML Model utilizing machine learning algorithms. All models were evaluated with statistical methods. UDDM integrates the most accurate results on a point-by-point basis, offering a flexible, reliable, and sustainable solution with an overall RMSE within ±9 cm across the country.

Key Words: Datum Transformation, Lambert Conformal Conic Mapping, Two-Dimensional Coordinate Transformation, Machine Learning

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Yatay Kontrol Ağı poligon zincirleri ve Meşedağ noktası (Link-1) 11
Şekil 2. Türkiye temel nirengi ağı (Link-1) 11
Şekil 3. TUTGA Noktaları(Link-4) 13
Şekil 4. Tusaga-Aktif Noktaları 15
Şekil 5. IERS noktaları 19
Şekil 6. Türkiye'de UTM dilimleri 23
Şekil 7. Gauss-Krüger coğrafi düzlem tasviri 25
Şekil 8. LKK Projeksiyonu 30
Şekil 9. Benzerlik dönüşümü (Öcalan 2019) 46
Şekil 10. Afin dönüşümü (Sisman, 2014) 48
Şekil 11. Projektif dönüşüm (Link-2) 49
Şekil 12. Polinomsal dönüşüm (Link-3) 51
Şekil 13. Örnek excel verisi 80
Şekil 14. Örnek TXT Verisi 80
Şekil 15. Örnek DNS verisi 81
Şekil 16. Örnek TXT Verisi 81
Şekil 17. Örnek CKS verisi 82
Şekil 18. Text veri tipi için patern oluşturan matlab kodu 82
Şekil 19. Rakam ve "." dışında temizlenmiş veri örneği 83
Şekil 20. Matlab programına aktarılmış veri matrisi 83
Şekil 21. 7x4'lük matrisin boş değerleri silinmeden önceki hali 84
Şekil 22. Double veri tipinde 7x4'lük matris 84
Şekil 23. 6 veya 7 basamaklı olmayan değerler silindiğinde matrisin durumu 85
Şekil 24. Örnek excel verisi 85
Şekil 25. Excel verisinin patern ile eşleştirilmesi 86
Şekil 26. Boş olan satırlar ile 5. ve 6. sütunun silinmesi 86
Şekil 27. GUI, Hatalı kayıt Antalya - DN:42, Doğru kayıt Samsun - DN:36 88
Şekil 28. GUI, Hatalı kayıt Samsun - DN:36, Doğru kayıt Sakarya - DN:30 88
Şekil 29. GUI, Hatalı kayıt Tokat DN:39, Doğru kayıt Tokat DN:36 89
Şekil 30 GUI, Hatalı kayıt Kastamonu DN:36, Doğru kayıt Sinop DN:36 89

Şekil 31. GUI, kayıt İstanbul DN:30 90
Şekil 32. Her noktadaki dönüşüm işlemi sonucuna göre elde edilen m_0 değerlerine göre renklendirilmiş harita 92
Şekil 33. Oluşturulan daireler (Yeşil RMSE<1 m) 93
Şekil 34. Oluşturulan daireler (Sarı RMSE>1 m) 93
Şekil 35. Oluşturulan daireler (Mavi RMSE >2 m) 94
Şekil 36. Oluşturulan daireler (Pembe RMSE >4 m) 94
Şekil 37. Oluşturulan daireler (Kırmızı RMSE >5 m) 95
Şekil 38. RMSE değerlerinin histogramı 95
Şekil 39. Gruplar ve ITRF96-ED50 farkları beraber yapılan inceleme 96
Şekil 40. Türkiye'deki ITRF96-ED50 UTM koordinat farkları 97
Şekil 41. Belirlenen ve hataları giderilen gruplar 98
Şekil 42. Tokat üzerindeki hatalı nokta grubu 98
Şekil 43. Türkiye, Tokat 99
Şekil 44. Hatalı noktaların grup numarasının belirlenmesi 99
Şekil 45. 3326 grup numaralı veri, ham veri kümesi 99
Şekil 46. Grup 3326'nın koordinatları 99
Şekil 47. Klasik dönüşüm yöntemlerinin genel akış şeması 102
Şekil 48. Benzerlik dönüşümü yönteminin genel akış şeması 104
Şekil 49. Afin dönüşümü yönteminin genel akış şeması 105
Şekil 50. Projektif dönüşüm yönteminin genel akış şeması 106
Şekil 51. Polinomsal dönüşüm yönteminin genel akış şeması 107
Şekil 52. Dönüşüm noktası ve en yakın ortak nokta 109
Şekil 53. En yakın nokta oluşturulan ilk üçgeni ortalar 109
Şekil 54. Her alan içerisinde dönüşüm noktasına en yakın ortak noktalar 110
Şekil 55. t-testinin akış şeması 112
Şekil 56. Robust yöntemlerin genel akış şeması 113
Şekil 57. RANSAC akış şeması 114
Şekil 58. LR makine öğrenmesi modelinin akış şeması 121
Şekil 59. YSA makine öğrenmesi modelinin akış şeması 122
Şekil 60. Fraktal tabanlı makine öğrenmesi modelinin akış şeması 123
Şekil 61. GPR makine öğrenmesi modelinin akış şeması 124
Şekil 62. Kriging makine öğrenmesi modelinin akış şeması 125
Şekil 63. Bayesyen makine öğrenmesi modelinin akış şeması 126
Şekil 64. SVR makine öğrenmesi modelinin akış şeması 127

Şekil 65. TPS makine öğrenmesi modelinin akış şeması 128
Şekil 66. MLR model eğitim sonuç ekranı 129
Şekil 67. ANN model eğitim sonuç ekranı 129
Şekil 68. Bayesyen model eğitim sonuç ekranı 130
Şekil 69. BPANN model eğitim sonuç ekranı 130
Şekil 70. Fraktal model eğitim sonuç ekranı 131
Şekil 71. GPR model eğitim sonuç ekranı 131
Şekil 72. Kriging model eğitim sonuç ekranı 132
Şekil 73. LR model eğitim sonuç ekranı 132
Şekil 74. SVR model eğitim sonuç ekranı 133
Şekil 75. TPS model eğitim sonuç ekranı 133
Şekil 76. TUM Modeli ortak nokta kümesi(7313 nokta) 135
Şekil 77. Dönüşüm yöntemlerinin RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği 137
Şekil 78. Uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemlerinin RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği 138
Şekil 79. ONBA'ların RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği 140
Şekil 80. ONBA'ların alansal başarı haritası 140
Şekil 81. NS'ye bağlı RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği 141
Şekil 82. TUM Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri 142
Şekil 83. TUTGA Modeli ortak nokta kümesi(611 nokta) 143
Şekil 84. DYA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği 145
Şekil 85. UOBA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği 147
Şekil 86. DYA-UOBA RMSE metriği için kutu grafiği 148
Şekil 87. TUTGA Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri 149
Şekil 88. CORS Modeli ortak nokta kümesi(181 nokta) 150
Şekil 89. DYA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği 152
Şekil 90. UOBA RMSE metriği için kutu grafiği 153
Şekil 91. DYA-UOBA RMSE metriği için kutu grafiği 155
Şekil 92. TUTGA Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri 155
Şekil 93. ML yöntemlerinin Vy değerlerini gösterir kutu grafiği 158
Şekil 94. Vy değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları 158
Şekil 95. ML yöntemlerinin Vx değerlerini gösterir kutu grafiği 159
Şekil 96. Vx değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları 159
Şekil 97. ML yöntemlerinin V değerlerini gösterir kutu grafiği 160
Şekil 98. V değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları 161

Şekil 99. ML yöntemleri ile dönüştürülen 7313 noktanın V değerlerine göre gösterimi 162
Şekil 100. Vx – DYA / Model kutu grafiği 166
Şekil 101. Vy – DYA / Model kutu grafiği 167
Şekil 102. CORS-TR en iyi DYA alansal gösterim 168
Şekil 103. TUTGA en iyi DYA alansal gösterim 168
Şekil 104. TUM en iyi DYA alansal gösterim 169
Şekil 105. ML en iyi algoritma alansal gösterim 169
Şekil 106. CORS-TR en iyi UOBA alansal gösterim 170
Şekil 107. TUTGA en iyi UOBA alansal gösterim 170
Şekil 108. TUM en iyi UOBA alansal gösterim 171
Şekil 109. Program akış şeması 175
Şekil 110. Uygulama ekran görüntüsü -1 176
Şekil 111. Uygulama ekran görüntüsü -2 177
Şekil 112. Uygulama ekran görüntüsü -3 178
Şekil 113. Uygulama ekran görüntüsü -4 178
Şekil 114. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Masaüstü Uygulaması 179
Şekil 115. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Web Uygulaması 180
Şekil 116. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Mobil Uygulaması 180
Şekil 117. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin Test Noktaları 182

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. TUREF datumu ile WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm 17
Tablo 2. ED50 datumu ile TUREF veya WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm 17
Tablo 3. G meridyen yayı hesabı katsayı değerleri 26
Tablo 4. B_f ayak noktası enlemi hesabı katsayı değerleri 28
Tablo 5. LKK parametreleri 97
Tablo 6. Uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemlerine ait özellikler 115
Tablo 7. Karşılaştırmalı Makine Öğrenmesi Model Özeti 116
Tablo 8. Normalizasyon Parametreleri 117
Tablo 9. Model Parametrelerine Göre Karşılaştırma (Özet Tablo) 120
Tablo 10. DYA Sayı ve Frekans Değerleri 135
Tablo 11. ONBA Sayı ve Frekans Değerleri 135
Tablo 12. UOBA Sayı ve Frekans Değerleri 136
Tablo 13. NS ve Frekans Değerleri 136
Tablo 14. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler 136
Tablo 15. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri 136
Tablo 16. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 137
Tablo 17. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 137
Tablo 18. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri 138
Tablo 19. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 139
Tablo 20. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 139
Tablo 21. RMSE değerleri üzerindeki etkileri gösteren çok faktörlü ANOVA testi 141
Tablo 22. UOBA'ların Sayı ve Frekans Değerleri 144
Tablo 23. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler 144
Tablo 24. DYA'ların Sayı ve Frekans Değerleri 144
Tablo 25. RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Shapiro-Wilk testi 144
Tablo 26. RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Levene testi testi 144
Tablo 27 RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Kruskal-Wallis testi 145
Tablo 28. RMSE değerleri için Tukey HSD testinin sonuçları 145
Tablo 29. RMSE değerleri için Dunn-Bonferroni testinin sonuçları 146
Tablo 30. Shapiro-Wilk testine ait sonuçlar 146

Tablo 31. Levene testine ait sonuçlar 146
Tablo 32. Kruskal-Wallis testine ait sonuçlar 146
Tablo 33 RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 147
Tablo 34 RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 147
Tablo 35. DYA'ların Sayı ve Frekans Değerleri 151
Tablo 36. UOBA'ların Sayı ve Frekans Değerleri 151
Tablo 37. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler 151
Tablo 38. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri 151
Tablo 39. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 152
Tablo 40. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 152
Tablo 41. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri 153
Tablo 42. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 154
Tablo 43. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 154
Tablo 44. Makine öğrenmesi yöntemlerinin frekans değerleri 156
Tablo 45. Makine öğrenmesi yöntemlerinin tanımlayıcı istatistikleri 156
Tablo 46. Vy, Vx ve V değerleri için Shapiro-Wilk testleri 157
Tablo 47. Vy, Vx ve V değerleri için Levene testi 157
Tablo 48. Vy, Vx ve V değerleri için Kruskal-Wallis testi 157
Tablo 49. Vy değerleri için Tukey HSD testinin anlamlı sonuçları 158
Tablo 50. V değerleri için Tukey HSD testinin anlamlı sonuçları 160
Tablo 51. UOBA Sayı ve Frekans Değerleri 163
Tablo 52. Kullanılan ortak nokta sayısı ve frekans değerleri 163
Tablo 53. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler (CORS, TUTGA, TUM) 163
Tablo 54. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler (ML) 163
Tablo 55. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri 164
Tablo 56. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 165
Tablo 57. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 165
Tablo 58. Vx metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 166
Tablo 59. Vx metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 166
Tablo 60. Vy metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi 167
Tablo 61. Vy metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi 167
Tablo 62. Modellerin en iyi RMSE değerlerine göre irdelenmesi 171
Tablo 63. Modellerin en iyi Vx-Vy değerlerine göre irdelenmesi 172
Tablo 64. Modellerin 7313 noktadaki en iyi sonuçlarının ortalamaları 172

Tablo 65. Test Noktalarının Koordinat Bilgileri 183
Tablo 66. TUM Modelinin Dönüşüm Sonuçları 183
Tablo 67. TUTGA Modelinin Dönüşüm Sonuçları 184
Tablo 68. CORS Modelinin Dönüşüm Sonuçları 184
Tablo 69. ML Modellerinin Dönüşüm Sonuçları 185
Tablo 70. Modellerin Dönüşüm Sonuçlarının Karşılaştırması 185

1. GENEL BİLGİLER

İnsanlar yerleşik hayata geçtikten sonra edindikleri toprak parçalarını koruma ve bu edinilen toprakları miras bırakabilmek adına belgelendirme gereksinimi duymuşlardır (Haras ve ark., 2024). Bu durum mülkiyet hakkının ve kadastronun doğuşuna ortam hazırlamıştır. İlk bilinen örnekler antik Mısır'da(Barnard, 2014), Nil Nehri taşkınları nedeniyle sınırları bozulan tarlaların, taşkın sonrası sınırlarını belirlemek amacıyla üçgenlerin ve geometrinin kullanılarak tarla sınırlarının belirlenmesi, kayıt edilmesi, taşkın sonrasında aplike edilmesine(Harrell, 2008) dayanmaktadır(Biesheuvel, 1956; Rawlins, 1982).

İnsanlığın gelişmesi ve nüfus artışı gibi nedenlerle meydana gelen savaş ve farklı bölgelerde ortak yürütülecek projelerde ülkelerce kullanılmakta olan haritaların üretim biçimlerinin, harita referanslarının birbirleri ile iletişim kuramaması nedeniyle ortak bir harita sistemine ve üretim standartlarına ihtiyaç duyulmuştur(Baiocchi ve ark., 2019). Dünyanın matematiksel olarak ifade edileceği parametreler ve orijinin tanımlanması ile oluşturulan datumla(Jauregui, 2014), birbirini hiç görmemiş, tanımayan insanlar için bile ölçülen koordinat, yapılan hesaplama(Bettinger ve ark., 2020) ve çizilen haritaların(Dennis, 2022) anlamlı olmasını sağlamaktadır(Beazley 1904).

Geçen süre içerisinde teknolojinin gelişmesi dolayısıyla hesaplamaların daha hassas yapılabilmesi ve dünyanın matematiksel olarak modellenmesi için referans alınan yüzeyde meydana gelen değişiklikler yeni datumların ortaya çıkmasına neden olmuştur(Yang vd. 1999). Türkiye'de en çok kullanılan datumlardan olan İkinci Dünya Savaşı sonrasında oluşturulan 1950 Avrupa Datumu, Hayford (International 1924) elipsoidini(Hayford, 1909) kullanırken ITRF96 datumu ise GRS80 elipsoidini kullanmaktadır(Altamimi ve ark., 2002). Türk harita mühendislerinin çalışmalarını standardize etmek amacıyla 1988 ve 1999 yıllarında kullanılan Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliği'nde, büyük ölçekli haritaların TUD-54 jeodezi ağına dayalı olarak ED50 datumunda üretilmesi zorunlu kılınmış, 2008 yılında ise Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği hükümlerinde(BÖHHBÜY 2005) büyük ölçekli haritalar Türkiye Ulusal GPS Ağı'na dayalı ITRF96 datumunda üretilmesi, 2019 yılından itibaren Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı'na dayalı olarak ITRF96 datumunda üretilmesi kanuni zemine oturtulmuştur(Gullu ve ark., 2017; Erdoğan ve ark., 2018; Öğütcü, 2018).

Orman Genel Müdürlüğü'nün altlıklarının ED50 datumunda olması sebebiyle, orman sınırları içerisinde yapılacak tüm çalışmaların ED50 datumunda da üretilmesi gerekmektedir(Resmi Gazete 2014). Benzer şekilde Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'nün ED50 datumunu kullanması nedeniyle maden sınırları içerisinden geçecek ve izine tabi olacak her türlü işlem için ED50 datumunda koordinatlara ihtiyaç duyulmaktadır. Henüz kadastral altlıkları yenilenmemiş bölgelerde de Kadastro Müdürlüklerinden yalnızca ED50 koordinatlar temin edilebilirken yenileme görmüş komşu mahallenin ise ITRF96 koordinatları temin edilebilmektedir, her iki mahalle sınırları içerisinde gerçekleştirilecek bir uygulama için de datum dönüşümü işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Anlatılan ve diğer tüm benzer durumlar nedeniyle ED50 ve ITRF96 datumları arasındaki dönüşüm işlemleri asla bitmemiştir(Başçiftçi vd. 2008; Kısa vd. 2012; Soycan vd. 2017; Soycan 2008; Yilmaz 2023).

ED50 ve ITRF96 datumları arasındaki dönüşüm işlemleri genellikle iki boyutlu benzerlik(Zeng, 2014; Zeng ve ark., 2018) ve afin(Schaffrin 2008; Sisman 2013) dönüşüm yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir(Yilmaz, 2023). Bu hesaplamalar dönüşüm parametrelerinin temin edilmesini veya üretilmesini gerektirir(Vaníček 2019). Jeodezik doğruluktaki dönüşüm parametrelerin temin edilmesi, bir işlem adımı olması, bölgesel dönüşüm parametrelerinin her zaman istenen doğrulukta olmaması, zamansal ve maddi açılardan bir iş yükü olması, çalışmanın tamamında kullanılamaması gibi sebeplerle hatalara sebep olabilmekte ve projelerin maliyetini artırmaktadır(Kalu vd. 2022; Qin vd. 2020; Ulrich ve Tomas 2020).

Bu tez, dönüşüm parametrelerinin temini sorununu ortadan kaldırmak amacıyla, Türkiye coğrafi sınırları içerisinde, jeodezik doğrulukta koordinat dönüşümü yapan klasik datum dönüşüm hesaplamalarını(Ansari ve ark., 2017; Erdoğan ve ark., 2018) ve yapay sinir ağları(Konakoglu ve ark., 2016; Elshambaky ve ark., 2018; Konakoglu, 2020a) metodolojisini kullanan modellerin geliştirilmesi ve bunların kullanıcılara sunulmasını hedeflemektedir.

Tez kapsamında yapılacak çalışmalarda ilk karşılaşılan problem Türkiye'de kullanılan koordinatların UTM projeksiyonunda olması nedeniyle 7 farklı dilimin bulunması ve bu dilimlerin her birinde aynı koordinatların kullanılmasıdır(Yildirim ve Kadi, 2021). Bir noktanın hangi dilimde olduğu dilim orta meridyeni belirtilmediği sürece hiçbir suretle belirlenmez. Bu problemi ortadan kaldırmak için Türkiye'nin tamamını tek bir dilimde ifade edebilme yeteneğine sahip LKK Projeksiyonu kullanılmıştır(Snyder ve Voxland, 1989;

Grafarend ve Okeke, 2007; Jenny ve Šavrič, 2017; Yildirim ve Kadi, 2021). Doğu batı yönünde uzanan ülkeler için ideal olan bu projeksiyon karayolu ve enerji nakil hattı gibi birden fazla dilimde koordinatların hesaplanması gereken projelerde aktif olarak kullanılmaktadır.

Haritacılık faaliyetlerinin amaçlarından birisi de yapılan ölçüm ve hesaplamaların en doğru şekilde yapılmasıdır. Bu amaca kullanılan veya üretilen ölçü ve hesaplamaların en az hata içerecek şekilde yapılması ile ulaşılır(Yang, 1999; Qin ve ark., 2020). Bu tez kapsamında, gerçekleştirilecek olan iki boyutlu koordinat dönüşüm işlemleri Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Yönetmeliği'nde yer alan formüller kullanılarak ±9cm karesel ortalama hata(BÖHHBÜY 2005) kriteri referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Uyuşumsuz ölçüler, t-testi(Dilmaç ve Şişman 2023; Hekimoğlu 1997) ve robust(Huber ve Ronchetti, 2009) yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Noktaların koordinat dönüşümleri gerçekleştirilirken en düşük karesel ortalama hatayı verecek ve test noktalarında gerçek koordinat ile en az fark ile işlemleri gerçekleştirebilen algoritmalar üretilmiştir.

Tez kapsamında, ortak noktaları kullanarak dönüşüm parametrelerinin hesaplandığı klasik yöntemlerle dönüşüm yapan algoritmalar(Watson, 2006) optimize edilmiş(Erdoğan ve ark., 2018), bu yöntemlere alternatif olarak Lineer Regresyon(Amans ve ark., 2013) ve Multi Linear Perceptron(Tierra ve ark., 2008; Konakoglu, 2021) gibi makine öğrenmesi modelleri geliştirilmiştir. Dışarıdan herhangi bir parametre temini yapılmadan istenen jeodezik doğrulukta dönüşüm işlemlerini gerçekleştiren algoritmalar üretilerek birbirleri ile kıyaslanmış ve en başarılı sonuçları veren yöntemler belirlenmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Özetle, bu tez Türkiye ölçeğinde ED50–ITRF96 (2005.0) datum dönüşümünü hem klasik koordinat dönüşüm algoritmaları hem de makine öğrenmesi tabanlı yöntemleri bütünleşik bir yapı içinde kullanarak, dışarıdan dönüşüm parametresi teminine ihtiyaç duymadan gerçekleştirebilen ilk kapsamlı model olma özelliğini taşımaktadır. Geliştirilen İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli (UDDM), ülke geneli ve nokta bazlı optimizasyon yaklaşımını aynı anda uygulayarak, BÖHHBÜY kapsamında tanımlanan ±9 cm jeodezik doğruluk kriterini sağlamaktadır.

Model, LKK projeksiyonunun Türkiye'nin tüm coğrafi alanında UTM projeksiyonundaki 3° dilim problemine çözüm getirmesi, farklı dönüşüm modellerinin (TUM, TUTGA, CORS, ML) senkronize olarak çalışması ve sonuçların hem masaüstü hem web hem de mobil platformlarda kullanıcıya sunulabilmesi açısından özgündür.

Ayrıca, çalışmada önerilen nokta bazlı model yaklaşımı, ulusal ölçekte tek tip dönüşüm parametresi kullanımının sebep olduğu bölgesel bozulmaları minimize ederek, yerel uyum–ulusal genelleme dengesini korumaktadır. Bu yönüyle hem ulusal hem de uluslararası uygulamalarda uyarlanabilir, esnek ve sürdürülebilir bir dönüşüm çözümü sunmaktadır.

1.1. Problemin Tanımı

Günümüz mekânsal bilgi altyapısının güvenilirliği ve sürdürülebilirliği, kullanılan coğrafi verilerin doğruluğuna, tutarlılığına ve birbirleriyle uyumuna doğrudan bağlıdır. Özellikle mühendislik projeleri, coğrafi bilgi sistemleri, şehir planlama, afet yönetimi ve altyapı yatırımları gibi uygulamalarda, koordinat verilerinin hatasız ve uyumlu olması büyük önem taşımaktadır. Ancak Türkiye'de tarihsel olarak farklı dönemlerde farklı jeodezik referans sistemlerinin yani datumların kullanılmış olması, bu verilerin birbiriyle olan entegrasyonunda ciddi uyumsuzluklara ve doğruluk kayıplarına neden olmaktadır. Bu durum, veri kalitesini düşürmekte, mühendislik uygulamalarında hatalara yol açmakta ve kamu kaynaklarının etkin kullanılmasını engellemektedir.

Türkiye'de koordinat sistemleri açısından en çok karşılaşılan uyumsuzluk, ED50 ile ITRF96 datumları arasında gerçekleşen dönüşüm ihtiyacıdır. 1988 ve 1999 yıllarında, büyük ölçekli harita üretiminde temel referans olarak TUD-54 jeodezik ağına dayalı ED50 datumunun kullanılması yasal bir zorunluluk hâline getirilmiştir. Bu dönemde üretilen haritalar, kamu kurumlarının altyapı planlama, taşınmaz yönetimi ve arazi kullanım planlaması gibi birçok alandaki temel veri setlerini oluşturmuştur. Ancak 2005 yılında yürürlüğe giren Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği ile birlikte, Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı'na dayalı ITRF96 datumuna geçilmesi zorunlu hâle gelmiştir. Bu geçiş süreci, harita üretiminde farklı datumların eş zamanlı olarak kullanılmasına neden olmuş, bu da veriler arasında dönüştürme ihtiyacını doğurmuştur.

Özellikle 2019 yılından sonra, tüm kamu kurum ve kuruluşlarının ITRF96 referans sistemine geçişiyle birlikte, ED50 datumunda üretilmiş eski haritaların ve mühendislik verilerinin ITRF96 sistemine dönüştürülmesi kaçınılmaz hâle gelmiştir. Ancak bu dönüşüm işlemleri, teknik anlamda bazı ciddi problemleri de beraberinde getirmektedir. Bunların başında, dönüşüm işleminde elde edilmesi gereken doğruluk seviyesinin sağlanamaması gelmektedir. Mevzuat uyarınca, iki datum arasında yapılacak dönüşümün ±9 cm karesel

ortalama hata sınırları içerisinde olması gerekmektedir. Bu seviye, jeodezik doğrulukta dönüşüm kriteri olarak kabul edilmektedir. Dönüşüm işlemlerinde kullanıcılar tarafından dönüşüm parametreleri gerektirmeyen ülkemizde de sıkça kullanılan EPSG kodlu dönüşüm yöntemi akla gelebilir. Ancak pratikte EPSG kodlu dönüşüm parametreleri üzerinden CAD ve GIS yazılımlarında yapılan otomatik dönüşümlerde, çoğu zaman ±1–2m arasında hatalar meydana gelmekte ve BÖHHBÜY kapsamında tanımlanan standartları karşılamamaktadır.

Bu doğruluk sorunlarının temelinde yatan en önemli iki teknik problem şunlardır:

1. Bölgesel dönüşüm parametrelerinin sınırlayıcılığı: ED50–ITRF96 dönüşüm işlemleri için kullanılan parametrelerin bölgesel karakter taşıması, her çalışma bölgesi için özgün dönüşüm parametrelerinin üretilmesini gerektirmektedir. Bu da ilgili bölgede yeterli sayıda güvenilir ve jeodezik doğrulukta ortak nokta tespitini zorunlu kılar. Ancak Türkiye'nin çok çeşitli topoğrafik ve yerleşim yapısı dikkate alındığında, bu noktaların temini her zaman mümkün olamamakta, sağlanan parametreler de yalnızca sınırlı alanlarda geçerliliğini korumaktadır. Parametrelerin başka bölgelere uygulanması, dönüşümde ciddi sapmalara neden olmaktadır. Bu durum dönüşüm sürecini bölgesel, operatör bağımlı, zaman alıcı ve maliyetli bir hâle getirmektedir.

2. Üç boyutlu dönüşümlerde yükseklik bileşenine dair duyarlık eksikliği: Türkiye'de ED50 datumu için yüksek doğrulukta tanımlanmış bir jeoid modeli bulunmamaktadır. Bu durum, özellikle üç boyutlu dönüşüm işlemlerinde yükseklik bileşeninde ciddi hata payları ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Örneğin, GNSS ile elde edilen elipsoidal yüksekliklerin ED50'ye göre jeoit yüksekliklerine dönüştürülmesi sırasında ortaya çıkan model hataları, uygulamalarda desimetre mertebesinde sapmalara neden olabilmektedir(Aktug ve ark., 2011). Bu tür hatalar, yol, baraj, tünel, altyapı gibi projelerde ciddi mühendislik hatalarına yol açabilecek düzeydedir. Bu nedenle, üç boyutlu dönüşüm işlemleri yerini daha çok iki boyutlu yatay dönüşümlere bırakmakta, yükseklik bileşeni ayrı modellemelerle ele alınmaktadır.

Yukarıda açıklanan nedenlerle, Türkiye genelinde uygulanabilir, bölgesel olmayan, parametre teminine gerek bırakmayan, homojen yapıda bir iki boyutlu datum dönüşüm modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir model, konumdan bağımsız olarak, harita veya mühendislik verilerinin hangi bölgede üretildiğine bakılmaksızın, doğrudan ve hızlı bir şekilde yüksek doğrulukla ED50–ITRF96 dönüşümünü sağlayabilmelidir. Bu yapı sayesinde hem zaman hem de maliyet açısından büyük tasarruf sağlanacak, aynı zamanda dönüşüm sürecinin otomatik ve güvenilir bir şekilde yürütülmesi mümkün olacaktır.

Ayrıca Türkiye'nin UTM projeksiyon sistemine göre 7 farklı dilime bölünmüş olması, dönüşümde ilave bir karmaşıklık yaratmaktadır. Aynı koordinat değerleri farklı UTM dilimlerinde farklı fiziksel konumları temsil edebilmekte, bu da dilim numarası bilgisine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Ek olarak UTM projeksiyonu konumsal olarak birden fazla dilimde yer alan projelerin harita çizimlerinde karışıklıklara neden olabilmektedir. UTM sisteminin bu bölgesel yapısı nedeniyle, dönüşüm yapılırken hangi dilimde işlem yapılacağının kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu da dönüşüm sisteminin genel geçer bir model olmasını zorlaştırmaktadır. Bu sorunu aşmak için, çalışmalarda UTM yerine LKK Projeksiyonu tercih edilmekte, böylece Türkiye coğrafyasını tek bir düzlemde ifade edebilme imkânı sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye'de tarihsel olarak kullanılan farklı datum sistemlerinin neden olduğu uyumsuzlukların ortadan kaldırılabilmesi ve bu verilerin günümüz mühendislik standartlarında, yasal düzenlemelere uygun olarak yüksek doğrulukla dönüştürülebilmesi için, kapsayıcı, merkezi, parametrik bağımsız ve yüksek doğruluklu bir datum dönüşüm modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir model, kullanıcıların dönüşüm parametresi üretmesine gerek kalmadan, doğrudan koordinat verisi üzerinden ED50-ITRF96 dönüşümünü gerçekleştirecek, verilerin kurumsal ve ulusal düzeyde entegrasyonuna katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda mühendislik uygulamalarının doğruluğunu artırarak, kaynak kullanımında verimlilik ve mekânsal verilerde sürdürülebilirlik sağlayacaktır.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'de tarihsel olarak farklı datumlarda (ED50 ve ITRF96) üretilmiş harita ve koordinat verileri arasındaki uyumsuzluğu ortadan kaldırmak, bu verilerin günümüz jeodezik doğruluk standartlarına uygun biçimde güvenilir ve otomatik olarak dönüştürülmesini sağlayacak Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli (UDDM)'ni geliştirmek ve uygulanabilirliğini ortaya koymaktır.

Bu kapsamda, dönüşüm parametrelerinin bölgesel sınırlılıkları, yüksek maliyetli veri temin süreçleri ve üç boyutlu dönüşümlerde yükseklik bileşenine dair duyarlık eksiklikleri gibi mevcut sorunları aşabilecek, parametre temininden bağımsız, yüksek doğrulukta, bölgesel olmayan ve sürdürülebilir bir dönüşüm altyapısının oluşturulması hedeflenmektedir.

Geliştirilecek model, Türkiye'nin tamamını kapsayan yapısıyla, klasik koordinat dönüşüm yöntemleri (benzerlik, afin, polinom vb.) ile makine öğrenmesi tabanlı yaklaşımları (Yapay Sinir Ağları, Çok Katmanlı Algılayıcı, Kriging, TPS vb.) bir arada kullanacak, böylece hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesini mümkün kılacaktır. Ayrıca, 3° UTM projeksiyonunun dilim geçişlerinden kaynaklanan belirsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla (LKK) projeksiyonu kullanılacaktır.

Modelin başarısı, BÖHHBÜY kriterlerine göre (RMSE ≤ ±9 cm, maksimum düzeltme ≤ 14 cm, her 200 km²'de en az 4 ortak nokta) test edilecek; masaüstü, web ve mobil platformlarda kullanıcı dostu arayüzlerle erişilebilir hâle getirilecektir.

Bu amaca ulaşmak için, çalışmada aşağıdaki temel adımlar izlenecektir:

1. Projeksiyon sisteminin standartlaştırılması: Türkiye'de yaygın olarak kullanılan UTM projeksiyon sisteminin 3°'lik dilim yapısı, dönüşüm işlemlerinde önemli bir belirsizlik kaynağıdır. UTM sisteminde aynı koordinat değerleri, farklı dilimlerde farklı konumları ifade edebilmekte ve bu durum veri bütünlüğünü tehdit etmektedir. Bu nedenle çalışmada dönüşüm işlemleri, UTM dilimlerinden bağımsız olarak tek bir düzlemde ifade edilebilen LKK Projeksiyonu kullanılarak gerçekleştirilecektir. LKK projeksiyonu, doğu-batı yönünde geniş bir alana yayılan Türkiye coğrafyası için uygun yapısı sayesinde dönüşüm işlemlerini mekânsal olarak homojen hâle getirecektir.

2. Yöntem çeşitliliği ve kıyaslama: Dönüşüm modeli yalnızca klasik yöntemlerle (iki boyutlu benzerlik dönüşümü, afin dönüşüm gibi) sınırlandırılmayacaktır. Aynı zamanda makine öğrenmesi teknikleri de bu süreçte kullanılacaktır. Özellikle Yapay Sinir Ağları ve Çok Katmanlı Algılayıcılar gibi modellerle dönüşüm parametrelerinin doğrudan veri üzerinden öğrenilmesi ve modellenmesi sağlanacaktır. Böylece dönüşüm algoritmaları hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri temsil edebilecek esnekliğe sahip olacaktır.

3. Parametresiz dönüşüm altyapısı: Geliştirilecek sistemde kullanıcıların dönüşüm işlemi yapabilmesi için herhangi bir dönüşüm parametresi temin etmesine gerek kalmayacaktır. UDDM, Türkiye'nin coğrafi sınırları içerisindeki tüm koordinat verileri için dönüşüm işlemlerini jeodezik doğrulukta, hızlı ve güvenilir şekilde gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanacaktır. Bu özellik, mevcut uygulamalarda büyük zaman ve kaynak kayıplarına neden olan "parametre temini" aşamasını tamamen ortadan kaldıracaktır.

4. Modelin doğruluk testleri: Geliştirilen dönüşüm modellerinin performansı, BÖHHBÜY'nde belirtilen doğruluk kriterleri, klasik ve robust uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemleri esas alınarak değerlendirilecektir. Bu kapsamda, karesel ortalama hata değerinin

±9 cm, maksimum koordinat düzeltmesinin 14 cm ve her 200 km² için en az dört orta nokta kriteri dikkate alınacaktır. Bu değerlendirme süreci, modelin mevzuat uyumunu ve sahada uygulanabilirliğini garanti altına alacaktır.

5. Yazılım entegrasyonu ve kullanıcıya sunum: Tüm dönüşüm algoritmaları, kullanıcı dostu bir arayüze sahip olacak şekilde tek bir yazılım paketi içinde toplanacaktır. Bu yazılım, kullanıcıların coğrafi verilerini hızlıca yükleyerek otomatik dönüşüm almasını sağlayacak, aynı zamanda hata analizi ve kalite kontrol imkânları da sunacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma ile Türkiye genelinde uygulanabilirliği kanıtlanmış, yüksek doğrulukta, parametrik bağımsız, hızlı, kullanıcı dostu ve sürdürülebilir bir datum dönüşüm modelinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Böyle bir modelin uygulanmasıyla, harita verileri arasında tutarlılık sağlanacak, kurumlar arası veri entegrasyonu kolaylaşacak ve mühendislik projelerinde jeodezik doğruluk artırılarak operasyonel verimlilik sağlanacaktır. Aynı zamanda bu model, dışa bağımlı dönüşüm parametreleri veya ticari yazılım çözümleri olmadan, tamamen yerli ve bilimsel temellere dayalı bir sistem sunarak, Türkiye'nin ulusal coğrafi veri altyapısına stratejik bir katkı sağlayacaktır.

1.3. Türkiye'de Haritacılık Faaliyetleri

Modern Türk haritacılığı, 1895 yılında kurulan Taksim-i Arazi komisyonu ile başlamıştır. Osmanlı İmparatorluğu'nda 19. Yüzyılın sonlarına kadar haritacılık faaliyetleri oldukça yavaş ilerlemiştir. Ancak 1880'li yıllarda Osmanlı Genelkurmayı içerisinde harita ve fen işleri için bir şube kurulmuştur. Bu dönemde Alman subay Colmar Baron von Goltz'un katkıları ile haritacılık faaliyetleri hızlanmış ancak yeterli gelişme sağlanamamıştır. 1888-1895 yılları arasında ilk ciddi haritacılık çalışması gerçekleştirilerek İstanbul ve Karadeniz Boğazı'nın 1:100 000 ölçekli haritası üretilmiştir. Ek olarak Rusların ve Avusturyalıların daha önce hazırladıkları haritaların kopyaları kullanılarak çalışmalar yapılması denense de sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir (Aygün, 1980b, 1980c, 1980a).

1890'lı yıllarda Mehmet Şevki Ölçer ve diğer Osmanlı subayları, Paris'te jeodezi eğitimlerini tamamlayıp Türkiye'ye dönerek haritacılık çalışmalarını modern jeodezi teknikleri ile geliştirmeyi amaçlamıştır. Özellikle Mehmet Şevki Paşa, I. Ve II. derece niregi çalışmaları ve astronomik gözlem yöntemlerini Paris'teki eğitimleri sırasında öğrenerek Osmanlı modern haritacılığının temellerini atmıştır(Aygün, 1980b, 1980c, 1980a).

1895 yılında kurulan Taksim-i Arazi komisyonu, Türk ve Fransız subayların ortak çalışmaları ile baz ve nirengi esaslarına dayalı olarak harita yapım faaliyetlerine başlamıştır. Eskişehir ve Ağapınar bölgelerinin 1:50 000 ölçekli haritaları bu dönemde üretilmiştir. Bu haritalar İngiliz Albay Clark tarafından hesaplanan 1880 elipsoidini referans almıştır(Aygün, 1980b, 1980c, 1980a).

1900'lü yıllara yaklaşıldığında, Osmanlı ordusu içerisinde yer alan yabancı uzmanların görevleri sona erdirildiğinden haritacılık faaliyetleri de bir süre duraklamıştır. Ancak 1909 yılına gelindiğinde II. Meşrutiyet'in ilanıyla beraber haritacılık faaliyetleri yeniden hız kazanmıştır. Bu dönemde ülkenin 1:25 000 ölçekli haritalarının üretilmesi için çalışmalara başlanmış ve Bakırköy bazı ölçülerek bu bölgedeki nirengi çalışmaları yapılmıştır(Aygün, 1980b, 1980c, 1980a). Bonne projeksiyon sisteminin kullanılmaya başlanması ile teknik olarak daha ileri seviyeye ulaşan haritacılık faaliyetleri ayrıca hidrografi alanında da gelişmeler göstermiştir(Algül, 1985). Aliağa ve İzmir limanlarının haritaları üretilmiş ve Osmanlı denizcilik faaliyetlerinde kullanılmak üzere haritalar bastırılmıştır.

1911-1914 yılları arasında Osmanlı Devleti'nin sınır bölgelerinde askeri amaçlı olarak haritacılık faaliyetleri sürdürülmüştür. Edirne'de yeni baz ölçümleri yapılarak Trakya bölgesinde nirengi ağları kurulmuştur(Aygün, 1980b, 1980c). Ayrıca Zonguldak, İzmir ve Rumeli Karaburun gibi önemli limanlar için hidrografik haritalar üretilmiştir(Algül, 1985).

1921 yılında İstanbul'da yer alan Harita Dairesi Ankara'ya taşınarak bu süreçte Türk ordusunun ihtiyaç duyduğu haritalar üretilmiştir. 1925 yılında Harita Genel Müdürlüğü'nün kurulmasıyla Türk haritacılığı kurumsal bir kimliğe kavuşmuş olup haritacılık alanında modern tekniklerin kullanılması amaçlanmıştır(Aygün, 1980c, 1980a). Bu dönemde üretilen 1:200 000 ölçekli haritalar Türkiye'nin genel jeodezik yapısını belirlemek adına önemli bir kaynak olmuştur(Algan, 1963; Aygün, 1980b, 1980c).

Cumhuriyetin ilanından sonra, şehir planlaması gibi alanlarda haritacılık faaliyetleri etkin olarak kullanılmıştır. İstanbul ile İzmir gibi büyük şehirlerin detaylı haritaları üretilmiştir. 1930'lu yıllardan itibaren, fotogrametri ve diğer modern haritacılık yöntemleri kullanılarak şehirlere ait imar planları hazırlanmıştır. 1950 yılında üretilen 1:5 000 ölçekli İstanbul'a ait fotogrametrik harita, kent planlamasında önemli bir rol oynamıştır(Demircan, 1982; Koyuncu, 1982; Kayra, 1990).

1950 yılına gelindiğinde, Türkiye'de haritacılık faaliyetleri hız kazanmış ve ulusal jeodezi ağları oluşturulmuştur. Bu jeodezik ağlar, o dönemde Avrupa'nın kullanmakta

olduğu ED50 datumuna bağlanarak TUD-54 datumu oluşturulmuştur. Türkiye Ulusal Nirengi Ağı kurularak yatay ve düşey kontrol noktaların sayısı artırılmıştır. Böylece haritacılık faaliyetlerinde hassas ölçüm değerlerinin üretilmesi amaçlanmıştır(Hkmo, 1975; Aksoy, 1987, 1988). Aynı dönemde fotogramatrik yöntemlerin yaygınlaşması sonucunda, hava fotografları kullanılarak 1:25 000 ölçekli topografik haritalar üretilmiştir. Bu haritalar, şehir planlaması ve altyapı projelerinde yaygın olarak kullanılmıştır(Kinbay, 1938; Koyuncu, 1982).

1970'li yıllarda Türkiye Ulusal Nivelman Ağı devreye alınmasıyla yükseklik ölçümleri için gerekli olan hassasiyet yakalanmış ve yükseklik bilgisinin önem arz ettiği projeler için referans olacak jeodezik ağ kullanılmaya başlanmıştır(Ayhan ve Demir, 1992). 1980'lerde Türkiye Ulusal Gravite Ağı kurularak ülke çapında yerçekimi ivmesi değerleri ölçülerek jeodezik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

1990'lı yıllarda Türkiye, GPS teknoloji ile tanışmıştır(Kiliçoğlu, 2004a). Bu teknolojinin jeodezik faaliyetlere entegre edilmesi amacıyla 594 noktadan oluşan Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı kurulmuştur. TUTGA, ITRF datumunu kullanmaktadır. 2009 yılında Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı – Aktif projesi başlatılarak 181 sabit GNSS istasyonu yardımıyla Türkiye coğrafi sınırları ile Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti coğrafi sınırları içerisinde GPS, GLONASS ve diğer uydu sistemleriyle entegre olarak çalışarak ITRF96 datumunda milimetrik doğrulukta koordinat hesaplanması mümkün kılınmıştır(Çelik ve Marangoz, 2005; Öğütcü, 2018).

1.3.1. TUD54

TUD54, Türkiye'nin ilk ulusal jeodezik referans sistemi olup, ülke genelindeki konumlandırma ve harita üretiminde uzun yıllar boyunca temel datum olarak kullanılmıştır. 1940'lı yılların başlarında başlatılan Türkiye Ulusal Nirengi Ağı çalışmaları kapsamında, ülke genelinde yaklaşık 786 adet 1. derece nirengi noktası oluşturulmuştur. Bu noktalar arasında doğrultu, baz ve astronomik ölçüler yapılmış; ölçülerin dengelemesi ise 1954 yılında ABD Ordu Harita Servisi (AMS) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dengeleme işlemi sırasında LKK projeksiyon kullanılmış ve dünyanın ilk ticari bilgisayarı olan UNIVAC I ile hesaplamalar yapılmıştır.

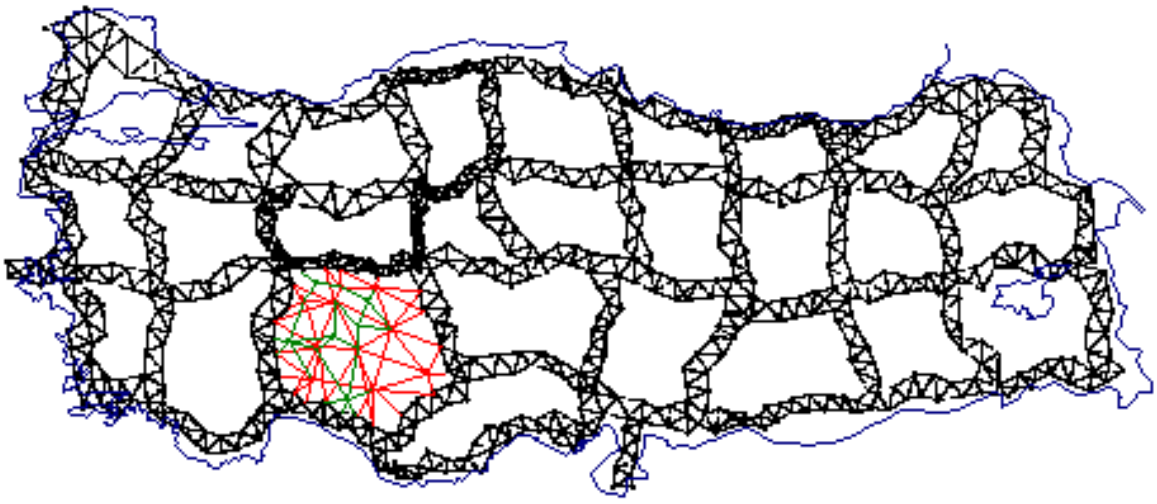
Meşedağ noktası, ağın başlangıç noktası olarak alınmış ve Türkiye'nin ortasında yer alan bu nokta üzerinden ED50'ye geçiş süreci kurgulanmıştır. TUD54'ün referans noktası

olan Meşedağ'ın astronomik koordinatları Laplace noktalarıyla ilişkilendirilmiş, Avrupa Datumu ile uyum sağlamak amacıyla projeksiyon merkezi kaydırılarak farklar minimize edilmiştir. Bu yöntemle oluşturulan TUD54 sistemi, ED50'ye dönüştürülmüş Meşedağ Datumu olarak da tanımlanabilir.



Şekil 1. Yatay Kontrol Ağı poligon zincirleri ve Meşedağ noktası (Link-1)

Yersel ölçü tekniklerine ve klasik nirengi ağına dayalı olan TUD54 sistemi, teknolojik gelişmelere paralel olarak zamanla yetersiz kalmıştır. GPS teknolojisinin yaygınlaşması, uzay tabanlı ölçüm sistemlerinin gelişmesi ve Türkiye'nin tektonik hareketliliği gibi nedenlerle, TUD54 zamanla modern uygulamalar için yetersiz hâle gelmiştir. Bu sistemin duyarlılığı yaklaşık 1:200.000 oranında olup(Erokan, 1966) modern GNSS uygulamalarında gerekli olan santimetre altı doğrulukları sağlayamamaktadır(Aktug ve ark., 2011).



Şekil 2. Türkiye temel nirengi ağı (Link-1)

Günümüzde TUD54, ED50'nin temelini oluşturmakta ve hâlen bazı eski haritalar ve mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak ED50'nin dahi artık yerini ITRF96 tabanlı modern datumlara bırakmasıyla, TUD54 sadece tarihsel bir referans olarak varlığını sürdürmektedir. TUD54 sistemine dayalı haritalar, dönüşüm algoritmaları aracılığıyla modern sistemlere aktarılmakta ve geçmişle uyumluluk bu dönüşüm modelleriyle sağlanmaktadır. TUD54'ün önemi, Türkiye'nin modern koordinat sistemlerine geçiş sürecindeki temel yapı taşlarından biri olmasıdır.

1.3.2. TUREF

TUREF, Türkiye'nin modern, yüksek duyarlıklı, ITRS tabanlı ulusal jeodezik referans çerçevesidir. 2005 yılında BÖHHBÜY ile birlikte uygulamaya alınmış olan bu sistem, GPS teknolojisiyle elde edilen verilerin ITRF standartlarında değerlendirilmesini mümkün kılar. TUREF'in amacı, ED50 gibi klasik ve yersel datum sistemlerinden farklı olarak, dinamik, zamana bağlı ve yüksek çözünürlüklü bir referans altyapısı oluşturmaktır.

TUREF ismi, Türkiye ve "reference frame" kavramlarının birleşiminden türetilmiş olup, hem Türkçe hem de İngilizce anlam ifade etmektedir. Örneğin Avrupa için EUREF, Afrika için AFREF gibi isimlendirmelere paralel olarak Türkiye için de TUREF kullanılmıştır. TUREF, referans epok kavramını içeren ilk ulusal sistemdir. Bu yönüyle özellikle Marmara Depremi (1999) gibi büyük tektonik olaylardan sonra meydana gelen yer değişimlerinin modellenmesini mümkün kılar.

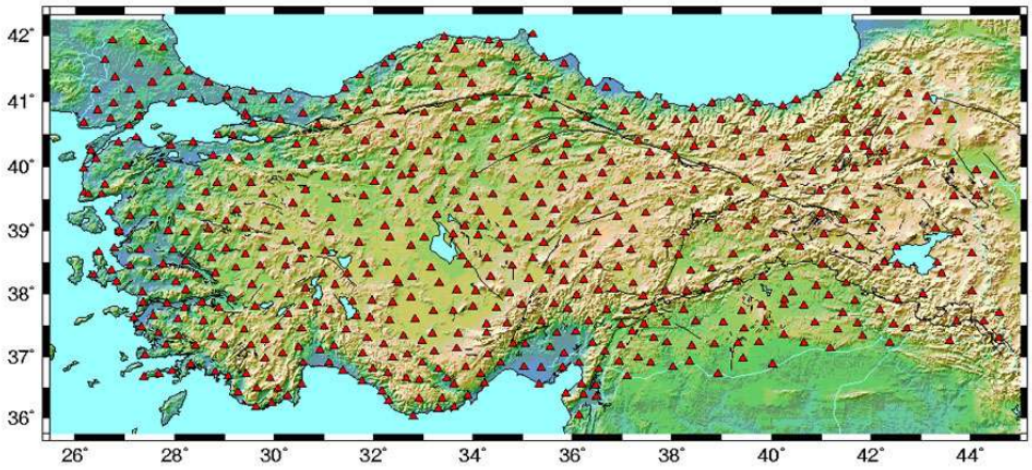
TUREF, ITRF'nin farklı sürümleriyle (örneğin ITRF-2000, ITRF-2005, ITRF-2008) uyumlu olup, bu sürümlerin Türkiye özelinde tek bir sistemde toplanmasını sağlar. Böylece zaman içinde güncellenen koordinatlar tutarlılıkla kullanılabilir. Ayrıca geçmişte ED50 gibi sistemlerle üretilmiş haritalarla uyumlu bir şekilde dönüşüm sağlanarak arşiv verilerinin kullanım süresinin uzatılması hedeflenmiştir.

TUREF'in oluşturulmasıyla birlikte, modern koordinat sistemlerinde çalışan mühendislik, tapu-kadastro, altyapı, ulaşım, enerji ve çevre gibi alanlardaki uygulamalar için santimetre düzeyinde doğruluk sağlanmıştır. Sistem, hem TUTGA hem de TUSAGA aktif ile entegre çalışmakta, ülke çapındaki sabit GNSS istasyonları ve temel GPS ağı verilerini tek çatı altında değerlendirmektedir. Türkiye'nin jeodezik veri üretimi ve yönetiminde

merkezi rol üstlenen TUREF, haritacılık ve konumsal veri analizlerinin omurgasını oluşturmaktadır(Aktug ve ark., 2011).

1.3.3. TUTGA

TUTGA, ülkemizin modern jeodezik altyapısının temelini oluşturan ve GNSS tabanlı konumlandırma için referans noktaları sağlayan ulusal bir ağdır. 1997–1999 yılları arasında Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından oluşturulmuş ve sonraki yıllarda yapılan revizyon ölçümleriyle güncellenmiştir. TUTGA'nın temel amacı, ED50 gibi yersel datumların eksiklerini gidermek, özellikle tektonik hareketlerin yoğun olduğu Türkiye gibi bir ülkede zamana bağlı yüksek duyarlıklı koordinat sistemi ihtiyacını karşılamaktır.



Şekil 3. TUTGA Noktaları(Link-4)

TUTGA, ITRS tabanlı bir sistemdir ve dünya genelinde geçerli olan ITRF sisteminin Türkiye'ye özgü bir uygulamasıdır. Bu sistemle, sabit GPS noktaları belirlenmiş ve bu noktaların konumları çok yüksek duyarlıkla hesaplanmıştır(Öğütcü, 2018). TUTGA'nın ITRF tabanlı yapısı, özellikle 1999 Marmara Depremi gibi büyük yer değiştirme olaylarının koordinat sistemine etkisinin izlenmesini mümkün kılmıştır. Aynı zamanda, bu sayede Türkiye'deki GNSS uygulamaları uluslararası referans sistemleri ile doğrudan ilişkilendirilebilir hâle gelmiştir(Ansari vd. 2017; Ersoy 2019).

TUTGA noktaları, hem konumlama hem de sıklaştırma ağlarının hesaplanması için temel teşkil etmekte; tüm mühendislik projelerinde referans verisi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, TUTGA'ya dayalı olarak oluşturulan sıklaştırma ağları, büyük ölçekli harita üretimi,

tapu kadastro uygulamaları, ulaştırma projeleri ve afet yönetimi gibi birçok alanda güvenilir veri kaynağı sağlamaktadır.

2005 yılında yürürlüğe giren Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği, TUTGA'yı ülke genelindeki tüm harita üretim faaliyetlerinin temel referans sistemi olarak tanımlamıştır. Bu sayede, harita üreticileri artık verilerini ED50 yerine TUTGA temelli ITRF96 koordinatları üzerinden üretmekte ve teslim etmektedir.

TUTGA, zamanla TUSAGA-aktif gibi daha dinamik GNSS sistemleri ile desteklenmiş ve daha hızlı, kesintisiz ve gerçek zamanlı konumlama hizmetlerinin temeli hâline gelmiştir. Ancak TUTGA'nın sabit yapısı, yüksek duyarlıklı sabit referans noktaları sağlaması açısından hâlâ büyük önem taşımaktadır. Özellikle TUSAGA-aktif sisteminin doğruluğu ve güvenilirliği, TUTGA'nın temel koordinat ağına dayandırılmaktadır.

1.3.4. TUSAGA Aktif

TUSAGA-aktif (CORS-TR), Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı – Aktif, gerçek zamanlı kinematik (RTK) konum belirleme olanağı sağlayan, sabit GNSS istasyonlarından oluşan aktif bir referans ağıdır. Proje, 2006 yılında TÜBİTAK Kamu-ARGE desteğiyle İstanbul Kültür Üniversitesi tarafından yürütülmüş ve Harita Genel Komutanlığı ile Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü başta olmak üzere çeşitli kurumların katkısıyla uygulanmıştır.

TUSAGA-aktif'in amacı, ITRF96 tabanlı modern referans sistemleri ile ED50 gibi klasik datumlar arasındaki dönüşüm işlemlerinin yüksek duyarlıkla yapılabilmesini sağlamak ve ülke genelinde gerçek zamanlı, sürekli GNSS hizmeti sunmaktır. Bu kapsamda, Türkiye, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti ve Türk karasularını kapsayacak şekilde 181 adet sabit GNSS istasyonu kurulmuş ve bu istasyonlar yaklaşık 80–100 km aralıklarla yerleştirilmiştir.

TUSAGA-aktif sisteminin en önemli özelliği, GNSS kullanıcılarının gerçek zamanlı düzeltme verisi alarak santimetre hassasiyetinde konum belirleyebilmelerini sağlamasıdır. Bu sistemle, klasik ölçüm yöntemlerinde günler sürebilecek işler saatler hatta dakikalar içinde tamamlanabilmekte; harita, kadastro, inşaat, tarım ve ulaşım gibi birçok sektörde verimlilik artışı sağlanmaktadır.



Şekil 4. Tusaga-Aktif Noktaları

Ayrıca, sistem kapsamında hücresel dönüşüm parametreleri de belirlenmiş, farklı datumlar (özellikle ED50 ile TUREF) arasında dönüşüm yapmak isteyen kullanıcılar için geniş kapsamlı bir dönüşüm altyapısı oluşturulmuştur. TUSAGA-aktif'in hayata geçmesiyle, yüksek duyarlıklı dönüşüm için gerekli olan ortak nokta sayısı ve dağılımı sağlanmış; bu sayede ED50–ITRF96 dönüşümleri için hücresel (grid) tabanlı parametrelerin üretimi mümkün hâle gelmiştir.

TUSAGA-aktif sistemi, 24 saat boyunca çalışan ve sürekli veri kaydeden bir altyapıya sahiptir. İstasyonlar, koordinatları çok hassas olarak belirlenmiş referans noktalarıdır. Bu sistem, kullanıcıların internet üzerinden sisteme bağlanarak gerçek zamanlı düzeltme verisi almasına olanak tanır. TUSAGA-aktif, ayrıca arşiv verisi sağlayarak statik ölçüm yapan kullanıcıların da ihtiyaçlarını karşılamaktadır(Bakici vd. 2017; Lenk vd. 2003; Yurdakul ve Kalaycı 2022).

Bugün itibarıyla, TUSAGA-aktif sistemi sayesinde Türkiye genelinde jeodezik doğrulukta konumlandırma, hem saha hem ofis uygulamalarında kolay, hızlı ve maliyetsiz bir şekilde yapılabilmektedir. Sistem, TUREF ve TUTGA ile entegre olarak çalışmakta, Türkiye'nin çağdaş jeodezik altyapısının vazgeçilmez bir bileşeni olarak işlev görmektedir.

1.4. Datum Dönüşümü İhtiyacının Ortaya Çıkışı

Türkiye'de 1988 ve 1999 yıllarında Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliği'nde belirtildiği üzere, büyük ölçekli haritalar TUD-54 jeodezi ağına dayalı olarak ED50 datumunda üretilmiştir(Aksoy, 1987), 2008 yılında ise Büyük Ölçekli Harita

ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği gereğince Türkiye Ulusal Gps Ağı'na dayalı olarak ITRF96 datumunda üretilmiştir(Kiliçoğlu, 2004b; Çelik ve Marangoz, 2005), 2019 yılından itibaren ise Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı'na dayalı olarak ITRF96 datumunda üretilmeye başlanmıştır(TKGM 2009). Ülke genelinde yapılan her türlü haritacılık faaliyetinde iki farklı datumun kullanılmış olması, datum dönüşümü yapma ihtiyacının ortaya çıkma sebebidir(Ayhan, E. M. ve Barut, 2000; Özlüdemir ve Akçın, 2005; Hacıömeroğlu, 2009).

Türkiye ve dünyada datum dönüşümü işlemi, her iki datumda koordinatları bilinen kullanılacak yönteme göre belirlenen yeterli sayıda ortak noktalanın temin edilmesi veya üretilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Hesaplamalarda 2 boyutlu veya 3 boyutlu benzerlik, afin gibi dönüşüm yöntemleri kullanılmaktadır.

2011 yılında Bahadır AKTUĞ vd. tarafından yapılan çalışmada ED50 datumu ile TUREF arasında 3 boyutlu datum dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, 3 boyutlu datum dönüşüm işlemi için yersel datumda yüksek duyarlılığa sahip bir jeoidin tanımlı olması gerektiği, ED50 datumu için tanımlı tek jeoidin astrojeodezik jeoid olduğu ve bu jeoide ait ED50 datumundaki yükseklikleri, elipsoid yüksekliğine dönüştürmek için yeterli yoğunluk ve duyarlıkta olmadığı ancak helmert dönüşüm yönteminin revize edilerek yükseklik bileşeninin etkisinin azaltığı bir metot ile desimetre mertebesinde karesel ortalama hata ile dönüşüm parametrelerinin hesaplanabileceği ortaya konmuştur(Aktug ve ark., 2011).

Günümüzde iki boyutlu datum dönüşüm işlemleri, datum dönüşümü işleminin gerçekleştireceği bölgede yer alan TKGM'ne bağlı Kadastro Müdürlüklerinden temin edilen onaylı datum dönüşüm parametrelerinin kullanılması ile veya daha önce o bölge için çeşitli kurumlarca üretilmiş olan datum dönüşüm parametrelerinin temin edilerek kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Datum dönüşüm parametrelerinin karesel ortalama hata değerinin ±9 cm olması gerekmektedir(*Büyük ölçekli harita ve harita bilgileri üretim yönetmeliği*, 2005). Fakat temin edilen ortak noktalar ile hesaplanan dönüşüm parametrelerinin karesel ortalama hatası her zaman BÖHHBÜY'de talep edilen aralıkta yer almamaktadır.

GIS programları, EPSG kodları ile daha önceden tanımlanmış olan datum ve projeksiyon bilgilerini kullanarak datumlar arası dönüşüm yapmaktadır. Türkiye için EPSG kodları ile dönüşüm yapılmak istendiğinde TUREF datumu ile WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm işlemleri için doğruluk değeri 1.0 m (Tablo 1) ve ED50 datumu ile TUREF veya WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm işlemleri için doğruluk değeri 2.0 m olarak

elde edilebilmektedir (Tablo 2) ve bu durum BÖHHBÜY'de talep edilen değerleri karşılamamaktadır.,

Tablo 1. TUREF datumu ile WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm

EPSG Kodu	Koordinat Referans Sistemi	Dönüşüm Doğruluğu WGS84	Açıklama
5254-5249	TUREF / TM30-45	1.0 m	Türkiye Ulusal Referans Çerçevesi (TUREF) temel alınarak oluşturulmuş, 30° merkez meridyenli Transvers Merkator projeksiyonu.
2320-2325	ED50 / TM30-45	2.0 m	European Datum 1950 (ED50) temel alınarak oluşturulmuş, 30° merkez meridyenli Transvers Merkator projeksiyonu.

Tablo 2. ED50 datumu ile TUREF veya WGS84 datumu arasında yapılan dönüşüm

EPSG Kodu	Dönüşüm İşlemi	Dönüşüm Doğruluğu
1783	ED50-TUREF	2.0 m

Datum dönüşüm parametrelerinin temin edilmiş olması durumunda çeşitli CAD ve GIS programlarıyla, MATLAB ve Excel gibi sayısal hesaplama yapabilen programlarla veya el ile hesaplama yöntemleriyle dönüşüm işlemleri gerçekleştirilebilmektedir.

İki boyutlu datum dönüşümü parametrelerinin bölgesel olması(Kirici Yildirim ve ark., 2022), bu dönüşüm parametreleri ile yapılan uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi ve dengeleme hesaplamalarında her zaman istenilen karesel ortalama hata değerinin yakalanamaması, datum dönüşüm parametrelerinin temin edilmesi veya üretilmesi işleminin Türkiye'de yapılan haritacılık faaliyetleri için maliyetli olması ve üç boyutlu datum dönüşüm işlemleri için ED50 datumuna ait yükseklik değerlerinin dönüştürülmesinde yeterli duyarlılığın yakalanamaması(Aktug ve ark., 2011) nedenleriyle Türkiye'nin tamamında ED50 ile ITRF96 datumları arasında 3° UTM koordinatlarının iki boyutlu datum dönüşüm işlemlerini gerçekleştirebilecek bir bölgesel olmayan datum dönüşüm modeline ihtiyaç vardır.

1.5. Türkiye'de Kullanılan Datumlar

Datum, yeryüzündeki bir noktanın yatay ve düşey konumunu belirleyip ifade edebilmek için referans alınan yüzeydir. Referans yüzeyi, dünyanın şekil ve boyutunun modellenmesi amacıyla kullanılan elipsoidin ve koordinat sisteminin tanımlanmasını gerektirir. Kullanılacak datumun tanımlanması, her türlü koordinat bilgisi ile gerçekleştirilmiş veya gerçekleştirilecek hesaplama ve uygulamaların birbiri ile uyumlu olmasını sağlar. Bu nedenle Türkiye'de tüm dünyada olduğu gibi haritacılık faaliyetlerine esas olacak ED50, ITRF96 ve WGS84 datumları kullanılmıştır ve kullanılmaktadır.

1.5.1. ED50 Datumu

İkinci Dünya Savaşı yıllarında Almanya, Hollanda, Belçika ve Fransa'nın kullandıkları datumlar birbirinden farklıdır. Savaş sırasında tüm bu toprakları kontrol eden Alman ordusu, haritalama ve datum çalışmalarına hız vermiştir. 1944 yılında Normandiya çıkarmasıyla beraber, ABD ordusu harita servisi, Binbaşı Floyd W. Hough'un yönetiminde Almanların ürettiği bilgi ve belgeleri toplaması için Houghteam olarak anılan bir istihbarat ekibi kurmuştur. 1945 yılının Nisan ayında Thüringen, Saalfeld'de Almanlara ait bir jeodezi arşivi keşfemiştir ve 75 kamyona yakın malzeme Washington'a nakledilmiştir (Powell ve Mühr, 2020).

İşgal altındaki toprakların Alman Haritaları ile birleştirilmesi çalışmalarını yürüten Profesör Erwin Gigas'ın da yakalanarak ABD liderliğinde Orta Avrupa için ortak datum çalışmasına dahil edilmesiyle 1947 yılında ilk ortak datum oluşturulmuştur. Daha sonra çalışmanın kapsamı genişletilerek, diğer ülkelerin de katılmasıyla 1950 yılında tamamlanarak Avrupa Datumu 1950 ismini almıştır(Kettle 2016).

Türkiye Ulusal Nirengi Ağı 1954 yılında Bulgaristan ve Yunanistan'daki 8 noktaya dayalı olarak dengelenerek ED50 datumunda yatay olarak konumlandırılan, Meşedağı'nda çekül sapmasını sıfır ve Dua Tepe noktasına olan astronomik azimutu Laplace azimutu kabul eden elipsoid ile TUD-54 tanımlanmıştır(Aktug ve ark., 2011). TUD-54 ağı, Türkiye'deki jeodezik çalışmaların temelini oluşturmuş ve birçok harita ve mühendislik projesinde referans olarak kullanılmıştır.

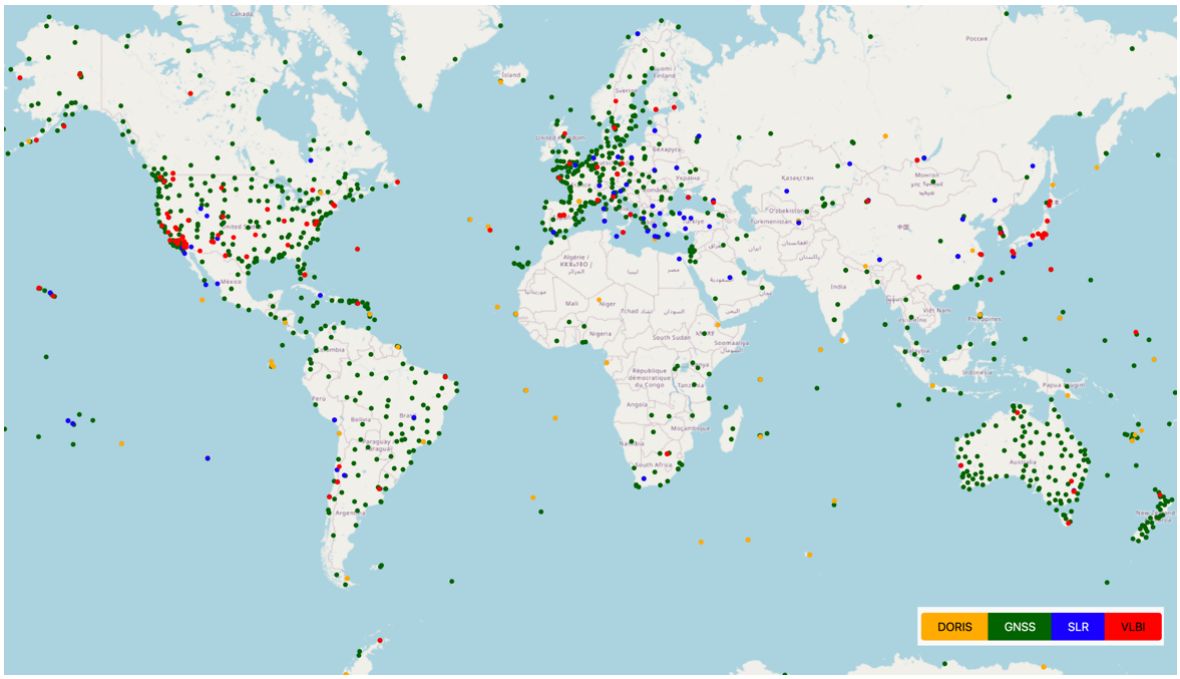
1988 ve 1999 yıllarında Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliğinde Türkiye'de üretilen büyük ölçekli haritaların (1000, 2000, 5000, 10000) TUD-54 jeodezi ağına dayalı ve ED50 datumunda üretilmesi zorunluluğu getirilmiştir(*Büyük ölçekli harita ve harita*

bilgileri üretim yönetmeliği, 2005; Ercan, 2023). Bu yönetmelikler, ülke genelinde harita üretiminde standartların oluşturulması(Soycan ve ark., 2017) ve uyumun sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

ED50 datumu, International 1924 (Hayford 1909) elipsoidini kullanır(Rapp, 1963), ekvator yarıçapını 6378.388 km ve basıklığı 1/297 olarak kabul eder(Hayford, 1909; Moore, 2009). Bu elipsoid, dönemin jeodezik ölçüm ve hesaplamalarında geniş bir kabul görmüş ve Avrupa ülkeleri tarafından ortak referans olarak benimsenmiştir(Moritz, 1984; Rapp, 1991).

1.5.2. ITRF Datumu

ITRF96, uluslararası düzeyde kabul görmüş, dinamik bir küresel koordinat referans sistemi olan Uluslararası Karasal Referans Sistemi'nin 1996 yılına ait resmi çözümüdür. ITRF96, yeryüzündeki noktaların üç boyutlu konumlarını zaman içinde doğrulukla tanımlamak ve takip etmek amacıyla geliştirilmiş, yüksek hassasiyetli ve küresel ölçekte geçerliliği olan bir jeodezik referans sistemidir. Özellikle küresel konumlama sistemleri, jeodinamik araştırmalar, kıtasal hareketlerin izlenmesi ve uluslararası koordinat uyumu açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 5. IERS noktaları

ITRF sisteminin temeli, Dünya'nın üç boyutlu uzayda zamana bağlı olarak tanımlanmasına dayanır. Bu sistem, Uluslararası Yeryüzü Dönme ve Referans Sistemleri Servisi tarafından geliştirilmiş olup(McCarthy ve Petit, 2004), GNSS, VLBI SLR ve DORIS gibi çeşitli uzamsal ölçüm tekniklerinden elde edilen verilerin(Şekil 5) birleşik analizleriyle oluşturulur(Altamimi ve ark., 2002; Altamimi, 2009). ITRF96, bu referans çerçevesinin 1996 yılında yayımlanan versiyonu olup, 1997 yılında resmi olarak duyurulmuştur.

ITRF96'nın bileşenleri, esas olarak Dünya üzerindeki jeodezik sabit istasyonlara ait üç boyutlu yer merkezli jeosantrik koordinatlar ve bu koordinatlara karşılık gelen hız bileşenlerinden oluşur(Drewes, 2009; Seitz ve ark., 2012). Bu istasyonların konumları belirli bir referans epokunda tanımlanır ve zamana bağlı olarak doğrusal hızlarla güncellenir. Yani her bir istasyonun koordinatları, zaman içinde tekil bir sabit değil, doğrusal bir fonksiyon olarak ifade edilir. Bu yaklaşım, levha tektoniği ve yer kabuğu hareketlerinin modellenmesi açısından önem taşır(Rummel ve ark., 2005; Altamimi ve ark., 2016).

ITRF96 datumu, yer merkezli jeosantrik koordinat sisteminde tanımlanır. Koordinat eksenleri sabittir ve Z ekseni Dünya'nın ortalama dönüş eksenine yöneliktir; X ekseni Greenwich ortalama meridyen düzlemine yöneltilmiştir; Y ekseni ise bu iki eksene diktir. Sistemde, sabit bir epokta $\mathrm{X}(\mathrm{t}_0)$ ile tanımlanan koordinatlar, zamana bağlı olarak $X(t) = X(t_0) + V \cdot (t - t_0)$ ifade edilir. Burada $\mathrm{X}(\mathrm{t})$, herhangi bir zamanda istasyonun konumunu; $\mathrm{X}(\mathrm{t}_0)$, referans zamandaki konumunu; V ise hız vektörünü göstermektedir. Bu tanım, ITRF sisteminin dinamik doğasını ve zamana bağlı dönüşüm gereksinimlerini ortaya koyar(Bloßfeld vd. 2025; Küreç vd. 2020; 2020; Liu vd. 2021; Schuh vd. 2002).

GRS80 elipsoidi kullanılan ITRF datumunda ekvator yarıçapı 6378.137 km ve basıklık 1/298.257222101 olarak kabul edilmiştir(Soler ve Han, 2020). Bu elipsoid parametreleri, jeodezik hesaplamalarda kullanılmaktadır(Altamimi vd. 2008; Dawson ve Woods 2010; Dodo vd. 2011).

1.5.3. WGS84 Datumu

WGS84, küresel ölçekte konum belirleme ve haritalama faaliyetlerinde kullanılan jeosentrik tabanlı bir referans sistemidir. ABD Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilmiş olan bu datum, özellikle GPS için temel referans çerçevesi olarak kabul edilmiştir. Dünya'nın şeklini ve boyutlarını üç boyutlu Kartezyen koordinat sistemi içinde tanımlayan

WGS84, günümüzde en yaygın kullanılan küresel jeodezik referans sistemidir(Hofmann-Wellenhof ve ark., 2007).

WGS84'ün tarihçesi, WGS60, WGS66 ve WGS72 gibi daha önceki küresel datuma dayanan sistemlerin geliştirilmesiyle başlamıştır. 1984 yılında yayınlanan WGS84, bu tarih öncesindeki sistemlerden farklı olarak, Dünya'nın kütle merkezi ve ortalama dönüş ekseni etrafında tanımlanmış, dinamik ve yüksek hassasiyetli bir sistemdir. Bu datum, yerküreyi matematiksel olarak tanımlamak için elipsoid yaklaşımı kullanır ve zamanla gelişen gözlem teknikleriyle güncellenmiştir.

WGS84, küresel ölçekte konum belirleme ve haritalama çalışmaları için geliştirilmiş bir jeodezik referans sistemidir. Dünya'nın ortalama şeklini temsil eden ve yarı büyük ekseni 6.378.137,0 metre, basıklığı ise 1/298,257223563 olan referans elipsoididir. Orijini Dünya'nın kütle merkezi olan ve jeosantrik bir koordinat sistemidir; bu sistemde X ekseni ekvator düzleminde Greenwich meridyenine doğru, Y ekseni ekvator düzleminde X eksenine dik yönde ve Z ekseni Dünya'nın ortalama dönüş eksenine paralel olarak tanımlanmıştır(Seeber, 2003).

1.6. Türkiye'de Kullanılan Harita Projeksiyonları

Projeksiyon, seçilen referans yüzeyinin düzlem üzerine aktarılması sürecinde ortaya çıkan matematiksel ve geometrik ilkeleri inceler. Yerküre, üç boyutlu bir elipsoid veya küre olarak modellenirken, harita üretimi ve koordinat dönüşümleri için bu yüzeyin iki boyutlu düzleme projeksiyonu gereklidir. Bu süreçte, projeksiyon sistemleri farklı geometrik yaklaşımlar ve matematiksel dönüşümler kullanarak, coğrafi koordinatları düzlem koordinatlarına dönüştürür.

Her projeksiyonun kendine özgü deformasyonları bulunur; alan, açı, uzunluk korunabilir, ancak bunların hepsinin aynı anda korunması mümkün değildir(Jenny ve Šavrič, 2017). Projeksiyonlar temel olarak iki farklı yöntemle elde edilmektedirler. Birincisi yardımcı yüzey silindir, koni ve düzlem kullanılarak geometrik yolla yapılarak elde edilir. Bu ara yüzeyler; düzleme direkt açılabilen yüzeyler olduklarından hesap kolaylığı ve geometrik ilişkileri kurmakta kolaylık sağladıkları için kullanılmaktadır (Snyder ve Voxland, 1989). Projeksiyon teorisinde yardımcı yüzey silindir ve koni ve düzlem kullanılmadan da dönüşümün matematiksel temeli genellikle parametrik denklemlerle de ifade edilir. Böylece yeni projeksiyon türlerinin oluşturulmasına olanak sağlanır. Bu tür

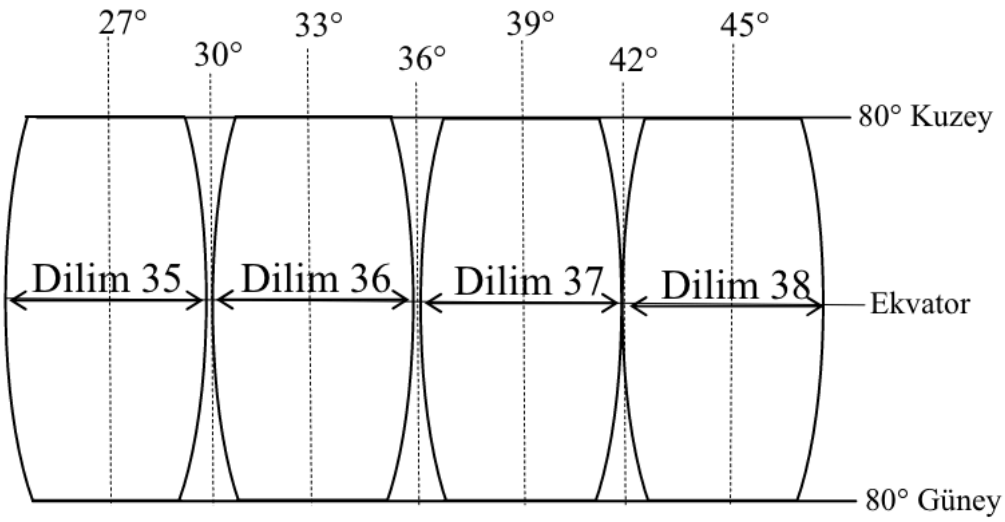
dönüşümler, harita projeksiyonlarının esnekliğini ve uygulama alanlarını genişletir (Jenny ve Šavrič, 2017). Bu tür projeksiyonlar günümüzde daha çok 250.000 ölçek ve üzeri haritalarda; ülke, deniz, kıta, dünya atlaslarının üretilmesinde kullanılmaktadır. İkincisi ise ara yüzey kullanılmadan diferansiyel geometri ve projeksiyon şartlarından yola çıkarak üretilen projeksiyon yöntemleridir ve tasvir olarak isimlendirilir. Bu tür projeksiyonlar ise ülke paftalama sistemlerinde büyük ölçekli haritaların üretilmesinde paftalama sistemi olan haritalardır. Kadastro, imar ve mühendislik projelerinde bu tür projeksiyonlar kullanılmaktadır.

Projeksiyon sistemlerinin seçimi, coğrafi bölgenin özelliklerine ve uygulamanın amacına göre yapılır. Türkiye gibi geniş ve farklı enlem-boylam aralıklarına sahip ülkelerde, projeksiyon sisteminin seçimi dönüşüm doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle iki boyutlu koordinat dönüşümlerinde, projeksiyonun neden olduğu deformasyonların minimize edilmesi gereklidir. Koordinat dönüşüm hatalarının değerlendirilmesinde, gridin x ve y yönlerindeki uzunluk oranı gibi parametreler dikkate alınarak, farklı projeksiyonların hata metrikleri karşılaştırılır. Bu tür analizler, dönüşümün doğruluğunu optimize etmek için gereklidir (Wang ve ark., 2022).

Projeksiyon teorisinin uygulamada karşılaştığı temel zorluklardan biri, yerkürenin gerçek şeklinin düzleme aktarılırken kaçınılmaz olarak bozulmasıdır. Bu nedenle, projeksiyon seçimi sırasında hangi özelliğin korunacağına karar verilmesi gerekir. Ayrıca, projeksiyon parametrelerinin belirlenmesi ve dönüşüm denklemlerinin hassas şekilde uygulanması, yüksek doğruluklu koordinat dönüşümleri için gereklidir (Snyder ve Voxland, 1989; Jenny ve Šavrič, 2017; Wang ve ark., 2022). Projeksiyon teorisi, yalnızca harita üretimiyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda jeodezik ağların, mühendislik projelerinin ve coğrafi bilgi sistemlerinin temelini oluşturur. Modern uygulamalarda, klasik projeksiyon yöntemleri ile birlikte, parametrik dönüşüm yaklaşımları ve makine öğrenmesi tabanlı modeller de projeksiyon kaynaklı hataların azaltılmasında kullanılmalıdır. Bu sayede, farklı projeksiyon sistemlerinin avantajları bir araya getirilerek, ülke genelinde yüksek doğruluklu ve güvenilir koordinat dönüşümleri sağlanabilir (Snyder ve Voxland, 1989; Jenny ve Šavrič, 2017; Wang ve ark., 2022).

1.6.1. UTM Projeksiyonu

Universal Transverse Mercator (UTM) projeksiyonu, özellikle geniş alanların haritalanmasında ve hassas konumsal verilerin yönetiminde yaygın olarak tercih edilen bir projeksiyon sistemidir. UTM projeksiyonu, temel olarak Transverse Mercator projeksiyonunun bir uyarlamasıdır ve her bir UTM dilimi, 6° veya 3° boylam genişliğinde kuzey-güney doğrultusunda uzanan meridyen dilimleri şeklinde tanımlanır. Bu dilimler, yeryüzünün üç boyutlu coğrafi koordinatlarını iki boyutlu düzlem koordinatlara dönüştürerek, harita üzerinde konumların hassas bir şekilde gösterilmesini sağlar. Projeksiyonun temel özelliği, konformal yani açısal doğruluğu koruyan bir sistem olmasıdır. Bu sayede, küçük alanlarda şekil bozulmaları minimumda tutulur ve özellikle mühendislik uygulamalarında, arazi ölçümlerinin harita üzerine aktarılmasında yüksek doğruluk elde edilir (Bettinger ve ark., 2020). Yildirim tarafından belirtildiği gibi, büyük ölçekli haritalarda UTM projeksiyonu ile elde edilen veriler, araziye doğrudan uygulanabilir ve ek bir projeksiyondan dönüşümünden gelen bir deformasyon düzeltmesi gerektirmez. Ancak, orta ölçekli haritalarda projeksiyonun merkezinden uzaklaşıldıkça bozulmalar artar ve bu durum, özellikle geniş alanlarda dikkatle değerlendirilmelidir (Snyder ve Voxland, 1989; Yildirim ve Kadi, 2021). UTM sistemi, dünya genelinde yaygın olarak kullanılmakta olup, birçok ülkenin resmi haritalarında ve coğrafi bilgi sistemlerinde standart olarak benimsenmiştir (Snyder ve Voxland, 1989; Bettinger ve ark., 2020). Türkiye'de de, özellikle kamu kurumları ve özel sektör tarafından geliştirilen coğrafi veri tabanlarında UTM koordinat sistemi yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bettinger ve ark., 2020).



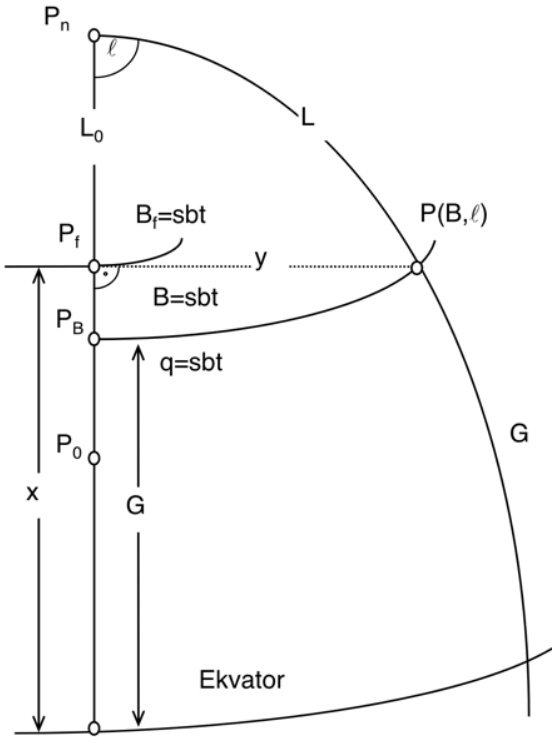
Şekil 6. Türkiye'de UTM dilimleri

UTM projeksiyonu hem topografik hem de kadastro ile imar haritaların üretiminde temel alınmakta ve 1:25.000 ile 1:250.000 ölçek aralığındaki haritalar için de önerilmektedir. Ayrıca, ABD'deki State Plane Coordinate System gibi, kuzey-güney doğrultusunda uzanan bölgeler için de uygun bir temel oluşturur (Snyder ve Voxland, 1989). Projeksiyonun matematiksel yapısı gereği, her bir UTM diliminde merkezi bir meridyen bulunur ve bu meridyen, projeksiyon yüzeyinin yeryüzüyle teğet olduğu hattı temsil eder. Bu teğet hat boyunca uzunluk bozulması yoktur; ancak dilimin kenarlarına yaklaşıldıkça bozulmalar artar (Bettinger ve ark., 2020; Lapaine ve Frančula, 2022). Lapaine ve Franšcula (Lapaine ve Frančula, 2022) tarafından vurgulandığı gibi, projeksiyon yüzeyinin yeryüzüyle temas ettiği veya kestiği hatlarda deformasyon minimumdur. Bu nedenle, UTM projeksiyonunda her dilimin merkezi meridyeni, doğruluk açısından kritik bir öneme sahiptir. UTM projeksiyonu, farklı datumlarla birlikte kullanılabilir ve diğer projeksiyonlara geçiş içinde ters dönüşümün matematik modelleri üretilmiştir. Türkiye'de, geçmişte ED50 datumuna dayalı projeksiyon sistemleri yaygınken, günümüzde ITRF96 ve WGS84 gibi modern datumlar ile UTM projeksiyonu entegre şekilde kullanılmaktadır (Elshambaky ve ark., 2018; Bettinger ve ark., 2020). Ülkemizde UTM sistemi 3° ve 6° dilim genişlikli olarak iki farklı durumlarda kullanılmaktadır (Şekil 6).

Elshambaky tarafından belirtildiği üzere, birçok ülke eski projeksiyon sistemlerini terk ederek, UTM ve modern datumlara geçiş yapmıştır. Bu geçiş, hem ulusal hem de uluslararası veri entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve yüksek doğruluklu konumsal analizlerin yapılmasına olanak tanımaktadır (Elshambaky ve ark., 2018; Bettinger ve ark., 2020). Projeksiyonlarda merkez enlemin ya da x koordinat eksen başlangıcının seçimi farklılıklar gösterebilir. Kutup başlangıçlı, ekvator başlangıçlı ve herhangi bir enlemin olmak üzere ülkelerin coğrafi konumu veya büyüklüğüyle orantılı olarak üç farklı yöntem kullanılabilir. UTM projeksiyonu, adından da anlaşılacağı üzere, transversal yani ekvator başlangıçlı kullanır. Bu, özellikle kuzey-güney doğrultusunda uzanan bölgelerde, şekil bozulmalarını minimize eder ve harita üzerindeki doğruluk seviyesini artırır (Lapaine ve Frančula, 2022). UTM projeksiyonu ile elde edilen koordinatlar, genellikle metrik birimlerle ifade edilir ve bu durum, mühendislik uygulamalarında ve arazi çalışmalarında büyük kolaylık sağlar. Koordinat sisteminin temelinde, coğrafi koordinatlar yer almakta olup, bu değerler UTM projeksiyonu ile düzlemsel koordinatlara dönüştürülür. Böylece, harita üzerinde yapılan ölçümler doğrudan gerçek dünya ile ilişkilendirilebilir.

UTM projeksiyonu Türkiye'nin; NATO üyesi ülke olması ve haritacılık ihtiyaçlarına uygun, yüksek doğruluklu ve pratik bir projeksiyon sistemi olarak tercih sebebi olmuştur. Gerek kamu kurumlarının, gerekse özel sektörün coğrafi veri üretiminde ve yönetiminde UTM projeksiyonunun yaygın olarak tercih edilmesi, sistemin sağladığı avantajların bir göstergesidir (Snyder ve Voxland, 1989; Bettinger ve ark., 2020).

Konformluğun yanı sıra, UTM projeksiyonu koordinatlarının hesabında Gauss-Krüger tasviri yöntemi kullanılmış ve L_0 ana meridyeni apsis ekseni olarak alınmak suretiyle uzunluk korunumu sağlanmaktadır(Şahin, 1994). L_0 değeri genellikle sabit bir değer olabilirken, B (enlem) ve q değerleri coğrafi konuma bağlı olarak herhangi bir değeri alabilir. Gauss-Krüger tasviri hesaplamalarında kullanılacak tek değişkenli kuvvet serileri yöntemiyle, hem coğrafi koordinatlardan düzlemsel koordinatlara geçişte hem de tersi dönüşümlerde belirli referans noktaları dikkate alınır. (B,L) coğrafi koordinatlarından (x,y) Gauss-Krüger tasvir koordinatlarının hesaplanmasında, P(B,L) noktasının enleminin ana meridyeni kestiği P_B noktası referans olarak alınır. Diğer taraftan, (x, y) koordinatlarından (B, L) koordinatlarına geçişte ise, tasviri yapılacak P noktasının ordinatının $P_f(B_f, 0)$ ayak noktasına düşümü yapılır ve bu noktaya göre L = L_0 ve y = 0 koşulları sağlanır (Şekil 7).



Şekil 7. Gauss-Krüger coğrafi düzlem tasviri

Böylelikle, tek değişkenli kuvvet serileri yardımıyla dönüşüm hesapları aşağıdaki iki başlık altında ifade edilebilir. Tek değişkenli kuvvet serileri ile (B, L) koordinatları yardımıyla L_0 sisteminde (x,y) Gauss-Krüger koordinatları

$$\ell = L - L_0 \tag{1}$$

$$x = G + A_2\ell^2 + A_4\ell^4 + \cdots \tag{2}$$

$$y = A_1\ell + A_3\ell^3 + A_5\ell^5 + \cdots \tag{3}$$

$$A_1 = \frac{N\,cos(B)}{\rho} \tag{4}$$

$$A_2 = \frac{N\,cos^2(B)t}{2\rho^2} \tag{5}$$

$$A_3 = \frac{N\,cos^3\,B(1 - t^2 + \eta^2)}{6\rho^3} \tag{6}$$

$$A_4 = \frac{N\,cos^4\,Bt(5 - t^2 + 9\,\eta^2)}{24\rho^4} \tag{7}$$

$$A_5 = \frac{N\,cos^5\,B(5 - 18t^2 + t^4)}{120\rho^5} \tag{8}$$

$$G = A'B + B'sin\,2\,B + C'sin\,4\,B + D'sin\,6\,B + \cdots \tag{9}$$

hesaplanır. Burada (9) numaralı formüldeki katsayılar aşağıda Tablo 3'te ITRF96 datumunda hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 3. G meridyen yayı hesabı katsayı değerleri

A'	111132.952547 m
B'	-16038.508700 m
C'	16.832600 m
D'	-0.022000 m

Tek değişkenli kuvvet serileri ile L_0 sisteminde (x, y) Gauss-Krüger koordinatlarından (B, L) coğrafi koordinatları

$$B = B_f + B_2 y^2 + B_4 y^4 + \cdots \tag{10}$$

$$L = L_0 + B_1 y + B_3 y^3 + B_5 y^5 + \cdots \tag{11}$$

$$B_1 = \frac{\rho}{N_f \, cos(B_f)} \tag{12}$$

$$B_2 = \frac{\rho t_f \left(-1 - \eta_f^2\right)}{\left(2N_f^2\right)} \tag{13}$$

$$B_3 = \frac{\rho\left(-1 - 2t_f^2 - \eta_f^2\right)}{\left(6N_f^3 cosB_f\right)} \tag{14}$$

$$B_4 = \frac{\rho t_f \left(5 + 3t_f^2 + 6\eta_f^2 - 6t_f^2\eta_f^2\right)}{\left(24N_f^4\right)} \tag{15}$$

$$B_5 = \frac{\rho\left(5 + 28t_f^2 + 24\eta_f^4\right)}{\left(120N_f^5 cosB_f\right)} \tag{16}$$

$$\sigma = \frac{G}{A'} \tag{17}$$

$$B_f = \sigma + B'' sin\, 2\,\sigma + C'' sin\, 4\,\sigma + D'' sin\, 6\,\sigma + \cdots \tag{18}$$

hesaplanır. Burada (18) deki katsayılar aşağıda Tablo 4'te ITRF96 datumunda hesaplanarak verilmiştir.

Tablo 4. B_f ayak noktası enlemi hesabı katsayı değerleri

B″	0.144 318 133°
C″	0.000 212 049°
D″	0.000 000 427°

Gauss-Krüger tasvirinde kullanılan (1)-(18) arasındaki matematik bağıntılarında kullanılan değişkenler

$$\eta^2 = e^2 \cos^2 B \tag{19}$$

$$V = \sqrt{1 + \eta^2} \tag{20}$$

$$N = c/V \tag{21}$$

$$t = tan\, B \tag{22}$$

ile hesaplanır.

Gauss-Krüger koordinatlarının dünya genelinde kullanılması için geliştirilen UTM projeksiyon sistemi koordinatları ([Sağa;Yukarı],[Easting;Northing]) hem seçilen dilim orta meridyeninin batısında ve ekvatorun güneyinde kalan noktaların negatif değerlerinden kurtulmak hem de dünya genelinde dilim orta meridyenlerine bir standart geliştirilmesi için yeniden tanımlanmaktadır. UTM koordinatlarının seçilen ana meridyen olan L_0 üzerinde uzunluğun korunması sağlanır. Fakat meridyenden uzaklaştıkça deformasyonların önüne geçmek imkansızdır. Bu durumda, x ve y koordinatları için UTM sisteminde diferansiyel yani ölçek faktörü (m_0) çalışma alanın büyüklüğüne göre tanımlanmaktadır. m_0 faktörü, tasvirin bozulmasını belirli sınırlar içinde tutmaya yarar. Söz konusu koşulun sağlanabilmesi için, ekvator üzerindeki üç meridyen arasındaki mesafe yaklaşık 340 km olarak kabul edilirse, dilim geçiş noktasına kadar olan mesafe 170 km olur. Uzunluk korunumu ilkesiyle:

$$m = m_0 \frac{1 + 170^2}{2R^2} \tag{23}$$

eşitliği yazılır ve buradan m_0 = 0.9996 değeri elde edilir. Gauss-Krüger tasviri, diferansiyel ölçeğin L_0'dan uzaklaşıldıkça artması nedeniyle 3° ve 6°'lik meridyen dilimleri

şeklinde uygulanır; her dilim için orta meridyen L_0 başlangıç olarak alınır ve ayrı bir tasvir yapılır. Böylece UTM koordinatları

$$Sağa = DN(ym_0 + 500000m) \tag{24}$$

$$Yukarı = xm_0 \tag{25}$$

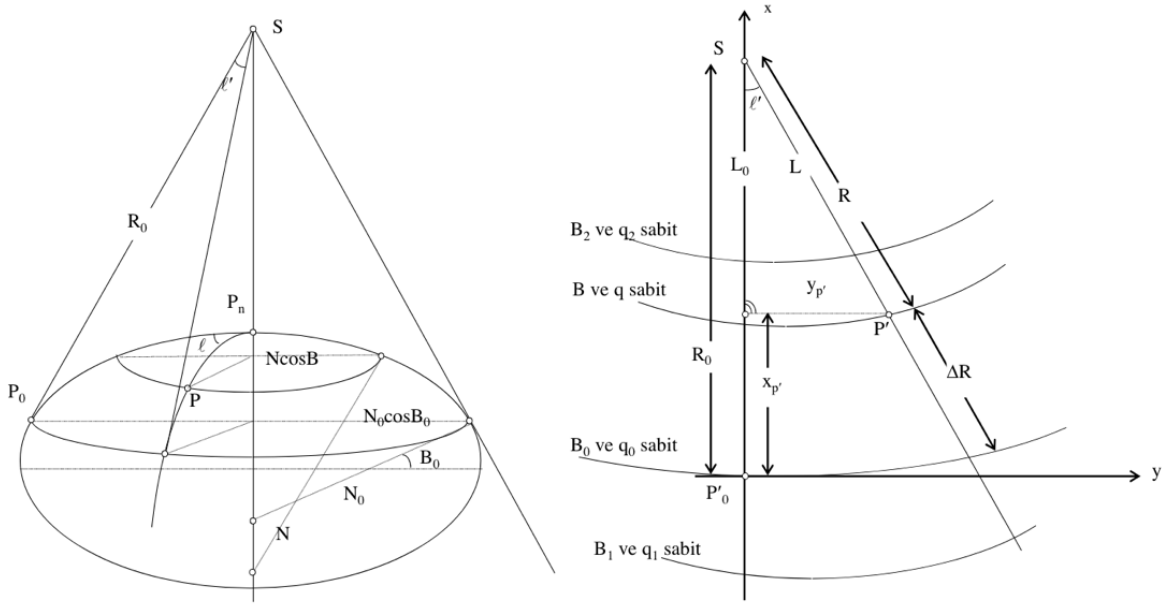
3°'lik DUTM koordinatları için m_0 = 1 kabul edilirken, 6°'lik UTM koordinatları için m_0 = 0.9996 olarak alınır. DUTM sisteminde dilim numarası koordinat başında belirtilmez ve negatif değerlerden kaçınmak amacıyla sağa koordinatlarına 500.000m eklenir. Güney Yarımküre uygulamalarında ise yukarı koordinatına 10.000.000m eklenerek pozitiflik sağlanır(Yıldırım 2004).

1.6.2. Lambert Konform Konik (LKK) Projeksiyon

LKK Projeksiyonu, özellikle orta enlemlerde yer alan ülkeler için tercih edilen bir harita projeksiyonudur. Bu projeksiyonun temel özelliği, iki paralel boyunca ölçeğin doğru olması ve bu paraleller arasında kalan alanlarda konfromluğun korunmasıdır. Projeksiyonun simetrisi, merkezi meridyen veya Ekvator etrafında tanımlanır ve paraleller, merkezi meridyene dik, eşit aralıklı düz çizgiler olarak tasarlanır. Kutuplar ise projeksiyon düzleminde birer nokta olarak temsil edilir. Projeksiyon dönüşümünden gelen deformasyonun en aza indirilebilmesi için projeksiyonun iki standart enlem seçerek uygulanması mümkündür.

Türkiye'nin coğrafi konumu, büyüklüğü ve şekli göz önüne alındığında, LKK Projeksiyonu'nun (Şekil 8) ülke genelinde özellikle de doğu batı yönünde uzanan geniş alanların haritalanmasında avantaj sağladığı görülmektedir. Özellikle doğu-batı doğrultusunda geniş alanlara sahip olan Türkiye gibi ülkelerde, bu projeksiyonun kullanılması, birden fazla koordinat başlangıcı kullanmadan tek bir koordinat başlangıcıyla yüksek doğruluklu harita üretimine olanak tanır. Projeksiyonun iki standart paralelinin seçimiyle de özellikle ulusal harita üretiminde ve büyük ölçekli coğrafi bilgi sistemlerinde tercih edilmektedir. Projeksiyonun matematiksel yapısı gereği, merkezi meridyen ve standart paralellerin doğru seçilmesi hem doğruluk hem de kullanılabilirlik açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye'de, ulusal koordinat sistemlerinin dönüşümünde ve yeni

projeksiyon sistemlerinin belirlenmesinde, LKK Projeksiyonu'nun parametrik özellikleri dikkate alınarak, ülkenin coğrafi sınırlarına uygun parametreler belirlenmektedir. Bu sayede, projeksiyonun sunduğu avantajlardan maksimum düzeyde yararlanmak mümkün olmaktadır (Snyder ve Voxland, 1989). Projeksiyonun ülke genelinde standartlaştırılması, farklı veri kaynaklarının ve harita ürünlerinin entegrasyonunu kolaylaştırır. LKK Projeksiyonu'nun Türkiye'deki uygulamalarında, projeksiyon parametrelerinin ülkenin coğrafi özelliklerine göre belirlenmesi, dönüşüm sonuçlarının çeşitli hata metrikleriyle değerlendirilmesi ve optimize edilmesi, ulusal harita altyapısının güçlendirilmesine katkı sunar. Bu projeksiyonun avantajları, özellikle geniş alanların haritalanmasında ve çoklu veri setlerinin bir araya getirilmesinde belirgin şekilde ortaya çıkar (Çinar ve Ünel 2022; Snyder ve Voxland 1989).



Şekil 8. LKK Projeksiyonu

LKK projeksiyonunun uygulamalarında, coğrafi koordinatlardan projeksiyon düzlemine ve projeksiyon düzleminden coğrafi koordinatlara dönüşüm, belirli tasvir denklemleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu dönüşüm denklemleri, projeksiyonun tek standart paralelli (B_0) veya çift standart paralelli (B_1,B_2) olmasına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Tek standart paralelli LKK projeksiyonunda, konumların düzlem üzerindeki izdüşümü aşağıdaki formüllerle ifade edilir:

$$x = R_o - R\cos s\,\ell' \tag{26}$$

$$y = R\sin n\,\ell' \tag{27}$$

$$\ell' = n(L - L_0) \tag{28}$$

$$R_0 = N_0\,cot\,B_0 \tag{29}$$

$$R = R_0 e^{[-n(q-q_0)]} \tag{30}$$

$$n = sin\,B_0 \tag{31}$$

Çift standart paralelli LKK projeksiyonunda ise benzer biçimde:

$$\ell' = \delta(L - L_0) \tag{32}$$

$$R = R_0 \underline{e}^{[-\delta(q-q_0)]} \tag{33}$$

$$R_0 = \frac{N_1\,cos\,B_1}{\delta}\,\underline{e}^{[\delta(q_1-q_0)]} = \frac{N_2\,cos\,B_2}{\delta}\,\underline{e}^{[\delta(q_2-q_0)]} \tag{34}$$

$$\delta = \frac{ln(N_1\,cos\,B_1) - ln(N_2\,cos\,B_2)}{q_2 - q_1} \tag{35}$$

elde edilir. Burada q, izemetrik enlem olarak tanımlanır ve

$$q = arctan\,h\,(sin\,B) - e\,arctan\,h\,(e\,sin\,B) \tag{36}$$

ifadesiyle hesaplanır. Ters dönüşüm, yani projeksiyon düzleminden coğrafi koordinatlara geçişte de benzer bir yapı izlenir. Tek standart paralelli LKK için:

$$L - L_0 = \frac{1}{n}arcta\,n\left(\frac{y}{R_0 - x}\right) \tag{37}$$

$$q = q_0 + \frac{1}{n} l\,n \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + x^2 + y^2 - 2R_0 x}} \tag{38}$$

$$R_0 = N_0 co\,t\,B_0 \tag{39}$$

$$n = si\,n\,B_0 \tag{40}$$

ve çift standart paralelli LKK için:

$$L - L_0 = \frac{1}{\delta} arcta\,n\left(\frac{y}{R_0 - x}\right) \tag{41}$$

$$q = q_0 + \frac{1}{\delta} l\,n \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + x^2 + y^2 - 2R_0 x}} \tag{42}$$

şeklinde hesaplamalar yapılır. Ters dönüşümde elde edilen q değeri yardımıyla enlem B, aşağıdaki kuvvet serisi yardımıyla belirlenir:

$$R_0 = \frac{N_1 co\,s\,B_1}{\delta} \underline{e}^{[\delta(q_1 - q_0)]} = \frac{N_2 co\,s\,B_2}{\delta} \underline{e}^{[\delta(q_2 - q_0)]} \tag{43}$$

$$\delta = \frac{l\,n(N_1 co\,s\,B_1) - l\,n(N_2 co\,s\,B_2)}{q_2 - q_1} \tag{44}$$

$$B = X + C_2 si\,n\,2\,X + C_4 si\,n\,4\,X + C_6 si\,n\,6\,X + C_8 si\,n\,8\,X \tag{45}$$

$$X = arcsi\,n(tan\,h\,q) \tag{46}$$

Burada C_2, C_4, C_6 ve C_8 katsayıları elipsoide ait basıklık(e) cinsinden belirli katsayı serileridir.

$$C_2 = \frac{e^2}{2} + \frac{5e^4}{24} + \frac{e^6}{12} + \frac{13e^8}{360} \tag{47}$$

$$C_4 = \frac{7e^4}{48} + \frac{29e^6}{240} + \frac{811e^8}{11520} \tag{48}$$

$$C_6 = \frac{7e^6}{120} + \frac{81e^8}{1120} \tag{49}$$

$$C_6 = \frac{4279e^8}{161280} \tag{50}$$

Bu denklemler ve seriler yardımıyla, LKK projeksiyonunda hassas koordinat dönüşümü gerçekleştirilebilir(Yıldırım 2004). Projeksiyonun matematiksel yapısına ait bu denklemler, özellikle yüksek doğruluk gerektiren harita üretimi ve mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır.

1.6.3. UTM-LKK Dönüşümü

Universal Transverse Mercator ve LKK projeksiyon sistemleri, açısal doğruluğu koruyan konformal projeksiyonlar olup, farklı coğrafi koşullara sahip alanlarda yüksek doğruluklu harita üretimi için yaygın olarak tercih edilmektedir. Türkiye gibi doğu-batı doğrultusunda geniş bir yüzölçümüne sahip ülkelerde, UTM projeksiyon sisteminin dilimlere ayrılmış yapısı nedeniyle, geniş alanlı projelerde birden fazla dilim arasında dönüşüm gerekliliği ortaya çıkmakta ve bu durum işlem yükü ile kullanıcı kaynaklı hataları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, UTM sisteminden LKK sistemine geçiş, projeksiyon bozulmalarını minimize etmek ve tek bir koordinat başlangıcı ile çalışmak amacıyla önerilmektedir(Yildirim ve Kadi, 2021).

UTM-LKK dönüşüm sürecinde, her iki projeksiyonun konformal yapıda olması temel avantajlardan biridir. Bu özellik sayesinde dönüşüm işlemleri sırasında alan, açı ve şekil bozulmaları ihmal edilebilir düzeyde kalmakta, özellikle mühendislik uygulamaları, kadastro projeleri ve orta-büyük ölçekli harita üretimlerinde yüksek doğrulukla veri aktarımı mümkün olmaktadır. Yıldırım ve Kadi (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da bu dönüşüm sürecinin, Türkiye'nin coğrafi sınırları içinde homojen biçimde uygulanabilir olduğu ve sistematik bir bozulmaya neden olmadığı ortaya konmuştur. Aynı çalışmada UTM'den LKK sistemine geçişte, projeksiyon kaynaklı bozulmaların belirlenmesi amacıyla Türkiye genelinde 585 test noktası kullanılarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, her bir test noktasında 1 kilometrelik doğrultular oluşturulmuş, uzunluk ve yön

sapmaları detaylı şekilde hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular, UTM ve LKK sistemleri arasında yapılan dönüşümün, 1 km uzunluğundaki kenarlarda en fazla 1 cm'lik uzunluk farkı ve 0.003" (yay saniyesi) düzeyinde yön sapması ile gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu değerler, dönüşümün deformasyona neden olmayacak kadar düşük olduğunu göstermekte, uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Dönüşüm hesaplamalarında kullanılan parametrik ifadeler, ITRF96 datumuna göre türetilmiş sabit katsayılara dayanmaktadır. Bu sabit katsayılar sayesinde, hem ileri (coğrafi ile düzlem) hem de ters (düzlem ile coğrafi) dönüşümler, yüksek hassasiyetle gerçekleştirilebilmekte ve kullanıcı müdahalesi gerektirmeksizin otomatik sistemler aracılığıyla uygulanabilmektedir. Böylelikle, coğrafi bilgi sistemleri, mühendislik projeleri ve haritacılık uygulamalarında, dönüşüm kaynaklı koordinat farklılıklarının ortadan kaldırıldığı ve veri bütünlüğü korunduğu Yıldırım ve Kadi (2021) tarafından yapılan çalışma ile ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, UTM-LKK dönüşümü, Türkiye'nin mevcut coğrafi yapısı, haritacılık uygulamaları ve veri entegrasyonu ihtiyaçları göz önüne alındığında, herhangi bir anlamlı deformasyon oluşturmadan uygulanabilir. Doğru projeksiyon parametreleri, güncel datumlar ve standartlaştırılmış dönüşüm katsayıları ile desteklenen bu dönüşüm işlemi, yüksek doğruluk gerektiren mühendislik ve harita projeleri için ideal bir çözüm sunmaktadır.

1.7. İki Boyutlu Koordinat Dönüşüm Yöntemleri ve Dengeleme Yaklaşımları

Jeodezik çalışmaların önemli bileşenlerinden biri, farklı referans sistemleri arasında yüksek doğrulukla konum aktarımı sağlayan koordinat dönüşümleridir. Özellikle geniş alanlarda veya farklı dönemlerde tanımlanmış datumlar arasında veri bütünlüğünü koruyabilmek için, dönüşüm sürecinin hem matematiksel hem de istatistiksel olarak sağlam temellere oturtulması gereklidir. Bu bağlamda, iki boyutlu koordinat dönüşüm yöntemleri yatay konum bileşenlerinin dönüştürülmesinde sıklıkla tercih edilen parametrik yaklaşımlardır. Her model, geometrik özellikleri, parametre sayısı ve uygulanabilirlik alanı bakımından farklı avantajlar sunar.

Bununla birlikte, dönüşüm parametrelerinin doğru ve güvenilir biçimde kestirilebilmesi için ölçüm verilerinin dengeleme hesaplarına tabi tutulması zorunludur(Koch, 1999). Dengeleme, ölçülerin hata dağılımları ve güvenilirlik düzeyleri dikkate alınarak, parametrelerin en olası değerlerinin istatistiksel olarak belirlenmesini

sağlar. En küçük kareler yöntemi bu süreçte en yaygın kullanılan yaklaşım olmakla birlikte, ölçülerdeki kaba hatalara karşı daha dayanıklı robust yöntemler de uygulama alanı bulmaktadır. Böylece hem dönüşüm modeli hem de dengeleme stratejisi, sistemin genel doğruluğunu ve güvenilirliğini doğrudan etkileyen iki kritik unsur olarak birlikte değerlendirilir.

1.7.1. İki Boyutlu Dönüşüm Yöntemleri İçin Ortak Çerçeve

İki boyutlu koordinat dönüşüm yöntemleri, farklı referans sistemleri arasındaki konum bilgilerini güvenilir biçimde aktarmak amacıyla geliştirilmiştir. Farklı dönüşüm modelleri geometrik yapıları ve parametre sayıları bakımından değişiklik gösterse de, tümü ortak bir matematiksel ve istatistiksel çerçeveyi takip eder(Grafarend vd. 2006). Bu çerçeve, matematiksel model (fonksiyonel model ve stokastik model), dengeleme yaklaşımı ve sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşur.

1.7.2. Matematiksel Model

Matematiksel model, gerçek dünyadaki fiziksel olayların veya ölçüm süreçlerinin matematiksel denklemlerle ifade edilmesi anlamına gelir. Bu modelleme, özellikle mühendislik ve jeodezi gibi alanlarda ölçülen değerlerle bilinmeyen parametreler arasında anlamlı ilişkiler kurmayı sağlar. Ölçüm sistemlerinin çözümünde kullanılan matematiksel modelleme, hesaplama süreçlerinin güvenilirliği için kritik bir adımdır.

Matematiksel model, fonksiyonel ve stokastik model olarak adlandırılan iki temel bileşenden oluşur. Fonksiyonel model, ölçüm değerlerinin teorik/geometrik ilişkilere göre nasıl bir yapıya sahip olduğunu ifade ederken stokastik model ise ölçüm değerlerinin doğruluğunu, yani güvenilirliğini ifade eder.

1.7.3. Fonksiyonel Model

Fonksiyonel model, ölçüm sisteminde yer alan değişkenler arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlar. Bu model, sistemin geometrik, fiziksel veya teorik yapısına göre oluşturulur. Fonksiyonel model sayesinde ölçülen değerlerle bilinmeyen parametreler arasında doğrudan bir bağıntı kurulur. Bu bağıntı genellikle doğrusal ya da doğrusal olmayan matematiksel denklemler şeklindedir.

İki boyutlu koordinat dönüşümlerinde fonksiyonel model, kaynak (ilk) koordinat sistemindeki noktaların, hedef koordinat sistemindeki karşılıklarına nasıl dönüştürüleceğini belirleyen geometrik dönüşüm denklemleri ile tanımlanır. Bu denklemler, seçilen dönüşüm yöntemine bağlı olarak farklı parametreler içerir.

En genel haliyle, fonksiyonel model aşağıdaki doğrusal formda ifade edilebilir:

$$\mathrm{v} = \mathrm{A}\mathrm{x} - l \tag{51}$$

Burada:

- l: Ölçü vektörü
- A: Katsayılar matrisi
- x: Dönüşüm parametreleri vektörü
- v: Artık (residual) vektörü, ölçü ile model arasındaki farkları temsil eder.

Bu yapı, tüm dönüşüm yöntemleri için ortak şablondur. Yöntemler arasındaki temel fark, A matrisinin ve x parametrelerinin nasıl tanımlandığında ortaya çıkar.

1.7.4. Stokastik Model

Stokastik model, ölçüm sisteminde yer alan verilerin güvenilirliğini ve doğruluğunu temsil eder. Bu modelin temel amacı, ölçümlerle ilgili belirsizliklerin istatistiksel özelliklerini tanımlamaktır. Stokastik model; ölçülerin varyanslarını, kovaryanslarını ve bu ölçülere verilecek ağırlıkları belirler. Böylece hangi ölçünün dengeleme çözümüne ne kadar katkı sağlayacağı hesaplanır.

En genel haliyle stokastik model:

$$\mathrm{Q_l} = m_0^2 \mathrm{P}^{-1} \tag{52}$$

Burada:

- $\mathrm{Q_l}$: Ölçülerin kovaryans matrisi
- m_0^2 : Birim ağırlık için hata varyansı
- P : Ağırlık matrisi

Stokastik model, dönüşüm hesaplarında En Küçük Kareler (EKK) veya robust yöntemler ile birlikte kullanılır. Özellikle farklı kaynaklardan gelen ölçülerin doğruluk seviyeleri farklı olduğunda, uygun ağırlıklandırma ile parametre kestiriminin güvenilirliği artırılır(Koch 1999; Vaníček 1986).

1.7.5. Dengeleme Yaklaşımları

Koordinat dönüşüm parametrelerinin güvenilir ve yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi, ölçümlerin uygun istatistiksel yöntemlerle dengelenmesini gerektirir. Dengeleme, ölçülerdeki tesadüfi hataların etkilerini minimize ederek, parametrelerin en olası değerlerinin elde edilmesini sağlar. Bu süreçte kullanılan temel yöntem En Küçük Kareler Yöntemi (EKK) olup, ölçülerin hata dağılımları bilindiğinde en etkin çözümü verir

Bununla birlikte, ölçü setlerinde uyuşumsuz ölçülerin bulunması durumunda, klasik EKK çözümü bozulabilir. Bu nedenle robust dengeleme yöntemleri geliştirilmiştir. Huber, Tukey, Hampel, IGG, Andrews gibi M-kestirim tabanlı yöntemler, ölçülere ait ağırlıkları artık büyüklüğüne bağlı olarak iteratif biçimde günceller. Böylece, büyük artıklar üreten ölçüler çözümde daha az etkili olur veya tamamen devre dışı bırakılır.

Uygun dengeleme yaklaşımının seçilmesi, dönüşüm modelinin güvenilirliğini doğrudan etkiler.

1.7.6. EKK Yöntemi

İki boyutlu dönüşüm parametreleri genellikle En Küçük Kareler Yöntemi (EKK) ile kestirilir. EKK yöntemi, önceki bölümde tanımlanan fonksiyonel ve stokastik model kullanılarak, ölçülerdeki rastgele hataların etkisini minimize eden bir dengeleme yaklaşımıdır. Amaç, artıkların ağırlıklı kareler toplamını en küçük yapmaktır.

a) Amaç Fonksiyonu

$$\Phi = \mathrm{v}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}\mathrm{v} \rightarrow min \tag{53}$$

Burada:

- $\mathbf{v}$ → artık vektörü $(\mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{l})$
- $\mathbf{P}$ → ölçülerin ağırlık matrisi

b) Normal Denklemler ve Çözüm

Amaç fonksiyonunun minimizasyonu ile:

$$A^T P\, A\, \hat{x} = A^T P\, l \tag{54}$$

$$\hat{x} = (A^T P\, A)^{-1} A^T P\, l \tag{55}$$

c) Düzeltmelerin Hesaplanması

$$\hat{v} = A\hat{x} - l \tag{56}$$

d) Duyarlık Analizi

- Karesel ortalama hata(RMSE):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}^T P \hat{v}}{f}\ , f = n - u \tag{57}$$

- Parametrelerin kovaryans matrisi:

$$Q_{\hat{x}} = A^T P A^{-1} \tag{58}$$

Bu yaklaşım, ölçülerin bağımsız ve normal dağıldığı varsayımı altında optimal çözüm sağlar (Ghilani, 2006).

1.7.7. Robust Yöntemler

Robust dengeleme yöntemleri, önceki bölümde tanımlanan fonksiyonel ve stokastik model çerçevesinde çalışır, ancak klasik EKK'nın temel varsayımı olan ölçülerin yalnızca küçük rastgele hatalar içerdiği koşulunu esnetir. Amaç, uyuşumsuz ölçülerin çözüm üzerindeki etkisini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmaktır(Huber ve Ronchetti, 2009).

Klasik EKK'da amaç fonksiyonu:

$$\Phi = v^T P v \tag{59}$$

Robust yöntemlerde ise artıkların kareleri yerine, büyüklüğüne bağlı olarak değişen bir ağırlık fonksiyonu ρ (v) kullanılır:

$$\Phi_{\text{robust}} = \sum_{i=1}^{n} \rho\left(\frac{v_i}{\text{m}_0 \cdot c}\right) \tag{60}$$

Burada $\rho(\cdot)$ fonksiyonu büyük artıkları bastıracak şekilde seçilir.

- Ağırlık Güncelleme Mekanizması

Robust çözüm iteratif yapılır:

a) Başlangıçta EKK çözümü yapılır, artıklar v_i bulunur.

b) Normalize etme:

$$u_i = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_0 \cdot c} \tag{61}$$

Burada c, yönteme özgü olarak belirlenir

Seçilen robust fonksiyona göre yeni ağırlıklar hesaplanır:

$$w_i = \frac{\psi(v_i)}{v_i} \tag{62}$$

c) Ağırlık matrisi güncellenir ($P \leftarrow WP$) ve dengeleme tekrar yapılır.

d) Değişim çok küçük olana kadar (yakınsama) adımlar tekrarlanır.

- Yaygın Robust Ağırlık Fonksiyonları

a) Huber Ağırlık Fonksiyonu

Huber yöntemi, uç değerlerin etkisini azaltarak daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi amaçlayan robust bir istatistiksel tekniktir. Klasik en küçük kareler yönteminde hata karelerinin toplamı minimize edilirken, Huber yöntemi küçük hatalarda kareler yöntemi gibi davranır, ancak belirli bir eşik değerinden (k) sonra doğrusal bir cezalandırma uygular. Bu

yaklaşım, özellikle koordinat dönüşümü gibi hassas mühendislik uygulamalarında ölçüm hataları veya uyumsuz gözlemler nedeniyle parametre tahminlerinin bozulmasını önler (Kitchenham ve ark., 2017).

Matematiksel olarak Huber ağırlık fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$W(v_i) = \begin{cases} 1 & |v_i| \leq c \\ \dfrac{c}{|v_i|} & |v_i| > c \end{cases} \tag{63}$$

Burada v_i artık terimini, c ise yöntemin robustluğunu belirleyen eşik değerini temsil eder. Küçük hatalarda kareler yöntemine yakınsarken, büyük hatalarda doğrusal büyüme gösterdiği için uç değerlerin etkisini sınırlar.

b) Tukey Ağırlık Fonksiyonu

Tukey'in Biweight Yöntemi, uç değerlerin etkisini azaltmak amacıyla geliştirilmiş robust bir istatistiksel tahmin yaklaşımıdır. Klasik en küçük kareler yönteminde tüm gözlemler eşit ağırlıkla değerlendirilirken, Tukey'in Biweight fonksiyonu residual büyüklüğüne göre ağırlıkları dinamik olarak ayarlar. Küçük residual değerleri yüksek ağırlık alırken, belirli bir eşik değeri (c) aşan residual değerler sıfır ağırlıkla değerlendirilir. Bu sayede aşırı sapma gösteren gözlemler modelin parametre tahminlerini bozmaz (Třasák ve Štroner, 2014; Aryana, 2021).

$$W(v_i) = \begin{cases} (1 - (\dfrac{|v_i|}{c})^2)^2 & |v_i| \leq c\pi \\ 0 & |v_i| > c\pi \end{cases} \tag{64}$$

c) Fair Ağırlık Fonksiyonu

Fair yöntemi, robust dengelemede kullanılan ve özellikle orta büyüklükteki artıkları yumuşak şekilde bastıran bir ağırlık fonksiyonudur. İteratif robust dengeleme algoritmalarında, her iterasyonda artıklar yeniden ağırlıklandırılır ve kaba hataların etkisi minimize edilir(Portnoy ve He, 2000; Ferry ve ark., 2023).

$$W(v_i) = \frac{1}{(1 + |v_i/\mathrm{c}|)^2} \tag{65}$$

d) Hampel Ağırlık Fonksiyonu

Hampel yöntemi, Frank R. Hampel tarafından geliştirilen ve özellikle bozulmuş gözlemler içeren veri setlerinde güvenilir tahminler üretmek amacıyla kullanılan, redescending özellikli robust bir M-kestiricisidir(Hampel, 1974). Klasik en küçük kareler yönteminin uç değerlere karşı hassasiyetini azaltmak için tasarlanmıştır ve üç eşik parametresi (a, b, c) ile normalize edilmiş artık değerleri ağırlıklandırarak çalışır. Küçük sapmalar için tam ağırlık verilirken, a ile b arasındaki sapmalar için ağırlık kademeli olarak azaltılır, c değerini aşan sapmalar ise tamamen dışlanır. Bu yapı, özellikle Huber gibi tek eşiğe dayanan yöntemlere göre daha esnek ve ayarlanabilir bir çözüm sunar (Hampel, 1974).

Matematiksel olarak Hampel ağırlık fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$W(v_i) = \begin{cases} 1 & 0 < |v_i| \le a \\ \dfrac{a}{|v_i|} & a < |v_i| \le b \\ \dfrac{a(c - |v_i|)}{|v_i|(c - b)} & b < |v_i| \le c \\ 0 & |v_i| > c \end{cases} \tag{66}$$

e) IGG Ağırlık Fonksiyonu

IGG yöntemi, ölçüm verilerinin güvenilirliğini artırmak ve uyumsuz ölçülerin etkisini azaltmak amacıyla geliştirilmiş robust bir istatistiksel yaklaşımdır. Temel olarak, ölçümleri istatistiksel özelliklerine göre üç kategoriye ayırır: normal, kullanılabilir ve zararlı ölçümler. Her kategori için farklı ağırlık fonksiyonları uygulanır; böylece zararlı ölçülerin etkisi en aza indirilir ve veri kaybı minimumda tutulur(Xue ve ark., 2020).

$$\gamma_i = \begin{cases} 1 & |\tilde{v}_i| \le k_0 \\ \dfrac{k_0}{|\tilde{v}_i|}\left(\dfrac{k_1 - |\tilde{v}_i|}{k_1 - k_0}\right) & k_0 < |\tilde{v}_i| \le k_1 \\ 0 & |\tilde{v}_i| > k_1 \end{cases} \tag{67}$$

f) Andrews Ağırlık Fonksiyonu

Andrews'in Sinüs Fonksiyonu yöntemi, klasik en küçük kareler yaklaşımının uç değerlere karşı duyarlılığını azaltmak amacıyla geliştirilmiş robust bir istatistiksel tekniktir. Özünde, belirli bir eşik değerin ötesindeki artık değerler için sabit ceza uygulayarak uç değerlerin etkisini sınırlar. Böylece, merkezi verilere daha fazla ağırlık verirken, uyumsuz gözlemler modelin genel doğruluğunu bozmaz(Lambrinos, 1984; Rousseeuw, 1984).

Bu yöntem, genellikle iteratif yeniden ağırlıklandırılmış en küçük kareler algoritması ile uygulanır. Her iterasyonda artıklar güncellenir ve ağırlıklar yeniden hesaplanır. Andrews'in sinüs fonksiyonu, uç değerleri bastırma ve merkezi verilere duyarlılığı koruma dengesini sağlaması açısından diğer robust ağırlık fonksiyonlarına göre avantaj sunar.

$$W(v_i) = \begin{cases} (\frac{|v_i|}{c})^{-1} \sin(\frac{|v_i|}{c}) & |v_i| \leq c\pi \\ 0 & |v_i| > c\pi \end{cases} \tag{68}$$

g) Danimarka Ağırlık Fonksiyonu

Danimarka ağırlık fonksiyonu, klasik en küçük kareler yaklaşımının uyuşumsuz ölçüler karşısındaki zayıflığını azaltmak amacıyla geliştirilmiş, iteratif ağırlık güncellemesine dayalı robust bir tekniktir. Başlangıçta tüm gözlemlere eşit ağırlık verilir, ardından normalize artık değerleri hesaplanır ve bu değerlere göre ağırlık katsayıları güncellenir. Büyük normalize artıklara sahip ölçüler daha düşük, küçük normalize artıklara sahip ölçüler ise daha yüksek ağırlık alır(Erdoğan ve ark., 2018; Xue ve ark., 2020).

Bu iteratif süreç, parametre tahminleri ve ağırlık katsayıları belirli bir tolerans düzeyinde sabitlenene kadar tekrarlanır. Danimarka ağırlık fonksiyonu uygulamada çoğu zaman Huber veya Hampel gibi diğer robust ağırlık fonksiyonları ile birlikte kullanılır ve heterojen hata yapılarında yüksek doğruluk sağlar(Bar-Gera, 2017). Böylece hem küçük hataların katkısı korunur hem de büyük hataların çözüme etkisi kontrollü şekilde azaltılır. Matematiksel olarak iteratif güncelleme süreci şu şekilde ifade edilebilir:

$$W(v_i) = \begin{cases} 1 & |v_i| < c \\ \exp(-\frac{|v_i|}{c}) & |v_i| \geq c \end{cases} \tag{69}$$

- RANSAC Yöntemi

RANSAC, Fischler ve Bolles tarafından 1981'de geliştirilen, veri setinde çok sayıda uyuşumsuz ölçü bulunsa bile doğru model parametrelerini tahmin edebilen robust bir yöntemdir (Fischler ve Bolles, 1981). Temel amacı, tüm veriye en iyi uyan tek bir model yerine, verinin çoğunluğuna en iyi uyan modeli bulmaktır. Bu özellik, koordinat dönüşümleri, görüntü eşleştirme ve 3B modelleme gibi alanlarda geniş kullanım sağlar.

Matematiksel olarak, veri seti (D), uyumlu ölçüler (I) ve uyuşumsuz ölçüler (O) olarak ayrılır:

$$D = I \cup O, I \cap O = \emptyset \tag{70}$$

Minimum sayıda nokta seçilerek bir model f_θ kurulup tüm veri üzerinde test edilir. Öklidyen hata:

$$e_i = \sqrt{(x_i' - \hat{x}_i)^2 + (y_i' - \hat{y}_i)^2} \tag{71}$$

hata eşiği T altında kalanlar inlier olarak kabul edilir. İterasyon sayısı, güven düzeyi p, inlier oranı w ve minimum nokta sayısı n ile hesaplanır.

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-w^n)} \tag{72}$$

En fazla inlier'a sahip model seçilir ve inlier'lar ile yeniden tahmin yapılır.

Avantajlar: Yüksek outlier oranında bile güvenilir model üretir, veri dağılımı hakkında varsayım gerektirmez.

Dezavantajlar: İterasyon sayısına bağlı olarak hesaplama süresi artabilir, eşik değeri uygun seçilmezse sınıflandırma hataları olabilir, belirli model tipleriyle sınırlıdır.

1.7.8. Duyarlık Ölçütleri

Dengeleme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçların güvenilirliğini ve modelin başarımını değerlendirmek için çeşitli istatistiksel metrikler kullanılır. Bu metrikler hem model karşılaştırması hem de veri kalitesi kontrolü için kritik öneme sahiptir.

a) RMSE

Karesel ortalama hata:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\mathrm{v}^{\top}\mathrm{Pv}}{f}}, f = n - u \tag{73}$$

Burada y_i gerçek değerleri, $\hat{y}_i$ ise model tarafından tahmin edilen değerleri temsil etmektedir.

b) V_x ve V_y

Koordinat bileşenleri için:

$$\begin{aligned} V_x &= x_i - \hat{x}_i \\ V_y &= y_i - \hat{y}_i \end{aligned} \tag{74}$$

Sapma değerleri 0'a yakın olmalıdır.

c) $\boldsymbol{v_{max}}$ (Maksimum Hata)

$$v_{\max} = \max_i |y_i - \hat{y}_i| \tag{75}$$

Burada y_i gerçek değerleri, $\hat{y}_i$ ise model tarafından tahmin edilen değerleri ifade eder. Bu formül, tüm veri seti üzerindeki mutlak hata değerlerinin en büyüğünü seçer.

1.7.9. Hipotez Testleri

Hipotez testleri, ölçü setinde uyuşumsuz ölçü olup olmadığını belirlemek için kullanılır. EKK sonrası artıklar üzerinde uygulanır, robust yöntemlerle birlikte de kullanılabilir.

a) Genel F Testi

Modelin genel anlamlılığını sınar:

$$\mathrm{F} = \frac{m_0^2}{\sigma_0^2} \xrightarrow{\mathrm{H_0}} \mathrm{F}f, \alpha \tag{76}$$

- H_0: Model uyumludur.
- H_1: Model uyumlu değildir.

b) t-testi (Student)

Bireysel parametrelerin anlamlılığını sınar:

$$t = \frac{|\mathrm{v}_i|}{m_{\mathrm{v_i}}} \xrightarrow{H_0} tf, \alpha \tag{77}$$

- H_0: Parametre istatistiksel olarak anlamsız.
- H_1: Parametre anlamlı.

c) Data Snooping (Baarda)

Bireysel ölçülerde hata tespiti:

$$\mathrm{w}_i = \frac{|\mathrm{v}_i|}{\sigma_{\mathrm{v}_i}} \tag{78}$$

$$|\mathrm{w}_i| \geq t_{\alpha/2,f} \rightarrow \text{Ölçü hatalı olabilir.} \tag{79}$$

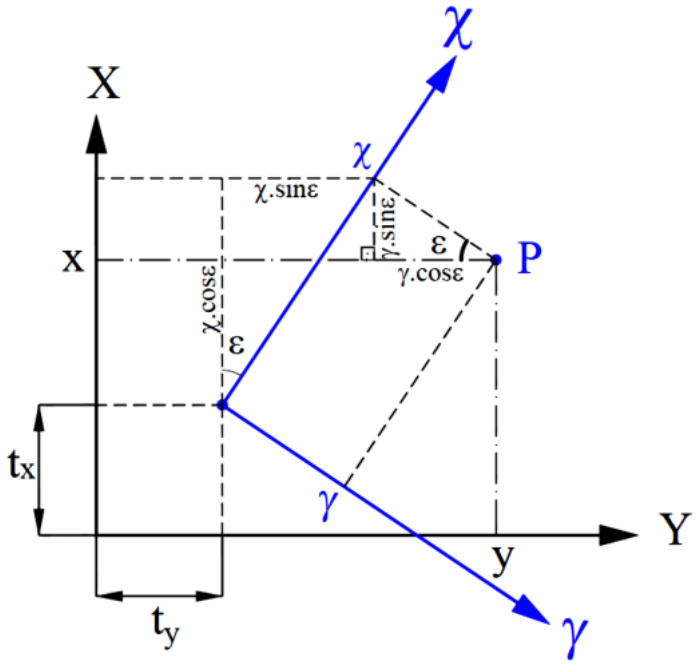
(Sisman, 2005)

1.7.10. İki Boyutlu Dönüşüm Yöntemleri

İki boyutlu koordinat dönüşüm yöntemleri, yatay konum bileşenlerini bir referans sisteminden diğerine aktarmak için kullanılır. Her model, önceki bölümde açıklanan fonksiyonel model, stokastik model, EKK ve robust dengeleme çerçevesinde çalışır. Aralarındaki fark, geometrik özellikleri, parametre sayıları ve formül yapılarıdır.

1.7.11. Benzerlik Dönüşümü

İki boyutlu benzerlik (Helmert) dönüşümü, öteleme, dönme ve ölçek faktörü olmak üzere dört parametre kullanarak farklı koordinat sistemleri arasında yüksek doğruluklu konum aktarımı sağlayan, haritacılık ve jeodezide yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. F.R. Helmert tarafından geliştirilen bu dönüşümde, parametreler genellikle iki sistemde ortak noktalar üzerinden En Küçük Kareler (EKK) yöntemiyle kestirilir. Dönüşümün doğruluğu, ortak noktaların sayısı, dağılımı ve kalitesi ile doğrudan ilişkili olup, matris formundaki doğrusal denklemler sistemi çözülerek elde edilir. Geometrik sadeliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle afin dönüşüme göre tercih edilen bu yöntem, büyük veri setleri, farklı projeksiyon sistemleri ve lokal yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda, gerektiğinde ağırlıklandırma ve modern matematiksel yaklaşımlarla desteklenerek kullanılmaktadır (Berk ve Komadina, 2013; Erdoğan ve ark., 2018; Zeng ve ark., 2018).



Şekil 9. Benzerlik dönüşümü (Öcalan 2019)

$$X' = aX - bY + t_x \tag{80}$$

$$Y' = bX + aY + t_y \tag{81}$$

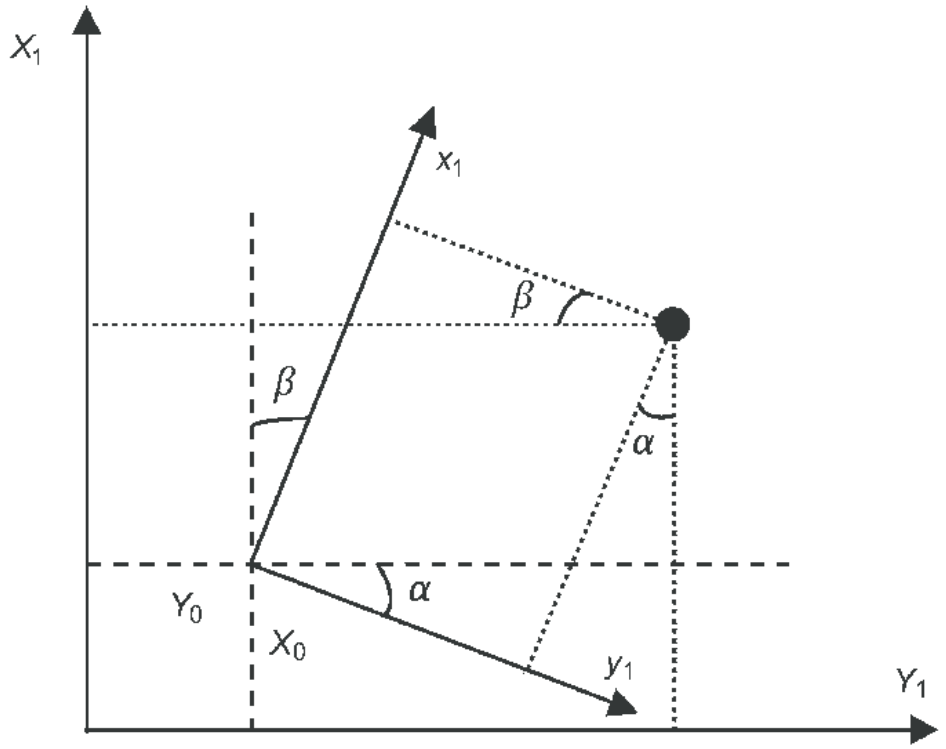
Benzerlik dönüşümünün fonksiyonel modelinin genel formu formül 80-81'de verilmektedir.

$$\mathrm{l} = \begin{bmatrix} l_{X_1} \\ l_{Y_1} \\ \vdots \\ l_{X_n} \\ l_{Y_n} \end{bmatrix}, \mathrm{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix} \mathrm{A} = \begin{bmatrix} X_1 & -Y_1 & 1 & 0 \\ Y_1 & X_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & -Y_n & 1 & 0 \\ Y_n & X_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{82}$$

51-79 numaralı formüller, formül 82'de verilen fonksiyonel modelin lineer formuna ait matrisler kullanılarak çözülür. Benzerlik dönüşümünde bilinmeyen sayısının 4 olması nedeniyle serbestlik derecesi $f = (2n - 4)$ olarak hesaplanır.

1.7.12. Afin Dönüşümü

İki boyutlu afin dönüşümü, bir düzlemdeki noktaların başka bir düzleme doğrusal ve öteleme bileşenleriyle aktarılmasını sağlayarak ölçekleme, dönme, kaydırma ve öteleme işlemlerini tek bir modelde birleştirir. Harita projeksiyonları ve jeodezik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu yöntem, dönüşüm parametrelerinin genellikle en küçük kareler yöntemiyle, iki sistemde ortak ve geometrik olarak iyi dağılmış noktalar üzerinden kestirilmesine dayanır. Ölçüm hatalarının etkisini azaltmak için robust istatistiksel teknikler veya toplam en küçük kareler yöntemi de uygulanabilir. Doğru parametre seçimi ve hata analizi, dönüşümün doğruluğunu doğrudan etkilerken; GNSS verilerinin ulusal sistemlere aktarılması, farklı datumlar arası dönüşüm ve projeksiyon sistemlerine geçiş gibi uygulamalarda sağladığı esneklik nedeniyle, afin dönüşüm modern jeodezik çalışmaların temel araçlarından biri olarak önemini korumaktadır (Gullu ve ark., 2017; Erdoğan ve ark., 2018).



Şekil 10. Afin dönüşümü (Sisman, 2014)

$$X' = aX + bY + t_x \tag{83}$$

$$Y' = cX + dY + t_y \tag{84}$$

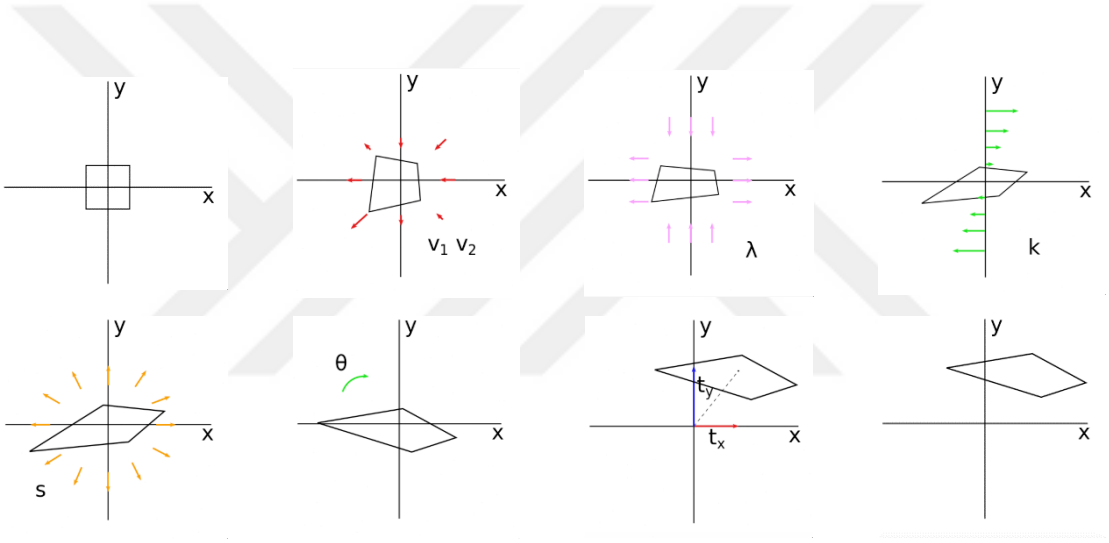
Afin dönüşümünün fonksiyonel modelinin genel formu formül 83-84'te verilmektedir.

$$\mathrm{l} = \begin{bmatrix} l_{X_1} \\ l_{Y_1} \\ \vdots \\ l_{X_n} \\ l_{Y_n} \end{bmatrix}, \mathrm{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \mathrm{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & X_n & Y_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{85}$$

51-79 numaralı formüller, formül 85'te verilen fonksiyonel modelin lineer formuna ait matrisler kullanılarak çözülür. Afin dönüşümünde bilinmeyen sayısının 6 olması nedeniyle serbestlik derecesi $f = (2n - 6)$ olarak hesaplanır.

1.7.13. Projektif Dönüşüm

İki boyutlu projektif dönüşüm, homojen koordinatlar kullanılarak 3×3'lük bir matrisle tanımlanan, doğruları koruyup paralellik gibi öklidyen özellikleri korumayan ve sekiz serbestlik derecesine sahip bir dönüşüm türüdür. Harita projeksiyonları ve fotogrametri gibi alanlarda kullanılan bu yöntem, parametrelerin kestirimi için genellikle toplam en küçük kareler yönteminden yararlanır; bu sayede gözlem ve model hataları birlikte minimize edilir. Doğruluk değerlendirmesinde hata metrikleri, varyans-kovaryans matrisi ve güven aralıkları önemli rol oynar. Uygulamalarda, ülkenin coğrafi özelliklerine uygun projeksiyon seçimi dönüşüm başarısını doğrudan etkiler sağlar (Ziggah ve ark., 2016; Jenny ve Šavrič, 2017; Qin ve ark., 2020).



Şekil 11. Projektif dönüşüm (Link-2)

$$X' = \frac{aX + bY + c}{gX + hY + 1}, Y' = \frac{dX + eY + f}{gX + hY + 1} \tag{86}$$

Projektif dönüşümünün fonksiyonel modelinin genel formu formül 86'da verilmektedir.

$$l = \begin{bmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ X'_2 \\ Y'_2 \\ \vdots \\ X'_n \\ Y'_n \end{bmatrix}_{2nx1} \quad , \mathbf{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix}_{8\times 1} \tag{87}$$

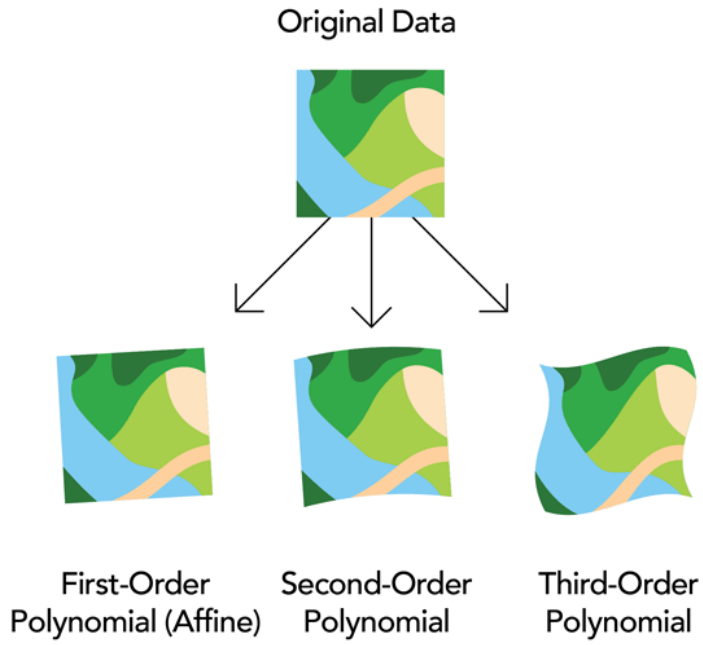
$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_i X'_i & -Y_i X'_i \\ 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & 1 & -X_i Y'_i & -Y_i Y'_i \end{bmatrix} , \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_n \end{bmatrix}_{2n\times 8} \tag{88}$$

51-79 numaralı formüller, formül 87-88'de verilen fonksiyonel modelin lineer formuna ait matrisler kullanılarak çözülür. Projektif dönüşümünde bilinmeyen sayısının 8 olması nedeniyle serbestlik derecesi $f = (2n - 8)$ olarak hesaplanır.

1.7.14. Polinomsal Dönüşüm

İki boyutlu polinomsal dönüşüm, farklı datumlar ve projeksiyon sistemleri arasında koordinat dönüşümünde, doğrusal olmayan ilişki kurarak karmaşık deformasyonları ve bölgesel farklılıkları modelleyebilen esnek bir yöntemdir. Eski ve yeni sistem koordinatları arasındaki ilişki, derecesi artırılabilen polinom denklemleri ile en küçük kareler yöntemi kullanılarak belirlenir; bu sayede lokal deformasyonlarda yüksek doğruluk sağlanabilir ancak aşırı dereceli polinomlar overfitting riskini artırabilir.

Uygun polinom derecesinin belirlenmesi doğruluk üzerinde belirleyicidir. Polinom derecesi artırılarak işlemin başarısı kontrol edilir. Polinom derecesi ve sonuçları karşılaştırıldığında hatanın artmaya başladığı dereceden bir önceki derece dönüşümlerde kullanılacak polinom derecesi olarak belirlenir.



Şekil 12. Polinomsal dönüşüm (Link-3)

$$X = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2$$
$$Y = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 \quad (89)$$

İkinci dereceden polinomsal dönüşümünün fonksiyonel modelinin genel formu formül 89'da verilmektedir(Çinar ve Ünel 2022; Lapaine ve Frančula 2022; Wang vd. 2022; Yilmaz 2023).

$$\mathrm{l} = \begin{bmatrix} X_1' \\ Y_1' \\ X_2' \\ Y_2' \\ \vdots \\ X_n' \\ Y_n' \end{bmatrix}_{2n\times 1}, \mathrm{x} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}_{12\times 1} \quad (90)$$

$$\mathrm{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & X_i & Y_i & X_i^2 & X_iY_i & Y_i^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & X_i & Y_i & X_i^2 & X_iY_i & Y_i^2 \end{bmatrix}, \mathrm{A} = \begin{bmatrix} \mathrm{A}_1 \\ \mathrm{A}_2 \\ \vdots \\ \mathrm{A}_n \end{bmatrix}_{2n\times 12} \quad (91)$$

51-79 numaralı formüller, formül 90-91'de verilen fonksiyonel modelin lineer formuna ait matrisler kullanılarak çözülür. İkinci dereceden polinomsal dönüşümünde bilinmeyen sayısının 12 olması nedeniyle serbestlik derecesi $f = (2n - 12)$ olarak hesaplanır.

1.8. Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Datum Dönüşümü

Makine öğrenmesi, son yıllarda jeodezi alanında giderek daha fazla kullanılmakta, özellikle klasik yöntemlerin ötesine geçerek karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modellemede avantaj sağlamaktadır (Seyyarer ve ark., 2022). Bu yaklaşım, Türkiye gibi karmaşık tektonik yapıya sahip ülkelerde klasik yöntemlerle ulaşılamayan doğruluk seviyelerine imkân tanır(Gullu ve ark., 2017).

Yapay sinir ağları (YSA), hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilmesi sayesinde koordinat dönüşümlerinde yüksek doğruluk sağlar. Ancak aşırı öğrenme (overfitting) riski bulunduğundan, veri bölme stratejileri ve doğrulama yöntemleriyle genellenebilirlik artırılmalıdır(Çinar ve Ünel 2022). Gizli katman ve nöron sayısının optimizasyonu ile uygun optimizasyon algoritmalarının seçimi, model başarısında kritik rol oynar(Konakoglu, 2020b).

Makine öğrenmesi modellerinde, kayıp veya hata fonksiyonları kullanılarak tahmin ve gerçek değerler arasındaki fark minimize edilir; model başarısı RMSE, MAE gibi metriklerle değerlendirilir(Çinar ve Ünel 2022; Seyyarer vd. 2022). Parametrik dönüşüm gerektirmeyen bu modeller, doğrudan veri üzerinden öğrenme yaparak entegre yazılımlarla yüksek doğruluklu koordinat dönüşümleri sağlar. Robust istatistik tekniklerle birleştirildiklerinde ise aykırı değerlerin etkisini azaltarak daha güvenilir sonuçlar üretirler(Akyürek ve Akkol, 2018). Bu gelişmeler hem akademik hem de pratik uygulamalarda esnek ve güvenilir çözümler sunmaktadır.

1.8.1. Lineer Regresyon Modelleri

Lineer regresyon modelleri, makine öğrenmesi tabanlı dönüşüm yöntemleri arasında özellikle iki boyutlu koordinat dönüşümlerinde yüksek doğruluk sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Çoklu lineer regresyon, birden fazla bağımsız değişken ile bir bağımlı değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi modelleyerek, coğrafi bilgi sistemleri ve arazi ölçümlerinde farklı datumlar arasındaki dönüşümlerde avantaj sunar(Çinar ve Ünel 2022). Matematiksel olarak $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n + \epsilon$ şeklinde ifade edilen bu modelde, β katsayıları regresyon parametrelerini, ϵ ise hata terimini temsil eder(Seyyarer ve ark., 2022).

Veri setinin kalitesi ve çeşitliliği, ÇLR'nin başarısında kritik öneme sahiptir. Örneğin, Gana'nın Tarkwa bölgesinde 328 GPS koordinat verisi ile yapılan bir çalışmada model test edilmiştir. Benzer şekilde, Türkiye'de ED50 ile ITRF96 datumları arasındaki dönüşümlerde farklı bölgelerden toplanan veriler, ülkenin coğrafi çeşitliliğine uygun dönüşüm fonksiyonlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Modelin açıklayıcı gücü R^2 katsayısı ile ölçülür (Konakoglu, 2020b). ÇLR, değişkenler arasındaki ilişkileri ortaya koymada güçlü bir araç olup, karmaşık coğrafi dönüşüm problemlerinde hem klasik hem modern yaklaşımlarla entegre edilerek yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmesini sağlar.

a) Lineer Regresyonun Matematiksel Modeli

İki boyutlu koordinat dönüşümlerinde Çoklu Lineer Regresyon modeli, hedef koordinatları kaynak koordinatlar üzerinden doğrusal bir ilişki ile modellemeye dayalı klasik bir yöntemdir(Rawlings ve ark., 1988; Draper, 1998). Literatürde, bu yaklaşım özellikle küçük ve orta ölçekli veri setlerinde, gürültü seviyesi düşük ve dönüşümün büyük ölçüde doğrusal olduğu durumlarda yüksek doğruluk sağlamasıyla öne çıkar(Seyyarer ve ark., 2022). Temel amaç, hedef koordinat sistemindeki değerleri, kaynak koordinat sistemindeki X ve Y bileşenlerini kullanarak en uygun doğrusal katsayılarla tahmin etmektir.

b) Fonksiyonel Model

Koordinat dönüşümünde her iki eksen için ayrı regresyon modeli kurulur:

$$Y' = \beta_{0Y} + \beta_{1Y}X + \beta_{2Y}Y + \varepsilon_Y$$
$$X' = \beta_{0X} + \beta_{1X}X + \beta_{2X}Y + \varepsilon_X \quad (92)$$

Burada:

- $X, Y \rightarrow$ kaynak koordinatlar (bağımsız değişkenler),
- $X', Y' \rightarrow$ hedef koordinatlar (bağımlı değişkenler),
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \rightarrow$ regresyon katsayıları,
- $\varepsilon \rightarrow$ rassal hata terimleri

Bu yapı, literatürde iki boyutlu afin dönüşümün istatistiksel formu olarak da değerlendirilir (Koch 1999). Model, regresyon katsayılarını tahmin ederken hem ölçek hem de yön bileşenlerini hesaba katar.

c) Matris Formu

Çoklu gözlem için denklem şu şekilde yazılır:

$$v = Ax - l \quad (93)$$

Gözlem vektörü (l): Tasarım matrisi (A): Bilinmeyenler vektörü (x): Artık vektörü (v):

$$l = \begin{bmatrix} Y'_1 \\ Y'_2 \\ \vdots \\ Y'_n \\ X'_1 \\ X'_2 \\ \vdots \\ X'_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & X_2 & Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_2 & Y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix} \quad \mathrm{x} = \begin{bmatrix} \beta_{0Y} \\ \beta_{1Y} \\ \beta_{2Y} \\ \beta_{0X} \\ \beta_{1X} \\ \beta_{2X} \end{bmatrix} \quad \mathrm{v} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{Y1} \\ \varepsilon_{Y2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{Yn} \\ \varepsilon_{X1} \\ \varepsilon_{X2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{Xn} \end{bmatrix} \quad (94)$$

En Küçük Kareler (EKK) Çözümü Parametre tahmini:

$$\hat{\mathrm{x}} = (\mathrm{A}^{\top}\mathrm{PA})^{-1}\mathrm{A}^{\top}\mathrm{Pl} \quad (95)$$

Burada:

P: ağırlık matrisi ($\mathrm{P} = \mathrm{Q}^{-1}$),

Q: gözlemlerin kovaryans matrisi.

Bu çözüm, literatürde BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) prensibine uygun olarak, verilerdeki ölçüm belirsizliklerini en az kareler anlamında minimize eder (Koch, 1999).

d) Duyarlılık Ölçütleri

Modelin istatistiksel güvenilirliği genellikle karesel ortalama hata ile değerlendirilir:

$$m_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{f}},\ f = n - u \rightarrow \text{serbestlik derecesi} \tag{96}$$

Koordinat dönüşümlerinde ÇLR, polinom tabanlı dönüşümler ve makine öğrenmesi yöntemleri ile karşılaştırıldığında, özellikle:

- Düşük sayıda parametre gerektirmesi
- Yorumlanabilir katsayılar üretmesi
- Hesaplama açısından hızlı olması

nedenleriyle hâlâ yaygın biçimde kullanılmaktadır (Çınar ve Ünel, 2022; Seyyarer, Karci ve Ateş, 2022). Ancak, dönüşüm ilişkisi belirgin şekilde doğrusal değilse veya veride bölgesel deformasyonlar mevcutsa, modelin doğruluğu düşer ve modern, doğrusal olmayan yöntemlere başvurmak gerekebilir.

1.8.2. Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP)

Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKAYSA), doğrusal olmayan ilişkileri modellemedeki başarısıyla öne çıkan bir yapay sinir ağı türüdür. Giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşan bu yapı, tek katmanlı algılayıcılardan farklı olarak karmaşık fonksiyonları öğrenebilir(Konakoglu, 2021). Coğrafi koordinat dönüşümleri gibi çok değişkenli problemlerde yüksek doğruluk sağlaması, ÇKAYSA'nın tercih edilme nedenidir(Ziggah ve ark., 2017). Parametrik dönüşüm gerektirmeden giriş-çıkış ilişkilerini öğrenebilmesi kullanıcı açısından önemli bir avantajdır.

Eğitimde genellikle geri yayılım algoritması kullanılır; ağın ağırlıkları ve bias değerleri hata fonksiyonunun gradyanına göre güncellenir. Optimizasyon teknikleri, modelin doğruluk ve genellenebilirliğini artırır. Başarı, katman ve nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonları, öğrenme oranı gibi hiperparametrelerin doğru seçimine bağlıdır (Samsonov,

2020). ÇKAYSA, diğer makine öğrenmesi yöntemleriyle karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek doğruluk ve daha düşük hata oranı vermektedir.

Pratikte, işlem süresi ve hesaplama maliyeti büyük veri setlerinde önemli hâle gelir. Bu nedenle modelin optimize edilmesi gerekir bağlıdır (Samsonov, 2020). YSA tabanlı dönüşüm modelleri, afin ve polinom yöntemlerine göre daha düşük hata metrikleri sağlamaktadır(Ziggah ve ark., 2017). Türkiye'de ED50–ITRF96 dönüşümünde, robust istatistiksel teknikler ve modern optimizasyon algoritmalarıyla desteklenmiş ÇKAYSA, yüksek doğruluk ve esneklik sunan güçlü bir alternatiftir (Samsonov, 2020; Seyyarer ve ark., 2022)

Yapay Sinir Ağları (YSA), doğrusal olmayan fonksiyonları yüksek doğrulukla modelleyebilme kapasiteleri sayesinde, jeodezik koordinat dönüşümlerinde özellikle doğrusal modellerin yetersiz kaldığı durumlarda güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Haykin, 2010; Heaton, 2017) İki boyutlu datum dönüşümünde, giriş vektörü kaynak koordinat sistemindeki (X, Y) değerlerinden oluşurken, çıkış vektörü hedef koordinat sistemindeki (X', Y') tahminleridir. Bu yaklaşım, karmaşık yerel deformasyonların, ölçüm hatalarının ve sistematik etkilerin öğrenilebilmesine olanak tanır.

a) MLP Modellerinin Matematiksel Modeli

Kaynak datumdaki giriş vektörü:

$$\mathrm{u} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \tag{97}$$

hedef datumdaki tahmin edilen çıkış vektörüne:

$$\hat{\mathrm{y}} = \begin{bmatrix} \hat{X}' \\ \hat{Y}' \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2. \tag{98}$$

haritalanır. Literatürde, modelin istatistiksel kararlılığını ve eğitim hızını artırmak için z-skor normalizasyonu önerilmektedir:

$$\tilde{\mathrm{u}} = \frac{\mathrm{u} - \mu_u}{\sigma_u}, \qquad \tilde{\mathrm{y}} = \frac{\mathrm{y} - \mu_Y}{\sigma_Y}. \tag{99}$$

(Solé, 2007). Bu sayede farklı büyüklükteki koordinat bileşenleri aynı ölçeğe çekilerek ağın öğrenme performansı iyileştirilir.

b) Ağ Mimarisi (İleri Yayılım)

L katmanlı tam bağlı bir Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarisinde:

$$\begin{aligned} \mathrm{a}^{(0)} &= \tilde{\mathrm{u}}, \\ \mathrm{z}^{(\ell)} &= \mathrm{W}^{(\ell)}\mathrm{a}^{(\ell-1)} + \mathrm{b}^{(\ell)}, \qquad \ell = 1,\ldots,L, \\ \mathrm{a}^{(\ell)} &= \boldsymbol{\phi}^{(\ell)}\big(\mathrm{z}^{(\ell)}\big), \qquad \ell = 1,\ldots,L-1, \\ \hat{\mathrm{y}} &= \mathrm{a}^{(L)} = \boldsymbol{\phi}^{(L)}\big(\mathrm{z}^{(L)}\big). \end{aligned} \tag{100}$$

Çıkış katmanında genellikle doğrusal aktivasyon $\boldsymbol{\phi}^{(L)}(\mathrm{z}) = \mathrm{z}$ kullanılırken gizli katmanlarda doğrusal olmayan $\mathrm{tansig}(z) = \tanh(z)$ veya $\mathrm{logsig}(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$. fonksiyonları tercih edilir(Hornik ve ark., 1989). Eğitilmiş modelin çıktıları, denormalizasyon ile gerçek koordinat ölçeğine dönüştürülür:

$$\hat{\mathrm{y}} = \sigma_y \odot \tilde{\mathrm{y}} + \mu_y. \tag{101}$$

c) Kayıp Fonksiyonu (Eğitim Amacı)

Eğitim amacı, tahmin hatasını minimize etmektir. Ortalama Kare Hata (MSE), jeodezik uygulamalarda eşit veya ağırlıklı olarak kullanılabilir:

$$\mathcal{J}(\Theta) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (\tilde{\mathrm{y}}_i - \tilde{\hat{\mathrm{y}}}_i)^{\mathsf{T}}\mathrm{P}\big(\tilde{\mathrm{y}}_i - \tilde{\hat{\mathrm{y}}}_i\big) + \lambda \sum_{\ell=1}^{L} \| \mathrm{W}^{(\ell)} \|_F^2, \tag{102}$$

Burada P ağırlık matrisi, λ ise L2 düzenleme katsayısıdır. L2 düzenleme modelin aşırı öğrenmesini engelleyerek genelleme yeteneğini artırır (Ng, 2004).

d) Eğitim Algoritması

MATLAB ortamında koordinat dönüşümlerinde sıkça tercih edilen trainlm algoritması, Levenberg–Marquardt optimizasyonunu uygular. Bu yöntem, Gauss–Newton yaklaşımının hızını ve gradient descent'in kararlılığını birleştirerek küçük/orta boyutlu veri setlerinde hızlı yakınsama sağlar(M. T. Hagan ve M. B. Menhaj, 1994).

e) Geri Yayılım (Genel Biçim)

Gradyanlar, ileri yayılımın tersine hatanın katmanlar boyunca zincir kuralı ile iletilmesiyle hesaplanır:

$$\begin{aligned} \delta^{(L)} &= \left(\mathrm{a}^{(L)} - \tilde{\mathrm{y}}\right) \odot \phi^{(L)\prime}\left(\mathrm{z}^{(L)}\right), \\ \delta^{(\ell)} &= \left(\mathrm{W}^{(\ell+1)\top}\delta^{(\ell+1)}\right) \odot \phi^{(\ell)\prime}\left(\mathrm{z}^{(\ell)}\right), \ell = L-1,\ldots,1, \end{aligned} \tag{103}$$

Bu gradyanlar kullanılarak $\mathrm{W}^{(\ell)}$ ve $\mathrm{b}^{(\ell)}$ güncellenir. Mini-batch eğitimde gradyanlar örnekler üzerinden ortalanır ve L2 düzenleme terimi eklenir. L2 düzenleme için:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \ell}{\partial \mathrm{W}^{(\ell)}} = \delta^{(\ell)}\mathrm{a}^{(\ell-1)\top}, \frac{\partial \ell}{\partial \mathrm{b}^{(\ell)}} = \delta^{(\ell)}. \\ &\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial \mathrm{W}^{(\ell)}} \leftarrow \frac{1}{\mathrm{batch}}\sum\delta^{(\ell)}\mathrm{a}^{(\ell-1)\top} + 2\lambda\mathrm{W}^{(\ell)}. \end{aligned} \tag{104}$$

f) Hata Ölçütleri

Modelin doğruluğu genellikle RMSE ve R^2 metrikleri ile değerlendirilir:

$$\begin{aligned} RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \| \mathrm{e}_i \|_2^2}, \\ R^2 &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \| \mathrm{e}_i \|_2^2}{\sum_{i=1}^{n} \| \mathrm{y}_i - \bar{\mathrm{y}} \|_2^2}, \bar{\mathrm{y}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{y}_i. \end{aligned} \tag{105}$$

Bu ölçütler, modelin hem genel hata seviyesini hem de açıklama gücünü yansıtır. Jeodezik dönüşümlerde düşük RMSE ve yüksek R^2, dönüşüm modelinin güvenilir olduğunu gösterir.

1.8.3. Gaussian Süreç Regresyonu

Gaussian Süreç Regresyonu (GPR), parametrik olmayan yapısı ve doğruluk potansiyeliyle öne çıkan bir regresyon yöntemidir. Karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleyebilir, tahminlerin yanında belirsizlikleri de sağlayarak hata analizi ve güven aralıklarının belirlenmesinde avantaj sunar(Wang ve ark., 2022). Temelinde, veri noktaları arasındaki benzerlikleri tanımlayan çekirdek fonksiyonları yer alır; uygun çekirdek seçimiyle hem lineer hem de karmaşık dönüşümler başarıyla yakalanabilir.

Model karmaşıklığı, veri miktarına ve dağılımına bağlı olarak otomatik ayarlanır, bu da overfitting riskini azaltır. Hiperparametre optimizasyonu, çekirdek parametreleri ve gürültü varyansının belirlenmesi gibi adımlar, doğruluk ve genelleme yeteneğini artırır (Goodfellow ve ark., 2020). Türkiye'nin bölgesel farklılıkları dikkate alındığında, GPR'nin esnekliği ED50–ITRF96 dönüşümlerinde önemli bir avantajdır.

GPR, parametrik dönüşüm gerektirmeden doğrudan veri üzerinden çalışabilir; tahmin belirsizlikleri, sonuçların güvenilirliğini değerlendirmede kritik rol oynar (Goodfellow ve ark., 2020; Wang ve ark., 2022). Hesaplama maliyeti büyük veri setlerinde yüksek olsa da modern optimizasyon teknikleri ve gelişmiş çekirdek yaklaşımları bu sınırlamayı büyük ölçüde aşmaktadır.

a) GPR Yönteminin Matematiksel Modeli

Gaussian Process Regression (GPR), giriş-çıkış ilişkilerini doğrudan parametre uzayında değil, fonksiyonlar uzayında tanımlayan olasılıksal bir regresyon yöntemidir (Rasmussen ve Williams, 2005). Bu yaklaşımda, her giriş noktası $\mathrm{x}_i \in \mathbb{R}^d$ için çıktı şu şekilde modellenir:

$$y_i = f(\mathrm{x}_i) + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2) \tag{106}$$

Burada σ_n^2 gözlem gürültüsünün varyansıdır ve modelin ölçüm belirsizliğini açıkça ifade etmesini sağlar. Bu yapı, özellikle koordinat dönüşümünde ölçüm hatalarının etkisini istatistiksel olarak hesaba katma açısından kritik önemdedir.

b) Gaussian Process Önceli

GPR'nin temel varsayımı, modelin çıktısını üreten fonksiyonun tüm tanım kümesi üzerinde bir Gauss süreci tarafından tanımlanmasıdır:

$$f(\mathrm{x}) \sim \mathcal{GP}\big(0, k(\mathrm{x}, \mathrm{x}')\big) \tag{107}$$

Burada $k(\mathrm{x}, \mathrm{x}')$ çekirdek (kernel) fonksiyonudur. Çekirdek, girdiler arasındaki benzerliği ölçerek, fonksiyonun düzleşme, pürüzlülük veya periyodiklik gibi özelliklerini belirler (Williams ve Rasmussen, 2006).

Bu çalışmada kullanılan RBF (Radial Basis Function) çekirdeği:

$$k_{\mathrm{RBF}}(\mathrm{x}, \mathrm{x}') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{\| \mathrm{x} - \mathrm{x}' \|^2}{2\ell^2}\right) \tag{108}$$

σ_f^2 : sinyal varyansı (fonksiyonun ölçeğini belirler)

ℓ : uzunluk ölçeceği, fonksiyonun giriş değişkenlerine karşı duyarlılığını kontrol eder.

RBF çekirdeği, jeodezik koordinat dönüşümlerinde sıkça tercih edilir çünkü sürekli, türevlenebilir ve yüksek boyutlu uzaylarda da kararlı tahminler sağlar(Seeger, 2004).

c) Kernel Matrisi

Eğitim verileri Xtrain için kernel matrisi:

$$K_{ij} = k\big(x_i, x_j\big) + \sigma_n^2 \delta_{ij} \tag{109}$$

Bu matris simetrik pozitif tanımlıdır ve modelin tüm tahminlerinin temelini oluşturur. Parametre vektörü:

$$\alpha = K^{-1} y \tag{110}$$

şeklinde hesaplanır. Bu işlem, gözlem vektörünün kernel uzayındaki ters çözümüne karşılık gelir.

d) Tahmin Mekanizması

Yeni bir x* girişi için ortalama tahmin:

$$\hat{y}^* = k^{*\mathrm{T}}\alpha \tag{111}$$

Tahmin varyansı:

$$\sigma^2 = k(x, x^*) - k^T K^{-1} k \tag{112}$$

Burada, $k_* = [k(x_1, x), \ldots, k(xn, x)]^{\mathrm{T}}$ yeni giriş ile eğitim verileri arasındaki kernel benzerliklerini içerir.

GPR, parametrik olmayan bir yöntem olması nedeniyle, model karmaşıklığının veri miktarına uyum sağlaması açısından esnek bir yapıya sahiptir. Rasmussen ve Williams, bu yöntemi hem teorik hem de pratik açıdan detaylı şekilde açıklamış, özellikle gürültülü ve az sayıda gözlem içeren problemlerde üstün performans gösterdiğini vurgulamıştır.

Ayrıca GPR'nin sunduğu tahmin belirsizliği ölçüsü, yalnızca en iyi tahmini değil, aynı zamanda bu tahminin güven aralığını da vermesi bakımından klasik regresyon yöntemlerinden ayrılır. Bu özellik, jeodezik ağ dengeleme ve hassas konum belirleme çalışmalarında karar destek mekanizması olarak kullanılabilir.

1.8.4. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, SVM)

Destek Vektör Makineleri (SVM), yüksek boyutlu özellik uzayında optimal ayırıcı hiper düzlemler kurarak karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde kullanılan denetimli öğrenme yöntemleridir. Güçlerini, veriyi örtük olarak daha yüksek boyuta taşıyan çekirdek fonksiyonlarından alırlar. Bu "çekirdek hilesi" (kernel trick), mekânsal yakınlık veya topolojik ilişkiler gibi alan özelliklerini modele yansıtarak, farklı bölgeler arasında genellenebilirliği artırır(Bengio ve ark., 2013).

Yaygın çekirdek türleri arasında RBF, polinom ve doğrusal çekirdekler bulunur. Çekirdek seçimi, modelin veri yapısına uygunluğunu ve öğrenme kapasitesini belirler. Gürültüye ve aykırı değerlere karşı dayanıklı olan SVM'ler, konveks optimizasyon sayesinde tek ve küresel optimum çözümler üretir. Bu özellik, hem sınıflandırma hem de regresyon görevlerinde güvenilirlik sağlar(Hinton ve ark., 2006).

Son çalışmalar, örneklem seçimi yanlılığı ve dağılım kaymaları gibi problemlere karşı SVM'leri daha sağlam hale getirmeye odaklanmıştır. Örneğin, dağılımsal olarak sağlam optimizasyon prensipleri ile eğitim verisinin yeniden ağırlıklandırılması, ulusal coğrafi altyapılarda dönüşüm güvenilirliğini artırmıştır(Ferry ve ark., 2023). Ayrıca çekirdek

yoğunluk kestirimi gibi yöntemler, hata dağılımlarının görselleştirilmesinde ve uygun çekirdek seçiminin ön analizinde kullanılabilir(Kitchenham ve ark., 2017).

SVM'ler dışında çekirdek temelli algoritmalar, Gaussian süreç regresyonu ve kernel PCA gibi yöntemleri kapsar. Bu teknikler, doğrusal olmayan bağımlılıkları modelleyerek dönüşüm doğruluğunu artırabilir. Derin özellik çıkarımı ile çekirdek makineleri arasındaki sinerji, doğruluk ve sağlamlığı daha da ileri taşıyabilir (Bengio ve ark., 2013).

Büyük ölçekli veri setlerinde, SVM'lerin eğitim maliyeti destek vektörlerinin sayısıyla artar. Bu durum, yaklaşık çekirdek yöntemleri ve paralel hesaplama teknikleriyle azaltılabilir (Hinton ve ark., 2006). Klasik jeodezik modeller ile veri odaklı yaklaşımların birleştiği hibrit çerçeveler ise, veri heterojenliği ve değişen coğrafi altyapılar gibi zorlukları aşmada kritik bir rol oynar(Hinton ve ark., 2006; Bengio ve ark., 2013; Kitchenham ve ark., 2017; Ferry ve ark., 2023).

a) SVM Yönteminin Matematiksel Modeli

Destek Vektör Regresyonu, Support Vector Machines (SVM) yaklaşımının regresyon problemlerine uyarlanmış versiyonudur(Vapnik, 1998; Schölkopf ve Smola, 2002). SVR'nin temel amacı, tahmin edilen değerlerin belirli bir tolerans bandı ϵ içinde kalmasını sağlarken, modelin karmaşıklığını minimumda tutmaktır. Doğrusal SVR modeli:

$$f(\mathrm{x}) = \mathrm{w}^{\top}\mathrm{x} + b \tag{113}$$

Burada w ağırlık vektörü, b bias terimidir. Model, yalnızca tolerans ϵ sınırını aşan hatalara odaklanarak gereksiz parametre öğrenmesini engeller ve aşırı uyumu (overfitting) azaltır.

b) Optimizasyon Formülasyonu

SVR'nin optimizasyon problemi, w normunu minimize ederek modelin düzleştirilmesini hedefler, ancak aynı zamanda tolerans dışındaki sapmalar için ceza (C) uygular:

$$\min_{\mathrm{w},b,\xi_i,\xi_i^*} \frac{1}{2} \| \mathrm{w} \|^2 + C \sum_{i=1}^{n} (\xi_i + \xi_i^*) \tag{114}$$

koşullar:

$$\begin{cases} y_i - (\mathrm{w}^\top \mathrm{x}_i + b) \leq \epsilon + \xi_i \\ (\mathrm{w}^\top \mathrm{x}_i + b) - y_i \leq \epsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \tag{115}$$

Burada, ξ_i, ξ_i^* gevşeme değişkenleri olup tolerans dışındaki sapmaları temsil eder. C parametresi, modelin hatalara karşı ne kadar katı olacağını belirler.

c) Dual Form ve Kernel Yaklaşımı

Doğrusal olmayan ilişkilerde SVR, verileri yüksek boyutlu özellik uzayına yansıtan çekirdek (kernel) fonksiyonlarını kullanır. Dual formda model:

$$f(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i - \alpha_i^*)\, K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}) + b \tag{116}$$

Burada α_i, α_i^* Lagrange çarpanlarıdır. Literatürde en yaygın kullanılan kernel fonksiyonları:

- Doğrusal: $K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}_j) = \mathrm{x}_i^\top \mathrm{x}_j$
- RBF (Radial Basis Function): $K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}_j) = \exp\left(-\frac{\|\mathrm{x}_i - \mathrm{x}_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$
- Polinom (Polynomial): $K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}_j) = (\mathrm{x}_i^\top \mathrm{x}_j + 1)^d$
- Sigmoid: $K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}_j) = \tanh(\kappa \mathrm{x}_i^\top \mathrm{x}_j + \theta)$

Özellikle RBF kernel, koordinat dönüşümlerinde doğrusal olmayan ilişkilerin modellenmesinde en yaygın tercih edilen çekirdektir(Schölkopf ve Smola, 2002).

d) Koordinat Dönüşümünde Uygulama

İki boyutlu datum dönüşümünde SVR, $X \in \mathbb{R}^{n \times m}$ giriş koordinatları ile $Y \in \mathbb{R}^{n \times 2}$ hedef koordinatlarını ilişkilendirir. Her çıktı bileşeni için ayrı bir SVR modeli kurulur:

$$f_x(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} \left(\alpha_i^{(x)} - \alpha_i^{(x)}\right) K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}) + b_x$$
$$f_y(\mathrm{x}) = \sum i = 1^n \left(\alpha_i^{(y)} - \alpha_i^{(y)}\right) K(\mathrm{x}_i, \mathrm{x}) + b_y \quad (117)$$

Bu yapı, dönüşüm parametrelerinin doğrudan katsayılarla değil, destek vektörleri üzerinden modellenmesini sağlar.

SVR, özellikle yüksek boyutlu ve doğrusal olmayan ilişkilerde parametrik olmayan güçlü bir yöntem olarak tanınır. Coğrafi bilgi sistemleri ve jeodezik dönüşüm problemlerinde, az sayıda veri noktasından bile yüksek doğrulukla tahmin yapabilmesi önemli bir avantajdır(Maity ve Kumar, 2008; Samui, 2008). RBF kernel ile kullanıldığında, yerel değişimleri yakalamada klasik polinom veya afin dönüşüm yöntemlerine göre daha yüksek hassasiyet sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, C, ϵ ve kernel parametrelerinin uygun seçilmemesi durumunda aşırı öğrenme riski mevcuttur; bu nedenle çapraz doğrulama ile hiperparametre optimizasyonu önerilmektedir.

1.8.5. Kriging Yöntemi

Kriging, deterministik ve stokastik bileşenleri birleştiren güçlü bir istatistiksel enterpolasyon yöntemidir. Mekânsal korelasyonun yüksek olduğu veri setlerinde güvenilir tahminler üretebilmesi, yöntemi jeodezi, jeoloji, madencilik, hidroloji ve CBS gibi birçok alanda yaygın kullanılır hale getirmiştir(Rees ve Cressie, 1993). Temel amaç, düzensiz konumlu gözlemler arasındaki mekânsal bağımlılığı kullanarak bilinmeyen noktaların değerlerini olasılıksal olarak kestirmektir.

Yöntemin ana bileşenleri variogram, ağırlık fonksiyonları ve mekânsal kovaryans yapısıdır. Variogram, nokta uzaklığı ile değer farklarının varyansını ilişkilendirerek bağımlılığı nicel olarak ifade eder. Tahminler, variogram modelinden türetilen ağırlıklı ortalama ile yapılır; ağırlıklar hem mesafeye hem de mekânsal yapıya bağlıdır(Hohn, 1991).

Kriging'in yaygın türleri arasında Ordinary, Simple, Universal ve Co-Kriging bulunur. Tür seçimi, veri ortalaması, trend varlığı veya birden fazla değişkenin kullanımı gibi faktörlere bağlıdır(Chilès ve Delfiner, 2012). Modelleme süreci iki aşamadan oluşur: variogram analizi ile modelin kurulması ve bu modele dayalı tahminlerin yapılması.

Kriging, deterministik yöntemlerden farklı olarak, her tahmin için belirsizlik ölçüsü sağlar. Bu özellik, özellikle güvenilirlik analizinin önemli olduğu uygulamalarda avantaj sunar. Ancak, büyük veri setlerinde yüksek hesaplama yükü ve doğru variogram modelinin seçilmesinin uzmanlık gerektirmesi gibi sınırlılıklara sahiptir (Webster ve Oliver, 2007).

a) Kriging Yönteminin Matematiksel Modeli

Ordinary Kriging, mekânsal olarak bağımlı verilerin tahmininde kullanılan lineer ve yansız (unbiased) bir enterpolasyon yöntemidir. Bu yöntemde, tahmin edilecek konumdaki değer, çevresindeki bilinen kontrol noktalarının ağırlıklı ortalaması olarak modellenir (Howarth, 1979; Rees ve Cressie, 1993).

$$\hat{Z}(\mathrm{s0}) = \sum i = 1^{n} \lambda_i Z(\mathrm{s}_i) \tag{118}$$

Burada λ_i Kriging ağırlıklarıdır ve şu koşulu sağlar:

$$\sum i = 1^{n} \lambda_i = 1 \tag{119}$$

Bu kısıt, Ordinary Kriging'in ortalama koruma koşulu olarak bilinir ve tahminlerde sistematik sapmayı engeller.

b) Stokastik Model ve Variogram

Kriging'in stokastik temeli, gözlemler arasındaki mekânsal bağımlılığın yarı-varyans $\gamma(h)$ fonksiyonu ile ifade edilmesidir. Bu fonksiyon, iki nokta arasındaki mesafe h arttıkça değerlerin benzerliğinin nasıl azaldığını tanımlar. Literatürde sık kullanılan teorik variogram modelleri:

- Küresel (Spherical): kısa mesafelerde lineer artış, menzil a civarında plato yapar.
- Üstel (Exponential): benzerlik mesafe ile üstel olarak azalır.
- Gauss (Gaussian): başlangıçta yavaş artış, uzun mesafelerde sabitlenme.

$$\gamma(h) = nugget + sill \cdot f(h; a) \tag{120}$$

Burada nugget kısa mesafelerdeki mikro ölçekli değişkenliği ve ölçüm hatasını, sill varyogramın plato seviyesini, a ise menzili ifade eder.

c) Kovaryans Yapısı ve Sistem Denklemleri

Variogram fonksiyonu kovaryans matrisi C ile ilişkilidir:

$$C_{ij} = sill - \gamma(h_{ij}) \tag{121}$$

Bu kovaryans matrisi, tahmin yapılacak nokta ile kontrol noktaları arasındaki kovaryans vektörü c_0 ile birlikte şu sistemde çözülür:

$$\begin{bmatrix} C & 1 \\ 1^\top & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{122}$$

Burada μ Lagrange çarpanıdır ve ortalama koruma koşulunu sağlamak için eklenir.

d) Tahmin ve Modelin İşleyişi

Lineer sistem çözülerek λ_i ağırlıkları elde edilir. Bu ağırlıklar, tahmin noktası değerinin kontrol noktaları değerleriyle ağırlıklı ortalamasında kullanılır:

$$\hat{Z}(\mathrm{s0}) = \sum i = 1^n \lambda_i Z(\mathrm{s}_i) \tag{123}$$

Ordinary Kriging, özellikle mekânsal otokorelasyon gösteren verilerde istatistiksel olarak en uygun lineer yansız tahmin olarak kabul edilir(Matheron, 1963). Jeodezik ve haritacılık çalışmalarında, nokta yoğunluğunun düzensiz olduğu bölgelerde dahi güvenilir tahminler üretme kapasitesi nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır(Hohn, 1991).

Variogram modelinin doğru seçimi, tahmin doğruluğunun belirleyici unsurudur. Küresel model genellikle doğal arazi yüzeyleri için, üstel model yerel değişkenliğin yüksek olduğu alanlar için, Gauss modeli ise daha düzgün değişimlerin olduğu bölgeler için uygundur.

Kriging'in GPR gibi modern yöntemlerle ortak noktası, kovaryans fonksiyonunu temel alarak belirsizlik tahminleri yapabilmesidir; ancak Kriging, parametrik olmayan yapısına rağmen, mekânsal veri yapısına özgü yarı-varyans modellemesiyle klasik regresyon tekniklerinden ayrılır (Chilès ve Delfiner, 2012).

1.8.6. Fraktal Tabanlı Modeler

Fraktal tabanlı modeller, doğada sıkça görülen düzensiz, çok ölçekli ve öz-benzer yapıları tanımlamak için geliştirilmiş matematiksel araçlardır (Falconer, 2003). Öz-benzerlik, yapının farklı ölçeklerde tekrarlayan benzer geometrik desenlere sahip olmasını ifade ederken; fraktal boyut, bu karmaşıklığı sayısal olarak ölçer. Deterministik fraktallar belirli kurallara göre üretilirken, stokastik fraktallar rastlantısal ve düzensiz süreçleri temsil eder. Multifraktal analiz ise, tek bir fraktal boyutla açıklanamayan karmaşık yapıların çoklu fraktal özelliklerini ortaya koyar(Knoche vd. 1989).

Fraktal yaklaşımlar, kutu sayma, Higuchi yöntemi ve detrended fluctuation analysis (DFA) gibi tekniklerle öznitelik çıkarımı yaparak makine öğrenmesi algoritmalarıyla entegre edilebilir. Bu hibrit modeller, özellikle klasik yöntemlerin yakalayamadığı yapısal karmaşıklıkları başarıyla temsil eder.

Yöntemin başlıca avantajları:

- Ölçek bağımsızlık: Çok ölçekli analizlerde tutarlılık sağlar.
- Yapısal karmaşıklık duyarlılığı: Geometrik/topolojik bilgiyi öne çıkarır.
- Gürültüye direnç: Bozulmuş verilerde anlamlı desenleri korur.
- Kaotik sistem analizi: Deterministik fakat öngörülemez süreçleri modelleyebilir.

Uygulamalar arasında jeodezide yüzey deformasyon modellemesi, GNSS sinyal bozulma analizi, koordinat dönüşüm hatalarının karakterizasyonu; biyomedikalde EEG/ECG sinyallerinin sınıflandırılması; finansta piyasa serilerinin karmaşıklık analizi; uzaktan algılamada doku tanımlama yer almaktadır(Lopes ve Betrouni, 2009).

a) Fraktal Tabanlı Yöntemlerin Matematiksel Modeli

Fraktal ve kaotik tabanlı modeller, karmaşık, ölçekten bağımsız ve deterministik olarak tanımlanabilir dinamik sistemlerin, mekânsal veri dönüşümlerinde kullanılması fikrine dayanır. Jeodezik koordinat dönüşümleri gibi, hem lokal hem de global ölçekte doğruluk gerektiren problemlerde, doğrusal olmayan yapıları yakalayabilmesi bu yaklaşımın en önemli avantajıdır (Peitgen 1994).

b) Fonksiyonel Model

Kaynak datumdaki giriş vektörü:

$$\mathrm{u}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \tag{124}$$

öncelikle fraktal/kaotik öznitelik dönüşümüne tabi tutulur:

$$\phi(\mathrm{u}_i) = \text{Fraktalözellikler}(X_i, Y_i) \tag{125}$$

burada $\phi(\cdot)$ fonksiyonu escape time, smoothed escape, orbit özellikleri, trigonometrik açılar ve ham koordinatlar dahil olmak üzere n_f boyutlu bir öznitelik vektörü üretir.

Modelin genel formu:

$$\mathrm{y}_i = \phi(\mathrm{u}_i)^{\mathsf{T}}\mathrm{W} + \mathrm{t} + \varepsilon_i \tag{126}$$

Burada $\mathrm{W} \in \mathbb{R}^{n_f \times 2}$: dönüşüm katsayı matrisi, $\mathrm{t} \in \mathbb{R}^2$: bias vektörü, $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 \mathrm{I})$: hata terimidir.

c) Matris formu

Tüm gözlemler için:

$$\mathrm{v} = \mathrm{Ax} - \mathrm{L} \tag{127}$$

Burada; $\mathrm{L} \in \mathbb{R}^{2n \times 1}$: hedef koordinatların vektörleştirilmiş hali, $\mathrm{A} \in \mathbb{R}^{2n \times (2n_f + 2)}$: her nokta için X ve Y dönüşümleri ayrı bloklarda, x parametre vektörü, v: artık vektördür.

d) Stokastik Model

Hata kovaryans matrisi:

$$Qll = \sigma^2 I_{2n} \tag{128}$$

Ağırlık matrisi:

$$P = Qll^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} I_{2n} \tag{129}$$

e) Parametre Tahmini

Overfitting riskini azaltmak için ridge regresyon kullanılır:

$$\hat{x} = (\mathrm{A}^{\top}\mathrm{A} + \lambda \mathrm{I})^{-1}\mathrm{A}^{\top}\mathrm{L} \tag{130}$$

burada $\lambda > 0$ regularizasyon katsayısıdır ve yüksek boyutlu fraktal özniteliklerde katsayıların büyümesini kontrol eder (Hoerl ve ark., 1975).

f) Duyarlılık Ölçütü

Karesel Ortalama Hata:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathrm{v}^{\top}\mathrm{P}\mathrm{v}}{f}} \tag{131}$$

Burada, $f = n_{obs} - n_{param}$ serbestlik derecesi, $n_{obs} = 2n$ (çünkü her noktanın X ve Y gözlemi var), $n_{param} = 2n_f + 2$ (her eksen için öznitelik katsayıları ve bias terimleri) dir.

Fraktal tabanlı yöntemler, mekânsal karmaşıklığın çok ölçekli modellenmesi açısından güçlüdür. Özellikle Mandelbrot kümeleri ve Julia kümeleri gibi fraktal geometrilerden türetilen öznitelikler, koordinat dönüşüm modellerinde yerel varyasyonları yakalamada etkili bulunmuştur (Hartmann, 1990).

Kaotik sistemlerden elde edilen orbit ve escape-time gibi özellikler, deterministik fakat öngörülemez dağılım karakteristiği sayesinde klasik polinom veya sinir ağı tabanlı modellere kıyasla farklı bir ayrıştırma gücü sağlar (Ott, 2002). Bunun yanında, bu öznitelikler genellikle yüksek boyutlu olduğundan, ridge regresyon gibi regularizasyon teknikleri parametre tahminlerinin kararlılığını artırır ve genelleme hatasını düşürür (Willoughby, 1979).

Sonuç olarak, fraktal/kaotik tabanlı koordinat dönüşüm modelleri, özellikle lokal bozulmaların karmaşık yapıda olduğu bölgelerde, doğrusal olmayan ama deterministik karakterli ilişkileri temsil etmede avantaj sağlamaktadır. Jeodezik çalışmalar, bu yaklaşımın uydu tabanlı ölçüm sistemleri ve yerel haritalama uygulamalarında doğruluk iyileştirmesi sağlayabileceğini göstermektedir.

1.8.7. Bayesyen Yöntemi

Bayesyen yöntem, belirsizlik altında karar verme ve çıkarım için olasılıksal bir çerçeve sunar. Bayes teoremi, öncül (prior) bilgi ile gözleme dayalı olabilirlik (likelihood) bilgisini birleştirerek güncellenmiş olasılık (posterior) hesaplar (Goodfellow ve ark., 2020). Bu yaklaşım, veri miktarının sınırlı veya belirsizliğin yüksek olduğu durumlarda klasik yöntemlere göre güçlü bir alternatiftir.

Temel bileşenler öncül dağılım, olabilirlik fonksiyonu, sonral dağılım ve normalize edici sabittir. Öncel bilgi; önceki çalışmalar, uzman görüşü veya ölçümlerden türetilir ve gözlemlerle güncellenerek sonsal dağılım elde edilir. Parametrik Bayes modeller sabit parametrelerle, parametrik olmayanlar ise esnek parametre sayısıyla çalışır; hiyerarşik modeller çok katmanlı öncüller tanımlar (Wang ve ark., 2022).

Öğrenme sürecinde öncüller gözlemlerle güncellenir, karmaşık hesaplamalarda Markov Zinciri Monte Carlo (MCMC) veya varyasyonel Bayes gibi yöntemler kullanılır (Goodfellow ve ark., 2020). Tahminler yalnızca noktasal değil, olasılık dağılımı şeklinde sunularak güven aralıkları eklenir. Bu yapı, küçük veri kümelerinde, eksik verilerde veya güçlü öncül bilgilerin olduğu durumlarda avantaj sağlar ve aşırı öğrenmeyi doğal olarak sınırlar(Wang ve ark., 2022).

Bayesyen yöntemler; sınıflandırma, regresyon, model seçimi, medikal tanı, finansal risk analizi, robotik navigasyon ve doğal dil işleme gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Jeodezi, hidrografi ve uzaktan algılamada ise belirsizlik altında konumlandırma, hata modelleme ve veri füzyonunda önemli rol oynar(Goodfellow ve ark., 2020; Wang ve ark., 2022). Olasılık tabanlı tahmin yeteneği sayesinde yalnızca “ne olacağını” değil, “ne kadar emin olunabileceğini” de sağlar.

Bayesyen regresyon, klasik istatistiksel regresyonun olasılıksal bir genişlemesi olarak, model parametrelerinin belirsizliğini doğrudan nicelleştirir. Bu özellik, jeodezik koordinat dönüşümleri gibi ölçüm hatalarının ve modelleme belirsizliklerinin önemli rol oynadığı problemlerde, tahminlerin güvenilirlik düzeyini artırır(Solé, 2007; Gelman ve ark., 2013).

a) Fonksiyonel Model

Kaynak datumdaki giriş vektörü:

$$\mathrm{u}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2 \tag{132}$$

hedef datumdaki koordinatlara şu şekilde modellenir:

$$\mathrm{y}_i = f(\mathrm{u}_i; \mathrm{w}) + \varepsilon_i \tag{133}$$

Burada $f(\cdot)$ polinom tabanlı regresyon fonksiyonudur. Hata terimi ε, ortalaması sıfır ve kovaryansı $\sigma^2\mathrm{I}$ olan çok değişkenli normal dağılıma uyar:

$$\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2\mathrm{I}) \tag{134}$$

Polinom tabanlı öznitelik genişletmesi (derece d) ile:

$$\phi(\mathrm{u}_i) = [1, \quad X_i, \quad Y_i, \quad X_i^2, \quad X_iY_i, \quad Y_i^2, \quad \ldots]^\top \tag{135}$$

elde edilir. Çoklu gözlem için matris formu:

$$\mathrm{v} = \mathrm{Ax} - \mathrm{l} \tag{136}$$

b) Önsel (Prior) Dağılım

Bayesyen yaklaşımda parametreler sabit değil, rastgele değişkenlerdir. Katsayılar için Gaussian önseli:

$$\mathrm{w} \sim \mathcal{N}(\mu_0, \sigma_w^2\mathrm{I}) \tag{137}$$

Gürültü varyansı için ters-gamma önseli:

$$\sigma^2 \sim \text{Inv-Gamma}(\alpha_0, \beta_0) \tag{138}$$

Bu seçim, conjugate prior kullanımı sayesinde analitik çözüm elde edilmesini kolaylaştırır(Murphy, 2012).

c) Posterior Dağılım ve Parametre Güncellemesi

Bayes teoremi:

$$p(\mathrm{w}, \sigma^2 \mid \mathrm{y}) \propto p(\mathrm{y} \mid \mathrm{w}, \sigma^2) \cdot p(\mathrm{w}) \cdot p(\sigma^2) \tag{139}$$

Posterior ortalama ve kovaryans:

$$\mu_n = \Sigma_n \left(\frac{\mathrm{A}^\top \mathrm{y}}{\sigma^2} + \frac{\mu_0}{\sigma_w^2} \right)$$
$$\Sigma_n = \left(\frac{\mathrm{A}^\top \mathrm{A}}{\sigma^2} + \frac{\mathrm{I}}{\sigma_w^2} \right)^{-1} \quad (140)$$

Bu formülasyon, veri seti büyüdükçe posterior dağılımın belirsizliğinin azaldığını matematiksel olarak ortaya koyar.

d) Stokastik Model

Hata kovaryans matrisi:

$$Qll = \sigma^2 \mathrm{I} \quad (141)$$

Ağırlık matrisi:

$$\mathrm{P} = Qll^{-1} = \frac{1}{\sigma^2} \mathrm{I} \quad (142)$$

e) Tahmin

Yeni bir u* noktası için tahmin:

$$\hat{y}^* = \phi(\mathrm{u})^\top \mu n \quad (143)$$

Tahmin varyansı:

$$\mathrm{Var(y)} = \phi(\mathrm{u})^\top \Sigma n \phi(\mathrm{u}) + \sigma^2 \quad (144)$$

Bu, yalnızca nokta tahmini değil, tahmine ilişkin belirsizlik aralığını da sağlar.

Karesel ortalama hata:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathrm{v}^\top \mathrm{Pv}}{f}} \quad (145)$$

Bu, yalnızca nokta tahmini değil, tahmine ilişkin belirsizlik aralığını da sağlar. Bayesyen regresyon, overfitting riskini azaltma, belirsizlik tahmini yapabilme ve önsel bilgi ile modelin yönlendirilmesine imkan vermesi nedeniyle jeodezik dönüşümlerde güçlü bir

yöntemdir (Sambridge ve Mosegaard, 2002). Polinom tabanlı genişletmeler, özellikle yerel bozulmaların modellenmesinde etkili bulunmuştur(Koch, 1999). Bununla birlikte, yüksek derece polinomlar veri setinde multicollinearity sorunlarına yol açabileceği için önsel kovaryansın uygun seçimi kritik öneme sahiptir(Rasmussen ve Williams, 2005). Ayrıca, bazı çalışmalar Bayesyen regresyonu Gaussian Süreç Regresyonu gibi tamamen olasılıksal yaklaşımlarla karşılaştırarak, parametre sayısının az olduğu durumlarda Bayesyen yöntemlerin daha hızlı ve yorumlanabilir olduğunu göstermiştir(Solé, 2007).

1.8.8. Thin Plate Spline (TPS) Yöntemi

Thin Plate Spline (TPS), uzaysal verilerin düzgün ve sürekli biçimde dönüştürülmesini sağlayan, parametrik olmayan bir interpolasyon ve regresyon yöntemidir(Bookstein, 1989). Esnek fakat dirençli bir metal levhanın minimum bükülme enerjisi ile şekillendirilmesi metaforuna dayanır. Amaç, kontrol noktaları arasında minimum eğrilik enerjisi ile uyum sağlayan bir yüzey elde etmektir.

TPS, doğrusal bileşen ile radyal baz fonksiyonlarının birleşiminden oluşur. Radyal baz fonksiyonu genellikle iki nokta arasındaki Öklidyen uzaklığın kare ve logaritmik terimlerini içerir (Duchon, 1976). Parametreler, kaynak ve hedef noktalar arasındaki ilişkilerden türetilen lineer sistemin çözümüyle elde edilir.

Avantajları arasında düzensiz ve seyrek veri kümelerinde bile yüksek düzgünlük sağlama, dalgalanma ve aşırı uyum problemlerine karşı direnç gösterme ve parametre ayarına düşük bağımlılık yer alır. Ancak, kontrol noktası sayısının artmasıyla hesaplama maliyeti yükselir; bu nedenle büyük veri setlerinde altküme seçimi veya regularizasyon teknikleri önerilir (Donato ve Belongie, 2001).

TPS, bilgisayarla görmede görüntü kaynaştırma, yüz tanıma, biçim eşleştirme; jeodezide datum dönüşümleri, deformasyon analizleri; medikal görüntülemede organ eşleme; robotikte hareket tahmini gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır(Chui ve Rangarajan, 2003).

a) Thin Plate Spline (TPS) Matematiksel Modeli

Thin Plate Spline (TPS), iki boyutlu noktalar arasındaki dönüşümü minimum bükülme enerjisi ilkesine göre tanımlayan parametrik olmayan bir interpolasyon yöntemidir. Bu yöntem, hem doğrusal bileşenleri hem de doğrusal olmayan deformasyon bileşenlerini aynı

model içinde barındırabilmesiyle dikkat çeker (Bookstein, 1989). TPS, özellikle koordinat dönüşümleri, geometrik düzeltmeler ve yüzey deformasyon analizleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

b) Matematiksel Formülasyon

Kaynak koordinatlar:

$$\mathrm{X} = \{\mathrm{x}_i = (x_i, y_i)\} i = 1^n \tag{146}$$

Hedef koordinatlar:

$$\mathrm{Y} = \{\mathrm{y}_i = (X_i', Y_i')\} i = 1^n \tag{147}$$

TPS dönüşümü şu şekilde ifade edilir:

$$f(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} w_i \, U(\| \mathrm{x} - \mathrm{x}_i \|) + a_1 + a_x x + a_y y \tag{148}$$

Burada:

- w_i: radyal temel fonksiyon katsayları,
- a_1, a_x, a_y: afin (doğrusal) terim katsayları,
- $U(r)$: TPS kernel fonksiyonu.

c) TPS Kernel Fonksiyonu

Klasik thin plate spline kernel fonksiyonu:

$$U(r) = r^2 \log r \tag{149}$$

Burada:

- $r = \| \mathrm{x} - \mathrm{x}_i \|$ iki nokta arasındaki Öklid mesafesidir,
- $r = 0$ durumunda $U(0) = 0$ olarak tanımlanır.

d) Lineer Sistem Formu

TPS katsayıları aşağıdaki genişletilmiş lineer sistemden elde edilir:

$$\begin{bmatrix} K + \lambda I & P \\ P^{\top} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{w} \\ \mathrm{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{Y} \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$P = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \tag{150}$$

Burada: $K_{ij} = U(\| \mathrm{x}_i - \mathrm{x}_j \|)$: kernel matrisi, λ: düzenlileştirme parametresi olup aşırı uyumu önlemek için kullanılır, $\mathrm{w} \in \mathbb{R}^n$, $\mathrm{a} \in \mathbb{R}^3$ katsayı vektörleridir.

Bu sistemin çözülmesi ile hem global afin dönüşüm hem de lokal eğrisel deformasyon bileşenleri belirlenir.

e) Tahmin Denklemi

Model eğitildikten sonra herhangi bir $\mathrm{x} = (x, y)$ noktası için dönüşüm:

$$f(\mathrm{x}) = \sum_{i=1}^{n} w_i \, U(\| \mathrm{x} - \mathrm{x}_i \|) + a_1 + a_x x + a_y y \tag{151}$$

şeklinde yapılır. Aynı süreç hem X hem Y koordinat bileşenleri için ayrı ayrı uygulanır.

TPS, yüzey deformasyonlarını modellemedeki esnekliği nedeniyle coğrafi bilgi sistemleri, uzaktan algılama, biyometrik analiz, tıp görüntüleme ve bilgisayarlı görü uygulamalarında yaygın olarak tercih edilir(Duchon, 1976; Wahba, 1990). Koordinat dönüşümlerinde ise, özellikle yüksek doğruluk gerektiren ve klasik polinom dönüşümlerle tam olarak modellenemeyen karmaşık deformasyonlarda güçlü bir alternatif sunar.

Jeodezi ve fotogrametri literatüründe TPS, farklı datumlar veya projeksiyonlar arasındaki dönüşümde yerel bozulmaları etkin şekilde yakalayabilmesiyle öne çıkmaktadır (Goshtasby, 1988). Bununla birlikte, nokta sayısının artması ile K matrisinin boyutunun büyümesi hesaplama maliyetini artırabilir. Bu nedenle büyük veri setlerinde düzenlileştirme (λ) kullanımı ve uygun nokta seçimi önerilir.

Son bir çalışma, verimlilik, parametrizasyon sadeliği ve tahmin doğruluğu açısından TPS tabanlı modellerin, yaklaşık Gauss Rastgele Alan modellerine kıyasla avantajlı olduğunu ortaya koydu. Özellikle Bayesyen çerçevede, TPS modellerin daha hızlı yakınsama sağladığı, komut karmaşıklığının azaldığı ve koda daha sade entegre edilebildiği gösterilmiş(Cavieres ve ark., 2024).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

TUDDM, Türkiye'de günümüze kadar yürütülmüş haritacılık faaliyetleri neticesinde ortaya çıkmış olan ED50 datumu ile ITRF96 datumları arasındaki dönüşüm işlemlerini gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmıştır.

TUDDM'ni üretebilmek için öncelikle Türkiye genelinde kullanılan lokal datum dönüşüm parametrelerini hesaplamak için kullanılan ortak noktalar temin edilmiştir. Temin edilen noktalar MATLAB ortamında yüklenerek standart hale getirilmiştir. UTM projeksiyonundan LKK tasvir koordinatlarına geçilerek dilim numarası ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Böylece veri seti kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Başlangıçta temin edilen 62500 nokta üzerinde uyuşumsuz ölçü testler yapıldıktan, kontroller gerçekleştirildikten ve bu noktaların unique hale getirilmesi sonucunda 7313 adet kullanıma hazır nokta elde edilmiştir. Bu ortak nokta kümesini kullanan model TUM Modeli olarak adlandırılacaktır. TUSAGA Aktif noktalarını (181) ortak nokta kümesi olarak kullanan model CORS Modeli, TUTGA noktalarını (611) noktalarını ortak nokta kümesi olarak kullanan model TUTGA modeli olarak adlandırılacaktır.

Datum dönüşüm işlemleri nokta bazlı olarak yapılacağından öncelikle ortak nokta kümesinden dönüşüm parametrelerinin hesaplanması işlemlerinde kullanılacak noktaları belirleyen ortak nokta belirleme algoritmaları (ONBA) üretilmiştir. En yakın nokta algoritması dönüşüm noktasına en yakın belli sayıda noktayı seçerken açı-alan algoritması dönüşüm noktasının etrafını açısal olarak eşit parçalara bölerek bu alanlar içerisinden nokta seçimi yaparak daha homojen bir dağılımla noktaları belirlemektedir.

Dönüşüm işlemlerinde kullanılacak noktalar belirlendikten sonra klasik dönüşüm yöntemi algoritmaları (DYA) geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu kapsamda benzerlik, afin, projektif ve polinomsal dönüşüm modelleri kullanılmıştır. Ölçü güvenilirliğini artırmak amacıyla uyuşumsuz ölçü belirleme algoritmaları (UOBA) entegre edilmiştir; Huber, Hampel, Fair, IGG, Danimarka, Tukey, Andrews, T-Test ve RANSAC gibi yöntemler, uyuşumsuz ölçülerin etkisini azaltmak için kullanılmıştır

Klasik yöntemlerin yanında, makine öğrenmesi algoritmaları da geliştirilerek dönüşüm sürecine dahil edilmiştir. Lineer Regresyon (LR), Yapay Sinir Ağları (MLP), Gaussian Süreç Regresyonu (GPR), Destek Vektör Regresyonu (SVR), Kriging, Fraktal tabanlı modeller, Bayesyen yöntemler ve Thin Plate Spline (TPS) gibi yaklaşımlar, farklı

veri dağılımlarına karşı esneklik sağlamak amacıyla değerlendirilmiştir. Makine öğrenmesi modellerinde eğitim seti olarak TUM Modeline ait 7313 adet nokta normalize edilerek kullanılmıştır.

Çalışmada TUM, CORS, TUTGA modelleriyle makine öğrenmesi modelleri karşılaştırılarak üretilecek programda kullanılacak yöntemlerin neye göre seçileceği belirlenmiştir. Böylece nokta bazlı en iyi sonucu veren modelin kullanılacağı algoritma üretilmiştir.

TUDDM ile her noktada yapılacak dönüşüm işlemleri BÖHHBÜY'de belirtilen 9 cm karesel ortalama hata değerini, en büyük koordinat düzeltmesi olarak 14 cm değerini ve 200 km^2 alan için en az 4 orta nokta bulunması şartlarını sağlayacaktır. Böylece Türkiye coğrafi sınırları içerisinde, kullanıcı tarafından herhangi bir dönüşüm parametresi teminine ihtiyaç duymayan, jeodezik doğrulukta datum dönüşüm işlemlerini hızlı ve güvenilir olarak gerçekleştiren modeller TUDDM ile kullanıcılara sunulacaktır.

2.1. Çalışma Alanı

Türkiye coğrafi sınırları içerisinde datum dönüşümü probleminin günümüzde halen yaşanıyor olması, datum dönüşüm parametrelerinin temininin projelerde maliyet oluşturması ve işlem kalemi olması, temin edilen dönüşüm parametrelerinin her zaman istenilen jeodezik hassasiyeti sağlamaması gibi haritacılık mesleğine intisap etmiş herkesi yakından ilgilendiren problemi çözmek maksadı ile geliştirilecek bir model ile Türkiye coğrafi sınırları içerisinde talep edilen bir veya birden fazla noktanın koordinatının ED50 - ITRF96 datumları arasında herhangi bir dönüşüm parametresi temin etmeden BÖHHBÜY hükümlerinde belirtilen jeodezik hassasiyette dönüştüren modelin tasarlanması, üretilmesi, geliştirilmesi ve kullanıcıya sunulmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda, Türkiye' de yapılan ED50 ile ITRF96 datum dönüşüm işlemlerinde kullanılan 81 il ve ilçelerine ait ortak noktalar temin edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. 3° UTM koordinatlarının dilim bilgisine ihtiyaç duyması nedeniyle tüm ortak noktaların LKK tasvir koordinatları hesaplanmıştır. Üretilen algoritmalar ile dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

2.2. Veri Seti

Çalışmada kullanılan veri seti, Türkiye'de gerçekleştirilen datum dönüşüm işlemleri için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ve diğer ilgili kamu kurumları tarafından tesis edilen ve her iki datumda koordinatları bilinen kontrol noktalarından oluşmaktadır. Bu noktalar, bireysel olarak kurulan temaslarla temin edilmiştir. Temin edilen noktalar, il ve ilçe bazında datum dönüşüm parametrelerinin hassas bir şekilde hesaplanabilmesi amacıyla üretilmiş olup, ülke genelinde homojen bir dağılım göstermektedir.

Veri setinin oluşturulmasında, çeşitli devlet kurumlarının farklı zamanlarda gerçekleştirdiği ölçüm çalışmalarından yararlanılmıştır. Bu kurumlar arasında Harita Genel Komutanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, İller Bankası, TKGM ve çeşitli üniversitelerin araştırma birimleri bulunmaktadır. Her kurum tarafından farklı teknikler ve hassasiyet seviyeleri kullanılarak ölçülen bu kontrol noktaları, çalışmanın güvenilirliğini artırmak amacıyla kapsamlı kalite kontrol süreçlerinden geçirilmiştir.

Temin edilen veriler yalnızca koordinat verilerini içermektedir. Stokastik model için herhangi bir öncül ağırlık bilgisi veya duyarlık bilgisi içermemektedir. Bu nedenle stokastik modellerde giriş nokta ağırlıkları 1 alınmıştır.

2.2.1. Verilerin Depolanması

Dönüşüm parametrelerine ait veriler, Türkiye'nin tamamını kapsayacak şekilde ITRF96 ve ED50 datumları için sistematik olarak toplanmıştır. Toplanan veriler, ait oldukları coğrafi bölgelere göre il plaka kodları ve isimlerin yer aldığı hiyerarşik klasör yapıları içerisinde düzenli olarak depolanmıştır. Veri toplama sürecinde iki temel format ile karşılaşılmış olup, bunlar Excel formatındaki veriler (.xlsx, .xls uzantılı dosyalar) ve metin formatındaki veriler (.txt, .dns, .cks formatları) olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 13,Şekil 14).

660 BÖLGE NO
ITRF96-ED50

İKİ BOYUTTA DENGELEMELİ HELMERT BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜ İLE UYUŞUM TESTİ

Dönüşüm Parametreleri, Ölçek ve Dönüklük				Hata Hesabı	
cx :	129,95878	cy :	1,71960		
a :	1,000014328609	b :	-0,000007776496	Birim Ölçünün K.O.Hatası (m0) :	0.054 m.
Dönüklük :	0.000495 grad	Ölçek :	14.329 ppm (1:69790)	Birim Ölçünün Ort. Konum Hatası (mp) :	0.076 m.

X' = cx + a * X + b * Y Y' = cy + a * Y - b * X

Nokta No	Sistem-A		Sistem - B		Dönüşüm Sonrası Koordinatlar		Koordinat Düzeltmeleri		Test Büyüklüğü	Kriter Değer α = 0.05 için	
	Y	X	Y	X	Y'	X'	Vy(m)	Vx(m)	Ti	C	
N226	448007,219	4259734,295	448048,507	4259921,802	448048,484	4259921,806	-0,02	0,00	0,33	2,24	Uyuşumlu
N3227	442231,089	4256696,457	442272,179	4256883,994	442272,247	4256883,969	0,07	-0,02	1,01	2,24	Uyuşumlu
0L16G001	446236,726	4242179,744	446277,797	4242367,030	446277,829	4242367,017	0,03	-0,01	0,46	2,24	Uyuşumlu
L1710001	465337,985	4242819,012	465379,440	4243006,220	465379,367	4243006,146	-0,07	-0,07	1,48	2,24	Uyuşumlu
N.3153	456525,791	4265773,535	456567,253	4265960,977	456567,225	4265961,066	-0,03	0,09	1,39	2,24	Uyuşumlu
N.104	467012,048	4260801,552	467053,551	4260988,936	467053,593	4260988,930	0,04	-0,01	0,64	2,24	Uyuşumlu
L1620001	438436,641	4242420,662	438477,560	4242607,980	438477,634	4242607,999	0,07	0,02	1,05	2,24	Uyuşumlu
000N15200	433766,462	4240206,458	433807,387	4240393,794	433807,371	4240393,800	-0,02	0,01	0,24	2,24	Uyuşumlu
000N15700	433407,676	4237412,564	433448,593	4237599,896	433448,558	4237599,869	-0,04	-0,03	0,63	2,24	Uyuşumlu
000N30100	440372,236	4234008,135	440413,268	4234195,268	440413,191	4234195,337	-0,08	0,07	1,43	2,24	Uyuşumlu
N.327	455087,197	4232919,342	455128,360	4233106,380	455128,355	4233106,414	-0,01	0,03	0,47	2,24	Uyuşumlu
N.326	452213,753	4235013,921	452254,860	4235200,950	452254,886	4235201,045	0,03	0,09	1,35	2,24	Uyuşumlu
N.178	460217,496	4245122,410	460258,834	4245309,564	460258,822	4245309,617	-0,01	0,05	0,75	2,24	Uyuşumlu
ALACATI	442809,355	4238957,268	442850,355	4239144,629	442850,384	4239144,522	0,03	-0,11	1,52	2,24	Uyuşumlu
PASALIM	447156,080	4244985,903	447197,243	4245173,285	447197,218	4245173,209	-0,03	-0,08	1,08	2,24	Uyuşumlu
YARAN	448167,793	4236777,287	448208,857	4236964,508	448208,882	4236964,468	0,02	-0,04	0,64	2,24	Uyuşumlu

Şekil 13. Örnek excel verisi

TUN_PERTEK_ITRF_ED50.TXT

325_GIRI | 325_GIRD... | AFIN.CKS | AFIN.TXT | HELMERT... | HELMERT... | TUN_PER... | T

```
 1.00000986604970  0000  1.04080929387013  0006 5.99721493519165  0000 1.39815332371261  0002 1.04080929387013  0006 1.0000
0000

      381     526152.505    4319280.466     526168.067    4319462.275
      453     520537.962    4323679.494     520553.48     4323861.52
  4130005     465769.821    4325168.961     465784.97     4325350.88
     .282     570325.264    4304178.753      570341.3     4304360.33
  4320002     574312.891    4304682.764     574329.15     4304864.43
  4320001     570308.978    4310665.925     570325.12    4310847.629
      .77     528968.032    4303185.269     528983.83     4303367.23
                  0.000          0.000           0.000         0.000
                  0.000          0.000           0.000         0.000
```

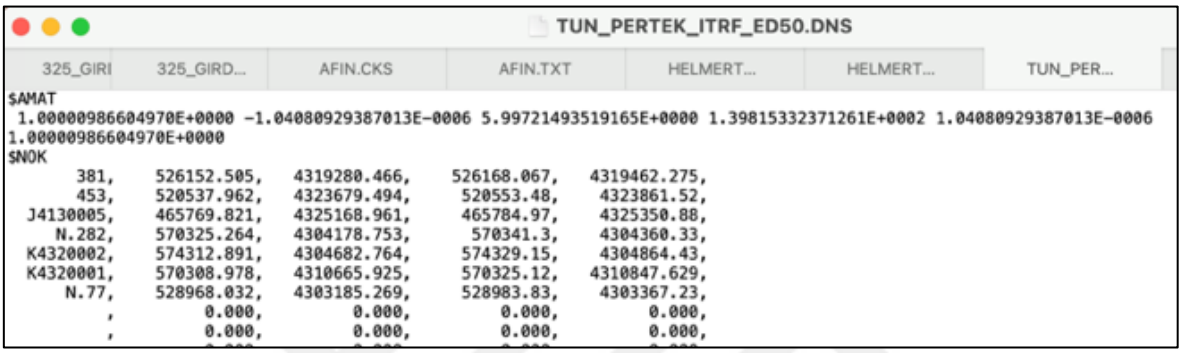
Şekil 14. Örnek TXT Verisi

Veri temin sürecinde karşılaşılan en büyük zorluk, farklı formatlarda sunulan verilerin standardizasyonunun sağlanması olmuştur. Bazı veriler Excel tabloları şeklinde sunulurken, diğerleri ASCII tabanlı metin dosyaları biçimindedir. Bu durum, verilerin okunması ve işlenmesi sürecinde özel algoritmaların geliştirilmesini gerektirmiştir.

Temin edilen veriler minimum 3 adet nokta içeren gruplar şeklindedir. Bu gruplar, ait oldukları şehir ismi ve plaka koduna göre sistematik olarak sınıflandırılmış ve her grubun coğrafi kapsamı ve nokta yoğunluğu analiz edilmiştir. Veri toplama sürecinde, özellikle sınır bölgelerinde ve dilim geçişlerinde yeterli sayıda kontrol noktasının bulunmasına özen gösterilmiştir.

2.2.2. Verilerin Okutulması

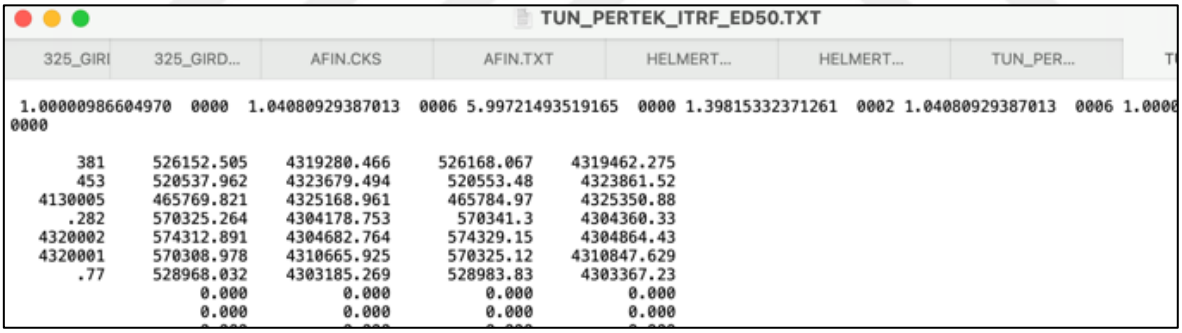
Metin formatındaki verilerin (Şekil 15, Şekil 16, Şekil 17) işlenmesi sürecinde, öncelikle kapsamlı veri temizleme işlemleri gerçekleştirilmiş ve rakamsal karakterler ile "." karakteri dışındaki tüm karakterler sistematik olarak silinmiştir. Bu temizleme işleminin ardından, dosyalar sırasıyla okutularak satır bazında 6-7 basamaklı ve 0-5 ondalık hassasiyetindeki sayısal değerler için gelişmiş arama algoritmaları uygulanmıştır.


TUN_PERTEK_ITRF_ED50.DNS

325_GIRI | 325_GIRD... | AFIN.CKS | AFIN.TXT | HELMERT... | HELMERT... | TUN_PER...

```
$AMAT
 1.00000986604970E+0000 -1.04080929387013E-0006 5.99721493519165E+0000 1.39815332371261E+0002 1.04080929387013E-0006
1.00000986604970E+0000
$NOK
       381,    526152.505,   4319280.466,    526168.067,   4319462.275,
       453,    520537.962,   4323679.494,    520553.48,    4323861.52,
  J4130005,    465769.821,   4325168.961,    465784.97,    4325350.88,
     N.282,    570325.264,   4304178.753,     570341.3,    4304360.33,
  K4320002,    574312.891,   4304682.764,    574329.15,    4304864.43,
  K4320001,    570308.978,   4310665.925,    570325.12,   4310847.629,
      N.77,    528968.032,   4303185.269,    528983.83,    4303367.23,
         ,         0.000,        0.000,         0.000,        0.000,
         ,         0.000,        0.000,         0.000,        0.000,
```

Şekil 15. Örnek DNS verisi

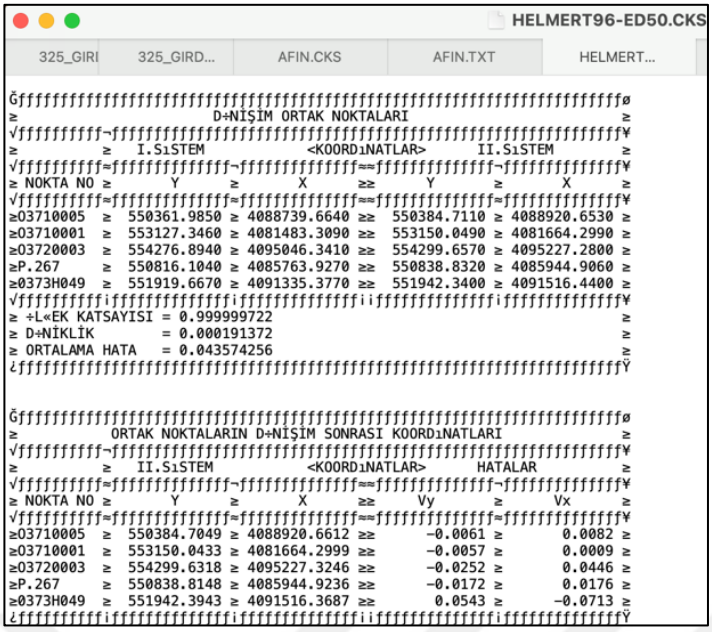

TUN_PERTEK_ITRF_ED50.TXT

325_GIRI | 325_GIRD... | AFIN.CKS | AFIN.TXT | HELMERT... | HELMERT... | TUN_PER...

```
 1.00000986604970  0000  1.04080929387013  0006 5.99721493519165  0000 1.39815332371261  0002 1.04080929387013  0006 1.0000
0000

       381     526152.505    4319280.466     526168.067    4319462.275
       453     520537.962    4323679.494      520553.48     4323861.52
   4130005     465769.821    4325168.961      465784.97     4325350.88
      .282     570325.264    4304178.753       570341.3     4304360.33
   4320002     574312.891    4304682.764      574329.15     4304864.43
   4320001     570308.978    4310665.925      570325.12    4310847.629
       .77     528968.032    4303185.269      528983.83     4303367.23
                    0.000          0.000          0.000          0.000
                    0.000          0.000          0.000          0.000
```

Şekil 16. Örnek TXT Verisi



Şekil 17. Örnek CKS verisi

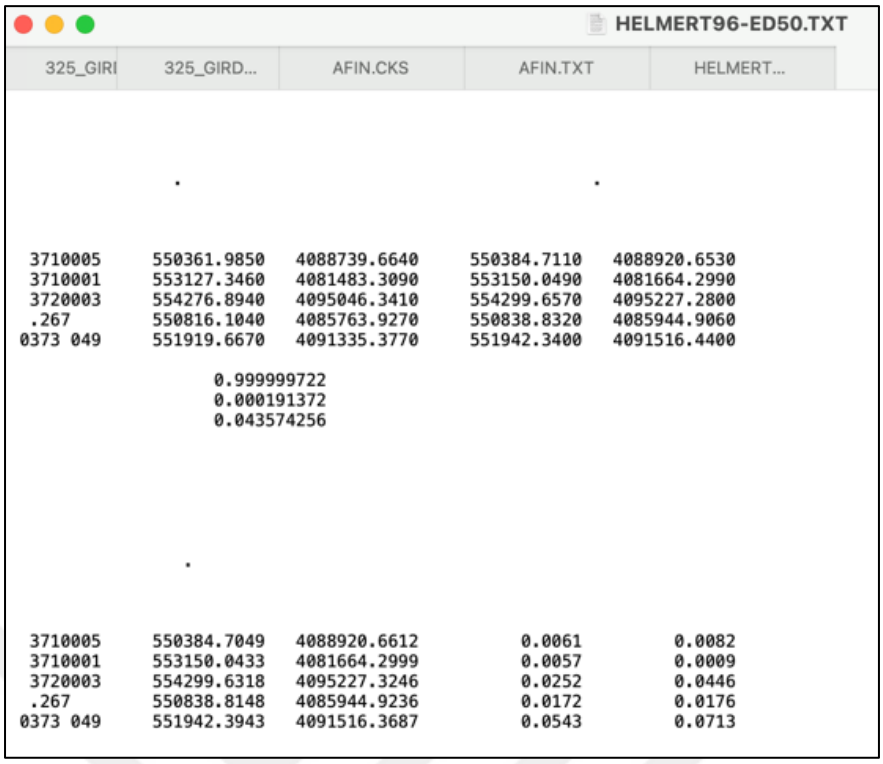
Bulunan paternler (Şekil 18), dosya ismi, dosya yolu, toplam sütun ve satır sayısı gibi meta veriler ile birlikte kaydedilerek veri bütünlüğü sağlanmıştır.

```
pat = digitsPattern(6,7) + (".") +  digitsPattern(0,5) ;
```

Şekil 18. Text veri tipi için patern oluşturan matlab kodu

ITRF96 ve ED50 UTM koordinatlarının sağa değerlerinin 6 basamaklı, yukarı değerlerinin ise 7 basamaklı olması bilgilerinden yararlanılarak otomatik veri tanıma algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, veri içerisinde 6 veya 7 basamaklı, nokta ile ondalık kısmı ayrılmış ve 0-4 arasında ondalık kısmı olan paternleri arayarak koordinat değerlerini double veri tipinde kaydetmektedir.

Excel dosyalarının okutulmasında, hücre bazlı analiz yapılabilmesi nedeniyle koordinat bilgilerinin içindeki karakterlere müdahale edilmeksizin doğrudan okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ancak, okuma işlemi sırasında paternlerde yer alan nokta (.) karakterinden dolayı tam sayılar okunurken oluşan hatalar, sayılara küçük bir değer (0.0000001) eklenerek aşılmıştır. Bu yöntemle veri kaybı veya yanlışlıklar önlenmiş ve tüm koordinat değerleri doğru şekilde MATLAB ortamına aktarılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Rakam ve "." dışında temizlenmiş veri örneği

2.2.3. Verilerin Düzenlenmesi

Veri düzenleme sürecinde, başlangıçta cell veri tipinde olan veriler, matematiksel işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için double veri tipine sistematik olarak dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm işleminin ardından, veri matrislerinden anlamsız veya boş olan satır ve sütunlar belirlenerek sistematik olarak silinmiştir. Tek satırda dörtten fazla veri bulunan durumlar tespit edilmiş ve bu durumlar sonraki işlem adımlarında detaylı olarak ele alınmıştır.

	1	2	3	4	5	6	7
1	*19x6 cell*	*19x7 cell*	'/Users/lv...	1411	'325_GIR...	19	6
2	*44x4 cell*	*45x7 cell*	'/Users/lv...	5568	'AFIN.CKS'	44	4
3	*7x4 cell*	*400x5 cell*	'/Users/lv...	29360	'TUN_PER...	7	4
4							
5							
6							

Şekil 20. Matlab programına aktarılmış veri matrisi

MATLAB ortamına aktarılan Excel ve txt formatındaki veriler, dosya yolu, dosya adı ve double veri tipinde koordinat verisi şeklinde birleştirilmiş ve organize edilmiştir (Şekil 20). Excel verilerinin standart olduğu durumlarda, 4'ten fazla sütunu olan verilerde sadece ilk 4 sütun alınacak şekilde kodlama yapılmıştır. Bu yaklaşım, verilerin tutarlılığını sağlamak ve işlem sürecini standardize etmek için kritik öneme sahiptir.

	1	2	3	4	5
1	[]	"526152....	"431928...	"526168....	"431946...
2	[]	"520537....	"432367...	"520553....	"432386...
3	[]	"465769....	"432516...	"465784....	"432535...
4	[]	"570325....	"430417...	"570341.3"	"430436...
5	[]	"574312....	"430468...	"574329....	"430486...
6	[]	"570308....	"431066...	"570325....	"431084...
7	[]	"528968....	"430318...	"528983....	"430336...
8	[]	[]	[]	[]	[]

Şekil 21. 7x4'lük matrisin boş değerleri silinmeden önceki hali

text_temiz{3, 4}

	1	2	3	4
1	5.2615e...	4.3193e...	5.2617e...	4.3195e...
2	5.2054e...	4.3237e...	5.2055e...	4.3239e...
3	4.6577e...	4.3252e...	4.6578e...	4.3254e...
4	5.7033e...	4.3042e...	5.7034e...	4.3044e...
5	5.7431e...	4.3047e...	5.7433e...	4.3049e...
6	5.7031e...	4.3107e...	5.7033e...	4.3108e...
7	5.2897e...	4.3032e...	5.2898e...	4.3034e...
8				
9				

Şekil 22. Double veri tipinde 7x4'lük matris

Dört sütundan fazla sütuna sahip verilerde (Şekil 21) sıkça karşılaşılan problemler kategorize edilmiş ve sistematik çözümler geliştirilmiştir. Bu problemler arasında: gerçekte dört sütun olmasına rağmen yanlış okuma nedeniyle beş sütun olarak algılanan veriler, koordinatların hesap yoluyla beşinci ve altıncı sütunlarda hesaplandığı altı sütunlu veriler, dilim geçişlerinde her iki dilim koordinatlarının da verildiği sekiz sütunlu veriler ve hesaplamaların tablo formatında sunulduğu dosyalardaki nokta tekrarları yer almaktadır.

Şekil 22, Şekil 21 ile gösterilen matrisin başarılı şekilde düzenlenerek kullanıma hazır hale getirilmesi işleminin sonucunu göstermektedir.

6	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
7	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
8	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]	[]
9	[]	"448007....	"425973...	"448048....	"425992...	"448048....	"425992...	[]	[]
10	[]	"442231....	"425669...	"442272....	"425688...	"442272....	"425688...	[]	[]
11	[]	"446236....	"424217...	"446277....	"424236...	"446277....	"424236...	[]	[]
12	[]	"465337....	"424281...	"465379....	"424300...	"465379....	"424300...	[]	[]
13	[]	"456525....	"426577...	"456567....	"426596...	"456567....	"426596...	[]	[]
14	[]	"467012....	"426080...	"467053....	"426098...	"467053....	"426098...	[]	[]
15	[]	"438436....	"424242...	"438477....	"424260...	"438477....	"424260...	[]	[]
16	[]	"433766....	"424020...	"433807....	"424039...	"433807....	"424039...	[]	[]
17	[]	"433407....	"423741...	"433448....	"423759...	"433448....	"423759...	[]	[]
18	[]	"440372....	"423400...	"440413....	"423419...	"440413....	"423419...	[]	[]
19	[]	"455087....	"423291...	"455128....	"423310...	"455128....	"423310...	[]	[]
20	[]	"452213....	"423501...	"452254....	"423520...	"452254....	"423520...	[]	[]
21	[]	"460217....	"424512...	"460258....	"424530...	"460258....	"424530...	[]	[]
22	[]	"442809....	"423895...	"442850....	"423914...	"442850....	"423914...	[]	[]
23	[]	"447156....	"424498...	"447197....	"424517...	"447197....	"424517...	[]	[]
24	[]	"448167....	"423677...	"448208....	"423696...	"448208....	"423696...	[]	[]
25									
26									

Şekil 23. 6 veya 7 basamaklı olmayan değerler silindiğinde matrisin durumu

Şekil 23 ile 3. ve 4. Sütunları ile 5. ve 6. Sütunları aynı olan örnek bir veri sunulmaktadır. Bu ve benzeri problemlerin çözümü için, standart olarak belirlenebilen problemler toplu kod ile test edilip düzeltilmiştir. Standart olmayan problemler ise manuel müdahaleler ile düzeltilmiştir. Bazı dosyalarda tablo benzeri bir görünümde hesaplamalar ve alt kısımda parametreler bulunduğundan nokta tekrarı oluşmuş, bu durumlar özel algoritmalarla tespit edilerek düzeltilmiştir.

660 BÖLGE NO
ITRF96-ED50

İKİ BOYUTTA DENGELEMELİ HELMERT BENZERLİK DÖNÜŞÜMÜ İLE UYUŞUM TESTİ

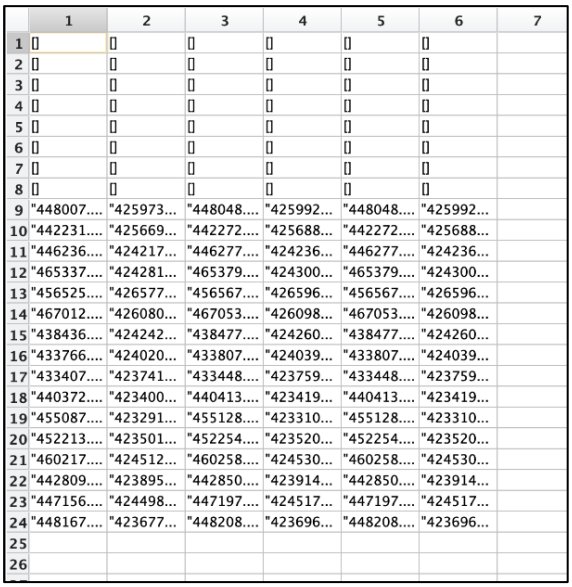
Dönüşüm Parametreleri, Ölçek ve Dönüklük — **Hata Hesabı**

cx :	129,95878	cy :	1,71960		
a :	1,000014328609	b :	-0,000007776496	Birim Ölçünün K.O.Hatası (m0) :	0.054 m.
Dönüklük :	0.000495 grad	Ölçek :	14.329 ppm (1:69790)	Birim Ölçünün Ort. Konum Hatası (mp) :	0.076 m.

X' = cx + a * X + b * Y Y' = cy + a * Y - b * X

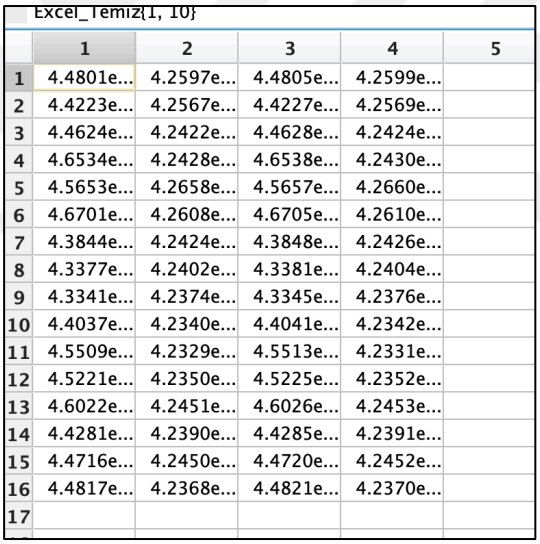
Nokta No	Sistem-A		Sistem - B		Dönüşüm Sonrası Koordinatlar		Koordinat Düzeltmeleri		Test Büyüklüğü	Kriter Değer α = 0.05 için	
	Y	X	Y	X	Y'	X'	Vy(m)	Vx(m)	Ti	C	
N226	448007,219	4259734,295	448048,507	4259921,802	448048,484	4259921,806	-0,02	0,00	0,33	2,24	Uyuşumlu
N3227	442231,089	4256696,457	442272,179	4256883,994	442272,247	4256883,969	0,07	-0,02	1,01	2,24	Uyuşumlu
0L16G001	446236,726	4242179,744	446277,797	4242367,030	446277,829	4242367,017	0,03	-0,01	0,46	2,24	Uyuşumlu
L1710001	465337,985	4242819,012	465379,440	4243006,220	465379,367	4243006,146	-0,07	-0,07	1,48	2,24	Uyuşumlu
N.3153	456525,791	4265773,535	456567,253	4265960,977	456567,225	4265961,066	-0,03	0,09	1,39	2,24	Uyuşumlu
N.104	467012,048	4260801,552	467053,551	4260988,936	467053,593	4260988,930	0,04	-0,01	0,64	2,24	Uyuşumlu
L1620001	438436,641	4242420,662	438477,560	4242607,980	438477,634	4242607,999	0,07	0,02	1,05	2,24	Uyuşumlu
000N15200	433766,462	4240206,458	433807,387	4240393,794	433807,371	4240393,800	-0,02	0,01	0,24	2,24	Uyuşumlu
000N15700	433407,676	4237412,564	433448,593	4237599,896	433448,558	4237599,869	-0,04	-0,03	0,63	2,24	Uyuşumlu
000N30100	440372,236	4234008,135	440413,268	4234195,268	440413,191	4234195,337	-0,08	0,07	1,43	2,24	Uyuşumlu
N.327	455087,197	4232919,342	455128,360	4233106,380	455128,355	4233106,414	-0,01	0,03	0,47	2,24	Uyuşumlu
N.326	452213,753	4235013,921	452254,860	4235200,950	452254,886	4235201,045	0,03	0,09	1,35	2,24	Uyuşumlu
N.178	460217,496	4245122,410	460258,834	4245309,564	460258,822	4245309,617	-0,01	0,05	0,75	2,24	Uyuşumlu
ALACATI	442809,355	4238957,268	442850,355	4239144,629	442850,384	4239144,522	0,03	-0,11	1,52	2,24	Uyuşumlu
PASALIM	447156,080	4244985,903	447197,243	4245173,285	447197,218	4245173,209	-0,03	-0,08	1,08	2,24	Uyuşumlu
YARAN	448167,793	4236777,287	448208,857	4236964,508	448208,882	4236964,468	0,02	-0,04	0,64	2,24	Uyuşumlu

Şekil 24. Örnek excel verisi



	1	2	3	4	5	6	7
1	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
2	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
3	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
4	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
5	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
6	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
7	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
8	[]	[]	[]	[]	[]	[]	
9	"448007....	"425973...	"448048....	"425992...	"448048....	"425992...	
10	"442231....	"425669...	"442272....	"425688...	"442272....	"425688...	
11	"446236....	"424217...	"446277....	"424236...	"446277....	"424236...	
12	"465337....	"424281...	"465379....	"424300...	"465379....	"424300...	
13	"456525....	"426577...	"456567....	"426596...	"456567....	"426596...	
14	"467012....	"426080...	"467053....	"426098...	"467053....	"426098...	
15	"438436....	"424242...	"438477....	"424260...	"438477....	"424260...	
16	"433766....	"424020...	"433807....	"424039...	"433807....	"424039...	
17	"433407....	"423741...	"433448....	"423759...	"433448....	"423759...	
18	"440372....	"423400...	"440413....	"423419...	"440413....	"423419...	
19	"455087....	"423291...	"455128....	"423310...	"455128....	"423310...	
20	"452213....	"423501...	"452254....	"423520...	"452254....	"423520...	
21	"460217....	"424512...	"460258....	"424530...	"460258....	"424530...	
22	"442809....	"423895...	"442850....	"423914...	"442850....	"423914...	
23	"447156....	"424498...	"447197....	"424517...	"447197....	"424517...	
24	"448167....	"423677...	"448208....	"423696...	"448208....	"423696...	
25							
26							

Şekil 25. Excel verisinin patern ile eşleştirilmesi



Excel_Temiz{1, 10}

	1	2	3	4	5
1	4.4801e...	4.2597e...	4.4805e...	4.2599e...	
2	4.4223e...	4.2567e...	4.4227e...	4.2569e...	
3	4.4624e...	4.2422e...	4.4628e...	4.2424e...	
4	4.6534e...	4.2428e...	4.6538e...	4.2430e...	
5	4.5653e...	4.2658e...	4.5657e...	4.2660e...	
6	4.6701e...	4.2608e...	4.6705e...	4.2610e...	
7	4.3844e...	4.2424e...	4.3848e...	4.2426e...	
8	4.3377e...	4.2402e...	4.3381e...	4.2404e...	
9	4.3341e...	4.2374e...	4.3345e...	4.2376e...	
10	4.4037e...	4.2340e...	4.4041e...	4.2342e...	
11	4.5509e...	4.2329e...	4.5513e...	4.2331e...	
12	4.5221e...	4.2350e...	4.5225e...	4.2352e...	
13	4.6022e...	4.2451e...	4.6026e...	4.2453e...	
14	4.4281e...	4.2390e...	4.4285e...	4.2391e...	
15	4.4716e...	4.2450e...	4.4720e...	4.2452e...	
16	4.4817e...	4.2368e...	4.4821e...	4.2370e...	
17					

Şekil 26. Boş olan satırlar ile 5. ve 6. sütunun silinmesi

Excel veri tipindeki dosyalar (Şekil 24) hücre bazlı okunarak Şekil 18 ile belirtilen patern ile karşılaştırılmıştır. Patern ile örtüşme yakalanmaz ise hücre boş olarak örtüşme yakalanırsa eşleşmeler string veri olarak kaydedilmiştir (Şekil 25). Excel verilerinde standart olarak 5. ve 6. sütunların düzeltme değerlerinin hesaplanması için gerekli olan hesaplamaların bir adımı olması ve datum dönüşüm işlemlerinde ihtiyaç olmaması nedeniyle silinerek işlemlerden çıkarılmıştır ve excel verilerin okunması işleminde boş olarak belirlenene satır ve sütunlar otomatik olarak silinerek string veri tipleri double olarak

kaydedilmiştir (Şekil 26). Böylece excel veri tipindeki veriler eksiksiz olarak MATLAB ortamına aktarılmıştır.

Veriler okunduktan sonra dilim orta meridyenlerinin belirlenebilmesi için verinin okunduğu dosya yolu kullanılarak il plaka kodu verilmiştir. Daha sonra Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sitesinde bulunan il-dilim orta meridyeni bilgileri ve plaka kodları kullanılarak, her veriye bir dilim orta meridyeni atanmıştır. Bu işlem, verilerin coğrafi konumlarıyla uyumlu hale getirilmesini sağlamış ve sonraki analiz aşamalarının temelini oluşturmuştur.

2.2.4. Verilerin Unique Hale Getirilmesi

Veri setindeki tekrarlayan kayıtların belirlenmesi ve eliminasyonu amacıyla unique komutu sistematik olarak uygulanmıştır. Bu işlem sırasında, 1 mm'nin altındaki çok küçük farklar nedeniyle aynı nokta olmasına rağmen farklı olarak algılanan koordinat değerleri tespit edilmiştir. Bu durumun koordinat okuma işlemi için eklenen "0.0000001" değerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Burada kullanılan en kritik yöntem ITRF96 ve ED50 datumlarına ait koordinat farkı değerlerinin değerlendirilmesi olmuştur. Özellikle ikiz olarak adlandırılabilecek noktalarda bu fark değerlerinin gruptaki diğer noktalar ile uyuşmadığı görülmüştür.

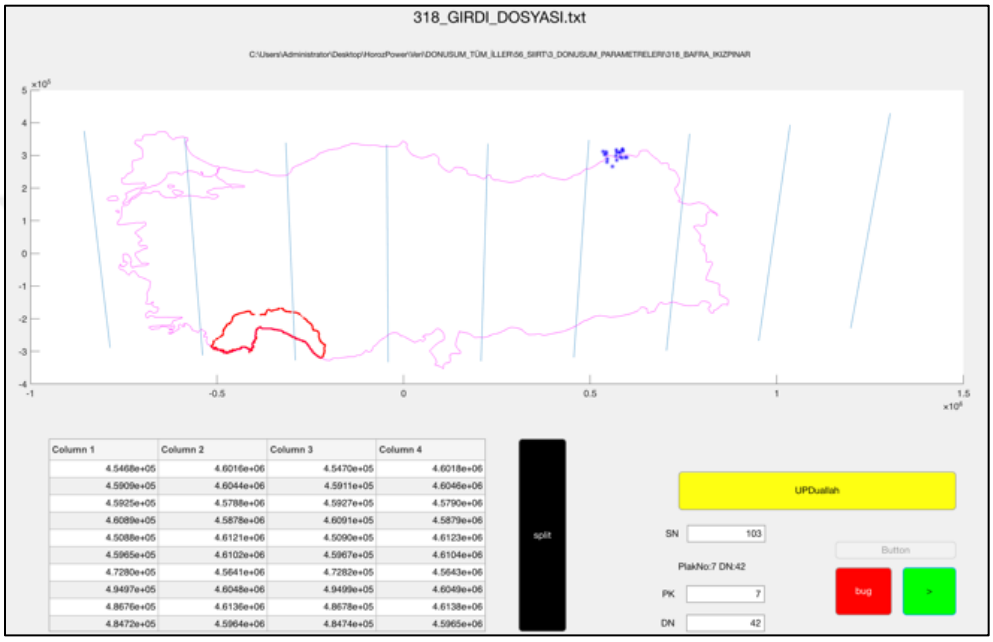
Unique hale getirme sürecinde, aynı koordinatlara sahip ancak farklı dosyalardan gelen noktalar da tespit edilmiştir. Bu durum, aynı kontrol noktasının farklı veri grupları içerisinde yer nedeniyle ortaya çıkmıştır. Bu tür tekrarların elimine edilmesi, veri setinin kalitesini artırmış ve hesaplama süreçlerinde oluşabilecek ağırlıklandırma problemlerini önlemiştir.

2.2.5. Dilim Numarası Kontrolü

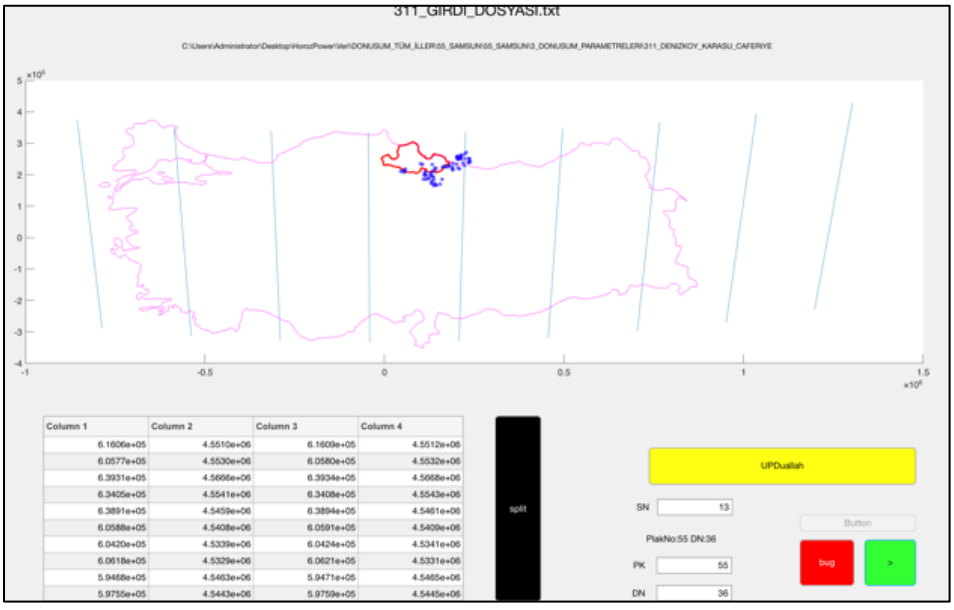
UTM projeksiyonundaki koordinatların Lambert projeksiyonuna dönüştürülmesi sürecinde dilim numarası kritik bir öneme sahiptir. İl plaka kodları kullanılarak oluşturulan dilim numaralarının, özellikle iki dilim arasında kalan illerde hatalara sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu problemin çözümü için sağa koordinatı 500.000'den büyük olan noktalar için küçük dilim numarasının, 500.000'den küçük olanlar için ise büyük dilim numarasının kullanılacağı kapsamlı bir algoritma geliştirilmiştir. Bu işlem yalnızca aynı il plaka koduna

sahip olup 300.000 ile 700.000 gibi uç değerlerin aynı anda bulunduğu nokta grupları için uygulanmıştır.

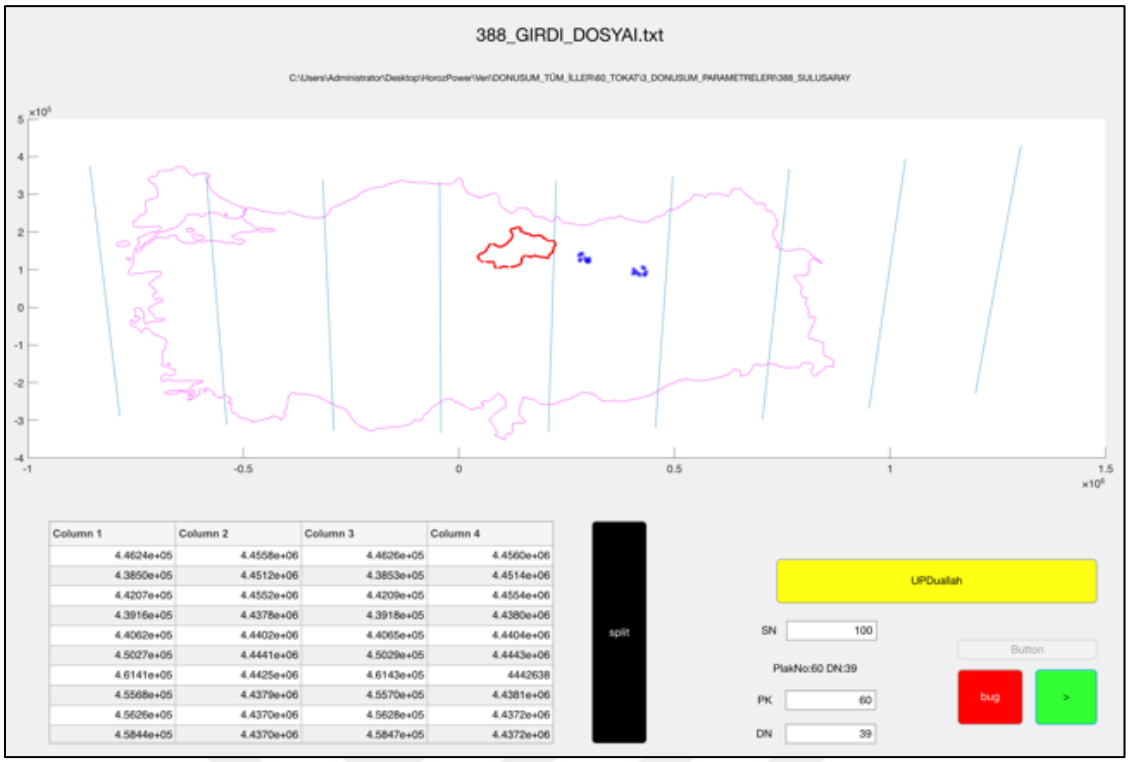
Dilim numarası belirleme sürecinde, Türkiye'de kullanılan ITRF96 ve ED50 datumlarının UTM projeksiyonlarında bir noktanın iki datumdaki koordinatları arasındaki farkın 178 ve 192 metre arasında olduğu bilgisinden yararlanılmıştır. Bu fark, doğudan batıya ve güneyden kuzeye gittikçe artış göstermektedir. Bu teorik bilgi, dilim numaralarının doğruluğunun kontrolünde önemli bir referans noktası olarak kullanılmıştır.



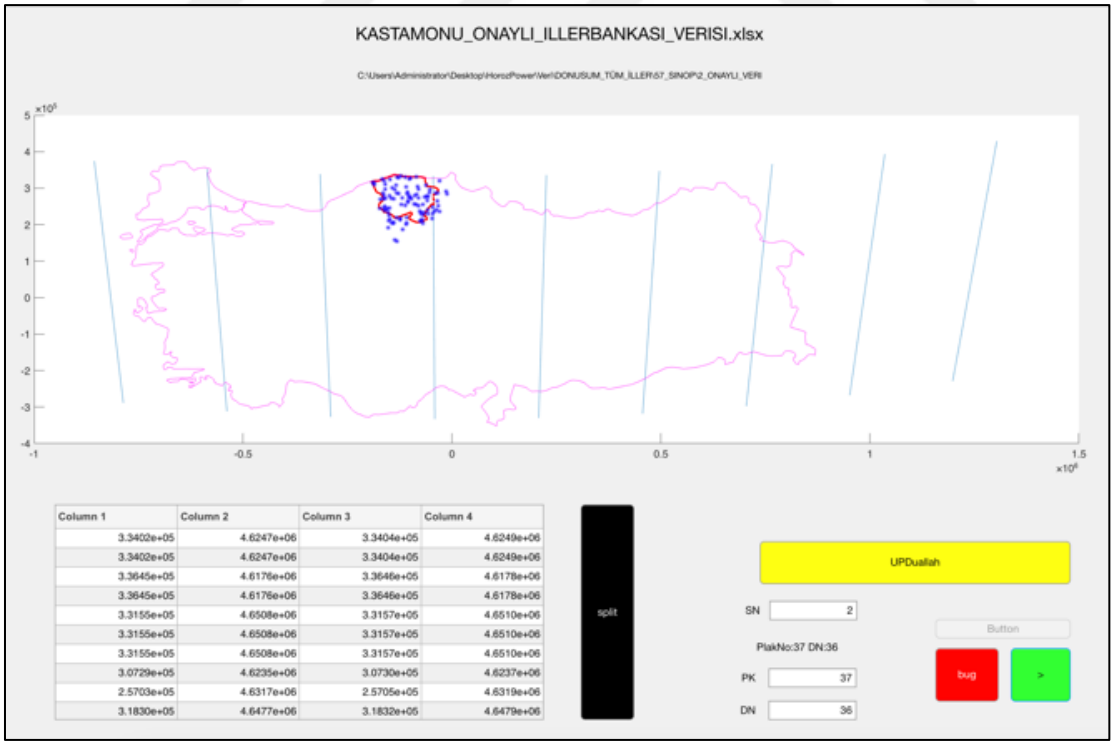
Şekil 27. GUI, Hatalı kayıt Antalya - DN:42, Doğru kayıt Samsun - DN:36



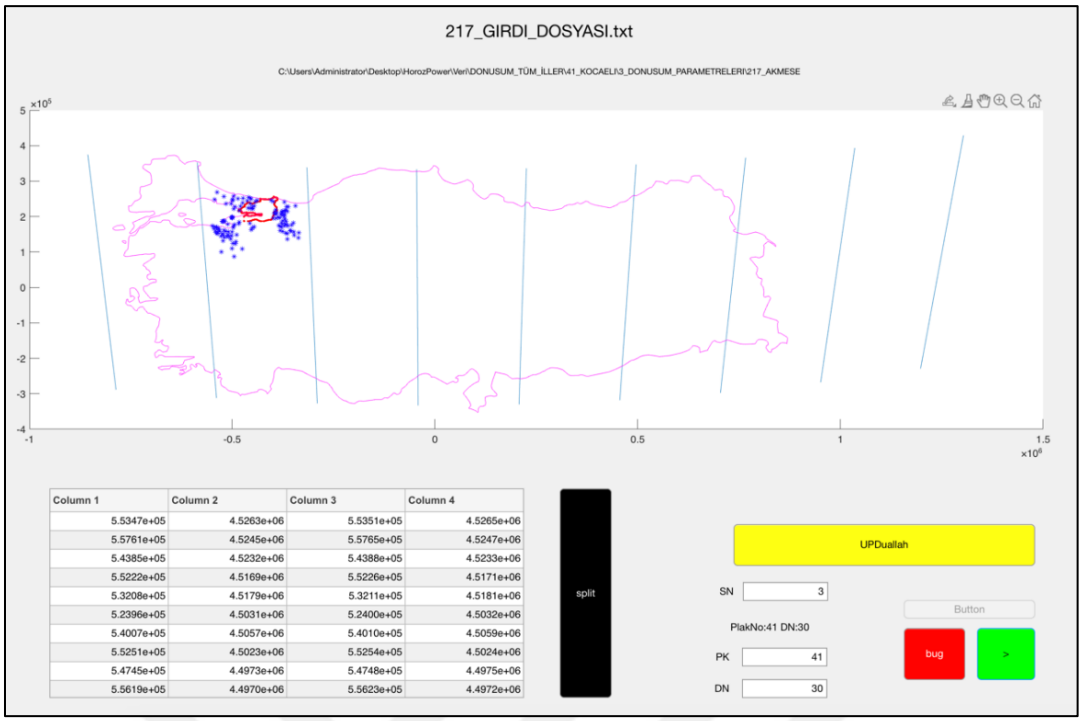
Şekil 28. GUI, Hatalı kayıt Samsun - DN:36, Doğru kayıt Sakarya - DN:30



Şekil 29. GUI, Hatalı kayıt Tokat DN:39, Doğru kayıt Tokat DN:36



Şekil 30 GUI, Hatalı kayıt Kastamonu DN:36, Doğru kayıt Sinop DN:36



Şekil 31. GUI, kayıt İstanbul DN:30

Dilim numarası doğruluğunun kontrolü amacıyla, Lambert projeksiyonuna dönüştürülen koordinatların il sınırları içerisinde kalıp kalmadığı sistematik olarak kontrol edilmiştir. Şekil 31, İstanbul için temin edilen ve ortak noktaların civar illerde bulunduğu bir örnektir.

Kontrol işlemleri için geliştirilen grafik kullanıcı arayüzü ile il sınırları, noktaların Lambert koordinatları ve dilim orta meridyenleri görselleştirilerek hatalar interaktif olarak giderilmiştir. Kontrol sürecinde tespit edilen başlıca hatalar detaylı olarak analiz edilmiş ve düzeltilmiştir: Sistematik olmayan hatalar(Şekil 27), dilim orta meridyeni hatalı girilmiş nokta grupları(Şekil 29), 64-Uşak verilerinin içerisinde 63-Şanlıurfa verilerinin bulunması, 62-Tunceli verilerinin içerisinde 61-Trabzon verilerinin yer alması, 55-Samsun verilerinin içerisinde 54-Sakarya verilerinin bulunması(Şekil 28) ve Kastamonu ile Sinop verilerine ait noktaların neredeyse aynı konumlarda olması durumları tespit edilmiş ve düzeltilmiştir(Şekil 30).

Bu hatalar, verilerin doğru klasörlerde bulunmaması ve buna bağlı olarak dilim numaralarının yanlış atanmasından kaynaklanmıştır. Hataların düzeltilmesi için, noktaların gerçek coğrafi konumları ile dosya konumları karşılaştırılmış ve gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Bu süreçte, dikkatli bir veri analizi ve kontrol mekanizması uygulanarak verilerin coğrafi sınırları içinde doğru konumlandırılması sağlanmıştır.

2.2.6. Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi

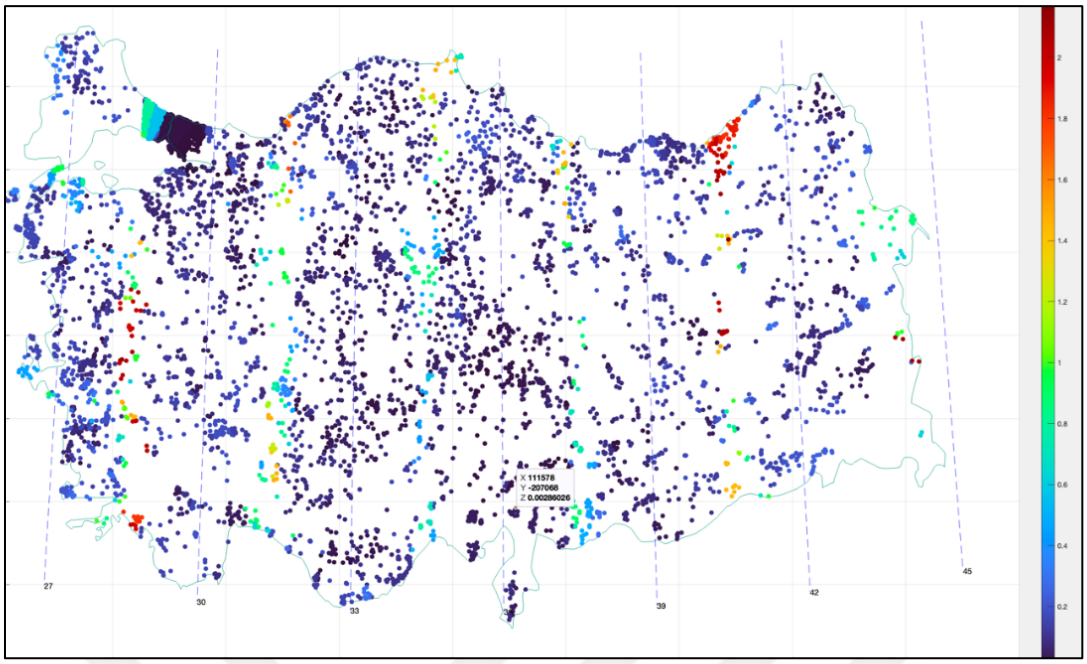
Veri setindeki uyuşumsuz ölçülerin tespit edilmesi ve eliminasyonu amacıyla çok aşamalı ve kapsamlı bir test süreci uygulanmıştır. X koordinat değerleri filtrelenerek 1.000.000'den küçük olan değerler veri setinden çıkarılmıştır. Bu yöntem ile altı basamaklı koordinat değerleri tespit edilmiş ve yedi basamaklı olması gereken yanlış yazılmış koordinatlar belirlenmiştir.

Ek bir filtreleme yöntemi olarak coğrafi koordinat kontrolü uygulanmış ve dilim orta meridyeninden 1.5 dereceden fazla uzakta bulunan noktalar güvenilirlik açısından veri setinden çıkarılmıştır. Bu yaklaşım ile veri setinin genel kalitesi ve güvenilirliği önemli ölçüde artırılmıştır.

Tüm noktalar için en yakın dört nokta ve noktanın kendisi kullanılarak dengeleme yapılmış, uyuşumsuz ölçüler belirlenmiş ve sonuçlar karesel ortalama hatalar ile hesap koordinatı ve gerçek koordinat arasındaki farklar matrise kaydedilmiştir. Bu veriler kullanılarak uyuşumsuz ölçüler belirlenerek ortak nokta kümesinden çıkarılmıştır.

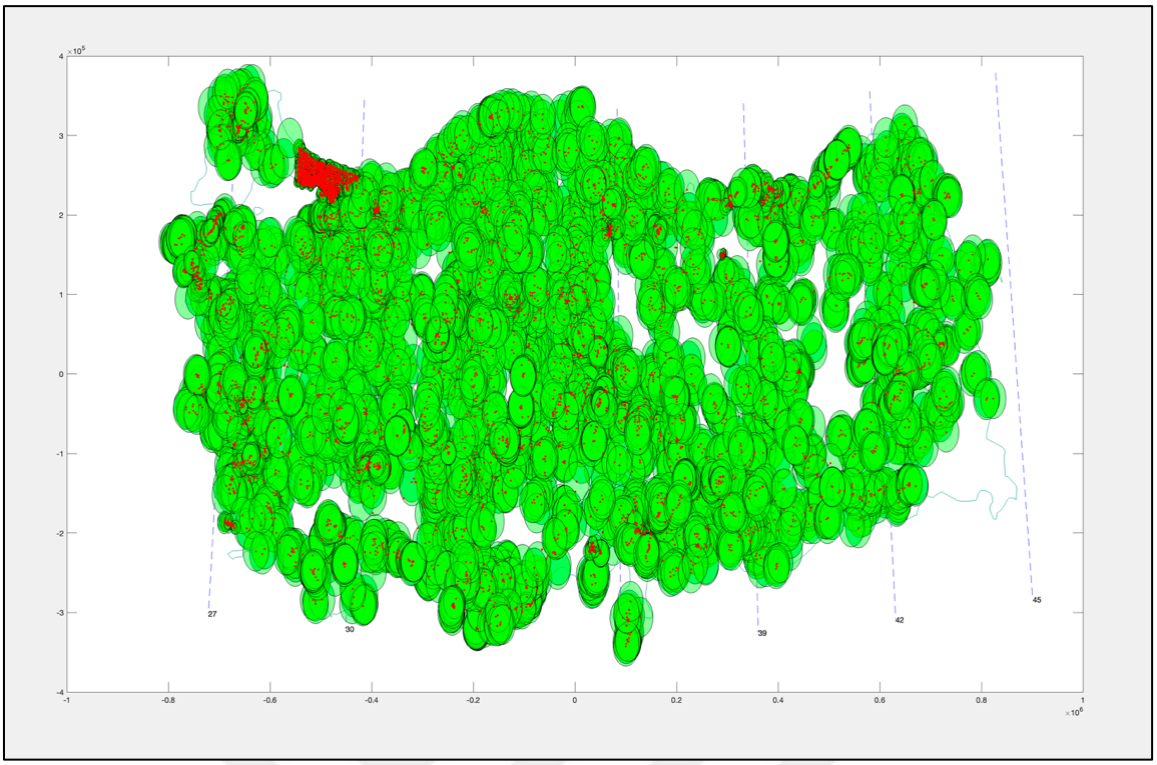
2.2.7. Gruplayarak Kontrol

Hatalı dilim numarasına sahip nokta grupları düzeltildikten sonra, tüm noktaları kullanarak dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiştir ve bu işlemlerin sonuçlarına ait karesel ortalama hata değerleri göz önünde bulundurularak tekrar hatalı nokta ve grupların varlığı kontrol edilmiştir. Belirlenen ortak noktaların tümünü kullanarak dönüşüm hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen m_0 değerlerine göre renklendirilen harita Şekil 32 ile gösterilmektedir.

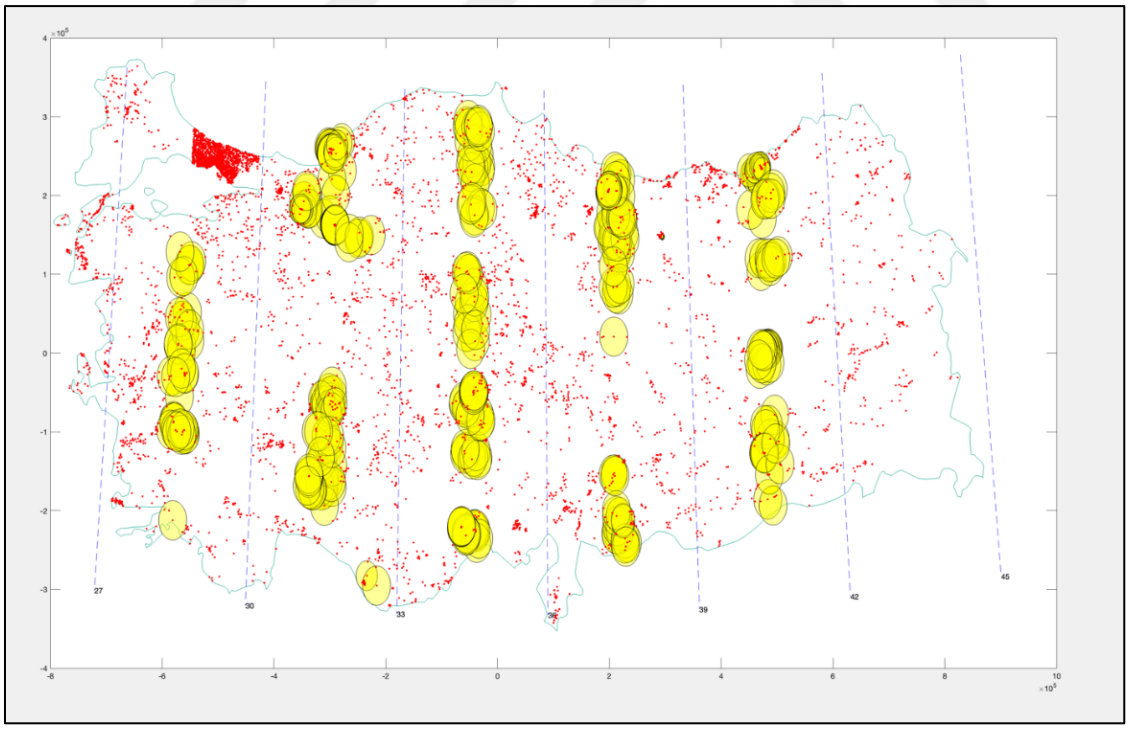


Şekil 32. Her noktadaki dönüşüm işlemi sonucuna göre elde edilen m_0 değerlerine göre renklendirilmiş harita

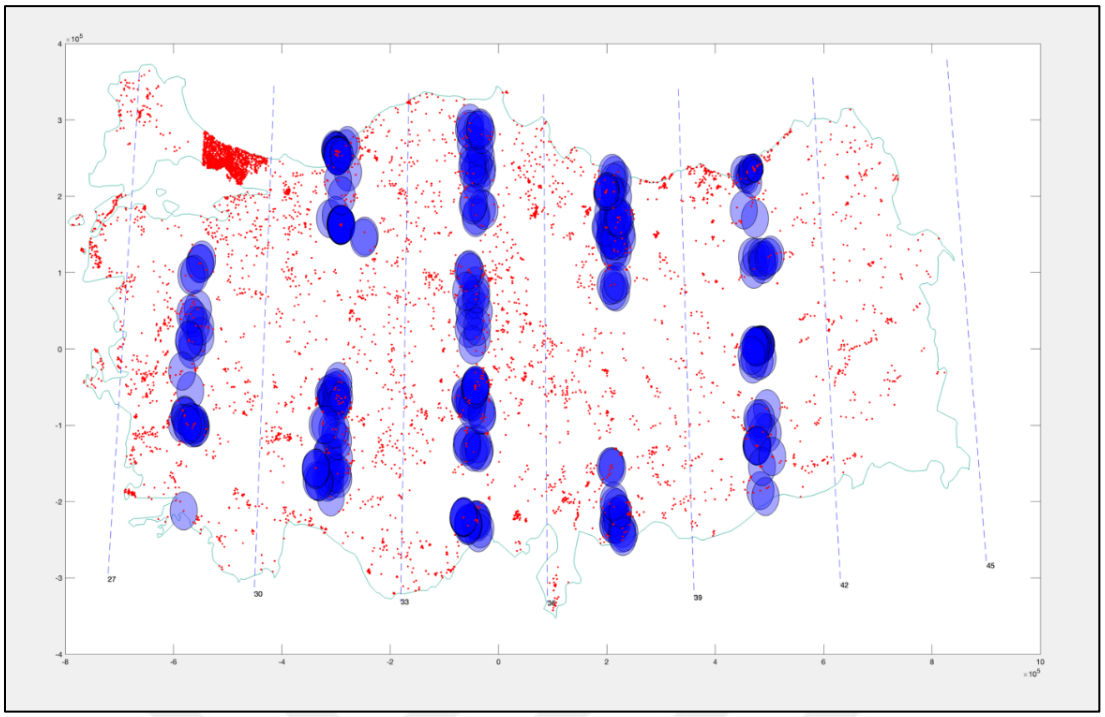
Dilim geçişlerinde istenen başarının yakalanamadığı da Şekil 32 ile görülmektedir. Bu nedenle her noktanın tek tek kontrolünü sağlamak için, noktaların merkezini baz alan 25 km çaplı daireler oluşturulmuştur. Bu daireler içerisinde 26 noktadan fazla nokta olması durumda daire çapı 2 km küçültülerek işlem 26 noktadan az nokta veya daire çapı 2.1 km'den küçük oluncaya kadar tekrarlanarak noktalar gruplanmıştır. Gruplanan noktalar ile dönüşüm parametrelerinin hesaplanması işlemleri benzerlik dönüşümü ve en küçük kareler dengelemesi usulünce gerçekleştirilerek hataların varlığı ortaya konmuştur. Bu hatalar RMSE değerlerine göre renklendirilerek RMSE değeri 1 m'den küçük olan gruplar Şekil 33, RMSE değeri 1 m'den büyük olan gruplar Şekil 34 RMSE değeri 2 m'den büyük olan gruplar Şekil 35, RMSE değeri 4 m'den büyük olan gruplar Şekil 36 , RMSE değeri 5 m'den büyük olan gruplar Şekil 37 ile gösterilmiştir. Ayrıca tüm noktalardaki m_0 değerlerini gösteren histogram



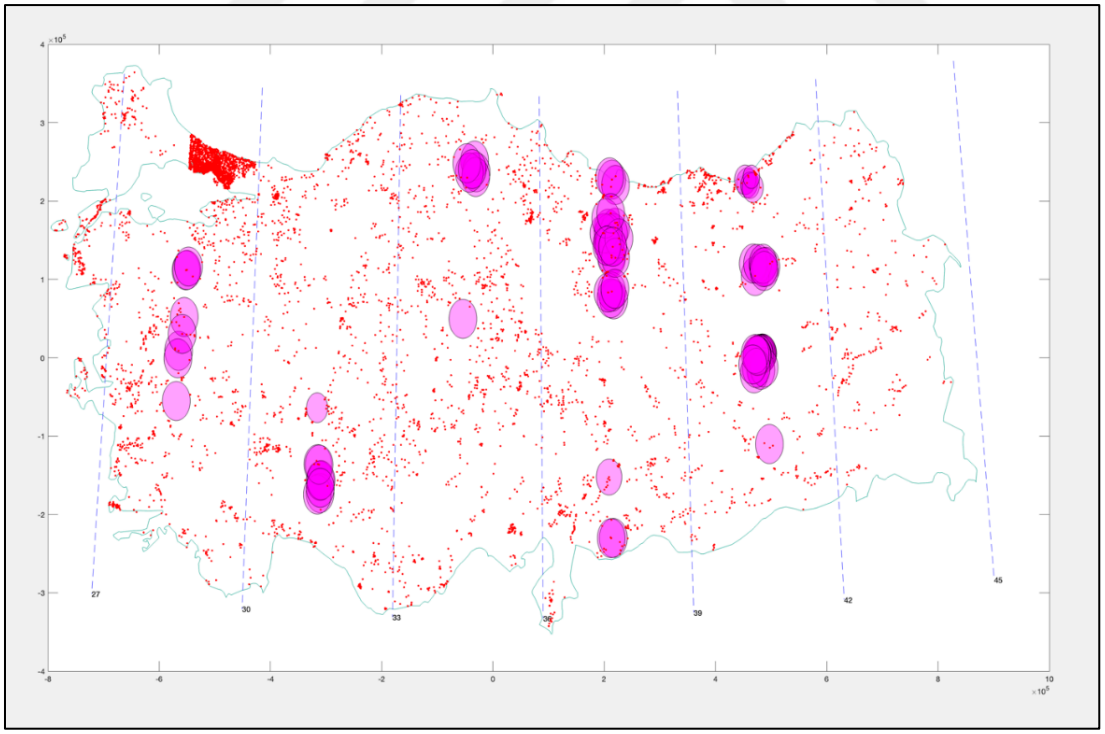
Şekil 33. Oluşturulan daireler (Yeşil RMSE<1 m)



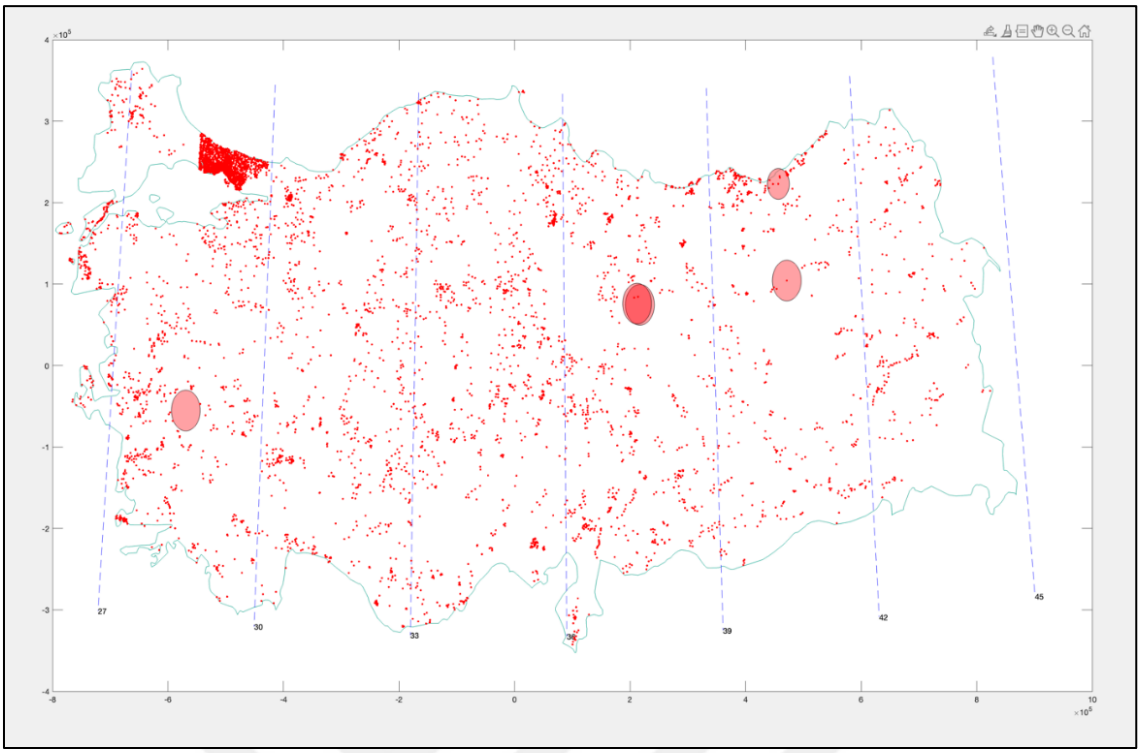
Şekil 34. Oluşturulan daireler (Sarı RMSE>1 m)



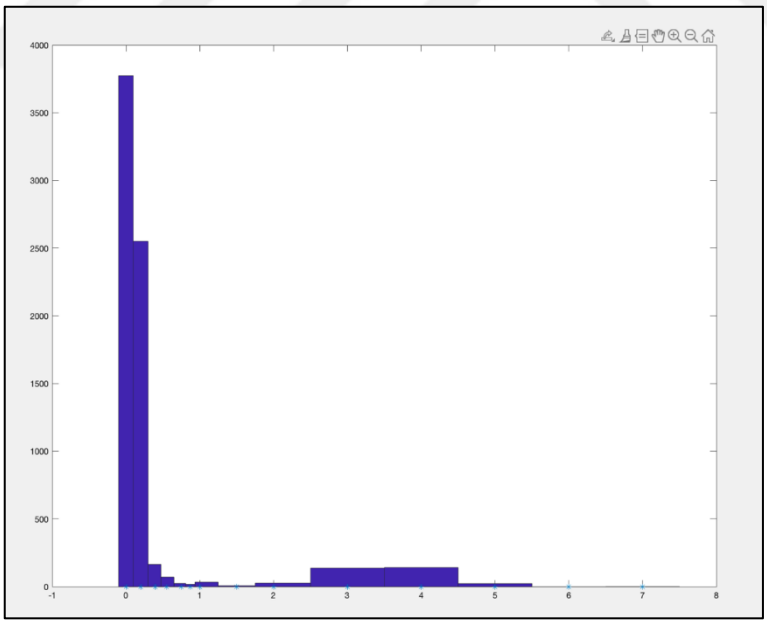
Şekil 35. Oluşturulan daireler (Mavi RMSE >2 m)



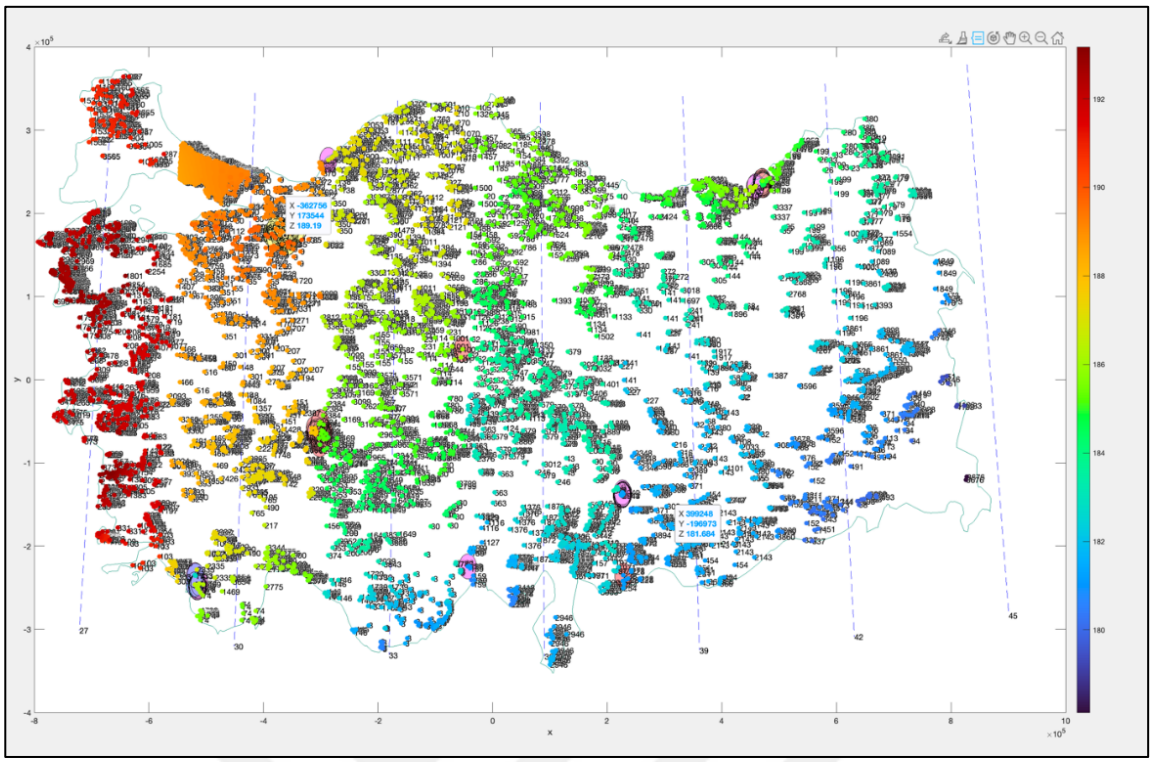
Şekil 36. Oluşturulan daireler (Pembe RMSE >4 m)



Şekil 37. Oluşturulan daireler (Kırmızı RMSE >5 m)



Şekil 38. RMSE değerlerinin histogramı



Şekil 39. Gruplar ve ITRF96-ED50 farkları beraber yapılan inceleme

Gruplar ve ITRF96-ED50 farkları beraber yapılan kontroller ile birlikte bu hatalara neden olan hataların bazılarının hatalı dilim numaralarının olduğu, bazılarının ITRF96 ve ED50 farkları incelendiğinde etrafında yer alan noktalar ile uyumsuz olması, dilim numarasının değiştirildiği durumlarda da hatanın giderilememesi ve yapılan kontrollerde herhangi bir yazım yanlışı olmadığının da belirlenmesi nedeniyle işlemleri olumsuz etkilememeleri adına ortak nokta kümesinden çıkarılmışlardır(Şekil 39).

2.2.8. LKK Koordinatlara Geçiş

LKK projeksiyonuna geçiş sürecinde, ED50 datumundaki UTM koordinatlarının ITRF96 datumundaki koordinatlardan daha büyük değerlere sahip olması teorik bilgisinden sistematik olarak yararlanılmıştır. Bu bilgi doğrultusunda koordinat değerleri birbirinden çıkarılarak Y koordinat işaretine göre sistematik bir kontrol tekrar yapılmış ve önce ITRF96, ardından ED50 koordinatları olacak şekilde standardize edilmiş veri düzeni oluşturulduğu teyit edilmiştir.

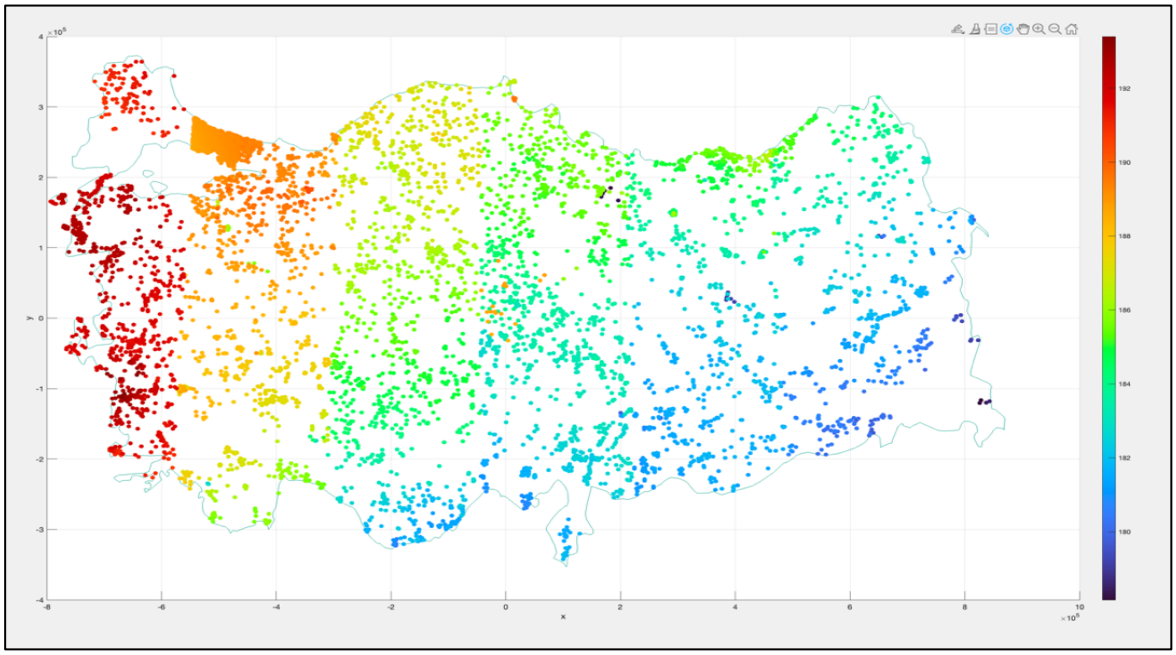
Tablo 5. LKK parametreleri

Parametre Adı	Değer	Açıklama
B_1	38.00°	1. Standart paralel
B_2	40.00°	2. Standart paralel
$\mathbf{B_0}$	39.00°	Orijin enlemi (merkez paralel)
$\boldsymbol{L_0}$	35.00°	Orijin boylamı (meridyen)
$\boldsymbol{E_{(False)}}$	0	Y ekseninde kaydırma (False Easting)
$\boldsymbol{N_{(False)}}$	0	X ekseninde kaydırma (False Northing)

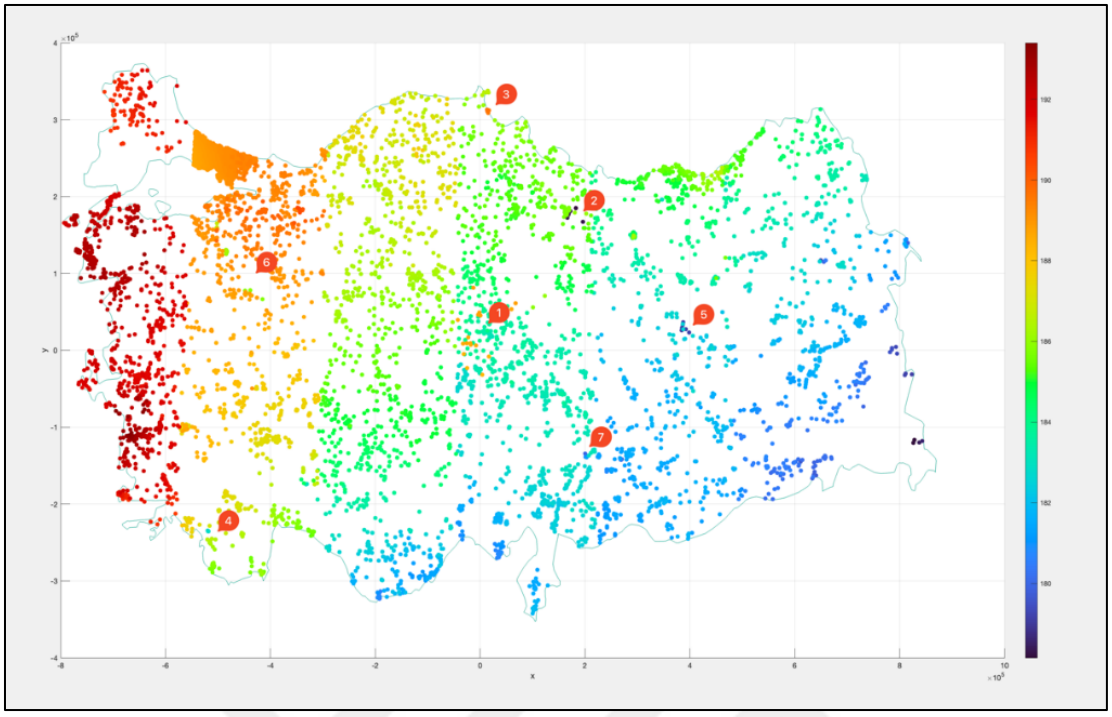
LKK projeksiyonuna dönüşüm işlemleri, 1.6.2 numaralı bölümde aktarılan algoritmanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dönüşüm sürecinde, Türkiye için en uygun Lambert parametreleri belirlenmiş ve Tablo 5' te sunulan bu parametreler kullanılarak koordinat sistemleri arasında tutarlı dönüşümler sağlanmıştır.

LKK projeksiyonuna geçiş sürecinde, özellikle doğu-batı yönünde uzanan projelerin ihtiyaçları göz önüne alınmıştır. Bu projeksiyon, UTM projeksiyonuna kıyasla geniş alanları kapsayan projeler için daha uygun olduğu, dilim geçişi işlemine ihtiyaç duymaması ve distorsiyon oranlarının daha düşük olması nedenleriyle çalışmada kullanılmıştır.

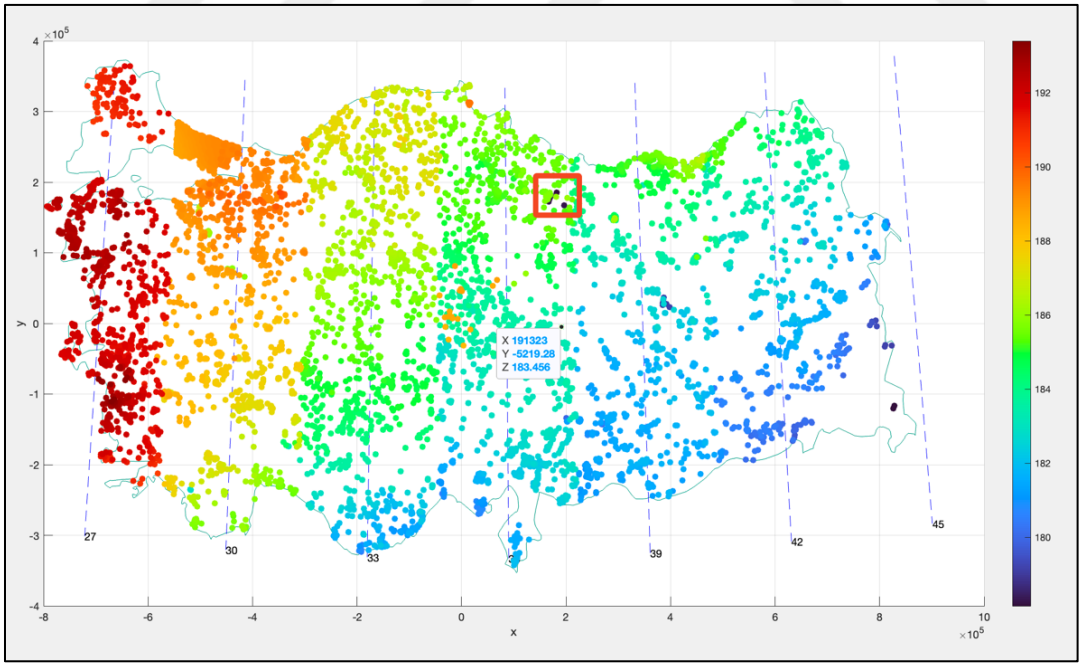
LKK tasvir koordinatları kullanılarak tüm noktalar çizdirilip ITRF96-ED50 koordinat farklarına göre renklendirildiğinde (Şekil 40, Şekil 41) bazı grupların hatalı olduğu görülmüştür. Bu hataların kaynağı manuel olarak yapılan incelemeler ile belirlenmiştir.



Şekil 40. Türkiye'deki ITRF96-ED50 UTM koordinat farkları



Şekil 41. Belirlenen ve hataları giderilen gruplar



Şekil 42. Tokat üzerindeki hatalı nokta grubu



Şekil 43. Türkiye, Tokat

1815	3326	60	36	581709.0...	4489546....	581728.8...	4489723....	166452.0...	172385.8...	166469.9...	172563.2...	178.3017...
1816	3326	60	36	583712.2...	4493744....	583731.9...	4493921....	168410.6...	176605.8...	168428.5...	176783.1...	178.2559...
1817	3326	60	36	584512.0...	4496063....	584531.7...	4496240....	169185.9...	178933.0...	169203.7...	179110.3...	178.2659...
1818	3326	60	36	587407.6...	4498063....	587427.3...	4498240....	172060.6...	180963.8...	172078.4...	181141.2...	178.2937...
1819	3326	60	36	597823.2...	4501916....	597842.8...	4502093....	182436.4...	184927.2...	182454.2...	185104.5...	178.1892...
1820	3326	60	36	611149.7...	4483827....	611169.3...	4484004....	195953.8...	166978.5...	195971.5...	167155.9...	178.3106...

Şekil 44. Hatalı noktaların grup numarasının belirlenmesi

3323	'C:\Users...	'276_BOL...	50	36	0.086398...	*8x4 double*	0.087331...	*8x4 double*	-0.00093...	[]
3324	'C:\Users...	'DUZCE_...	81	33	0.029927...	*5x4 double*	0.026192...	*5x4 double*	0.003735...	[]
3325	'C:\Users...	'GIRESUN...	28	39	0.011231...	*9x4 double*	0.010349...	*9x4 double*	0.000881...	[]
3326	'C:\Users...	'TOKAT_...	60	36	0.030918...	*7x4 double*	0.066086...	*7x4 double*	-0.03516...	[]
3327	'C:\Users...	'382_ITR...	60	36	0.030918...	*7x4 double*	0.066086...	*7x4 double*	-0.03516...	[]
3328	'C:\Users...	'382_GIR...	60	36	0.030918...	*7x4 double*	0.066086...	*7x4 double*	-0.03516...	[]

Şekil 45. 3326 grup numaralı veri, ham veri kümesi

Variables - text_temiz{3326, 6}

TUTGA | IB_veri | text_temiz | text_temiz{3326, 6}

text_temiz{3326, 6}

	1	2	3	4
1	581709.083000000	4489546.40700000	581728.880000000	4489723.58300000
2	584512.006000000	4496063.23800000	584531.726000000	4496240.38900000
3	583712.210000000	4493744.75400000	583731.937000000	4493921.89500000
4	587407.664000000	4498063.19400000	587427.370000000	4498240.36400000
5	597823.255000000	4501916.13000000	597842.895000000	4502093.21000000
6	633445.408000000	4497412.22000000	633464.720000000	4497589.44000000
7	611149.730000000	4483827.63300000	611169.300000000	4484004.86000000
8				

Şekil 46. Grup 3326'nın koordinatları

Tokat il sınırları içerisinde yer alan hatalı bir veri grubu (Şekil 42, Şekil 43) için yapılan inceleme şu şekildedir. MATLAB plot ekranında hatalı olan noktaların koordinatları belirlendikten sonra verilerin çizdirildiği matris içerisinde bu koordinata sahip noktalar belirlenir (Şekil 44). Bu verilerin kaydedildiği ham veriler (Şekil 45) incelendiğinde herhangi bir yazım veya kayıt hatası olmadığının görülmesi üzerine (Şekil 46) gruptaki hatanın işlemlerin okutulması kaydedilmesi veya dönüştürülmesi esnasında oluşmadığı anlaşıldığından bu veri grubu işlemlerden çıkarılmıştır.

Diğer tüm hatalı olarak belirlenen gruplar bu şekilde incelenerek dilim numaralarının hatalı olup olmama durumları, yanlış yazılmış koordinat içerip içermedikleri, 3° UTM koordinatı olup olmadıkları teyit edildikten sonra yapılan düzeltmelere rağmen hatalı sonuç veren nokta ve nokta grupları ortak nokta kümesinden çıkarılmıştır.

2.2.9. Veri Setinin Kullanıma Hazır Hale Getirilmesi

Türkiye genelinde gerçekleştirilen bu çalışmanın temel amacı, tüm illeri kapsayacak şekilde hem ED50 hem de ITRF96 datum sistemlerine ait ortak noktaların temin edilmesi ve bu noktaların yapılacak hesaplamalar için kullanıma hazır hale getirilmesidir. Bu kapsamda, iki farklı datum sistemine ait koordinat bilgilerine sahip olan noktalar, LKK projeksiyonu esas alınarak dönüştürülmüş ve her bir noktanın her iki datum sisteminde de tanımlı koordinatları hesaplanmıştır.

İlk olarak, dört sütundan oluşan ham veri seti (nokta kimliği, X ve Y koordinatları ile datum bilgisi) analiz edilmiştir. Bu veri seti başlangıçta 4200 grup ve 62500 noktadan oluşmaktadır. Veri temizleme sürecinde, geçersiz koordinatlar, sütun karışıklıkları ve ölçüm hataları tespit edilerek elenmiş; sonuç olarak grup sayısı 4150'ye, nokta sayısı ise 59500'e düşürülmüştür. Bu aşamada, yalnızca X koordinatları 1.000.000 ile 10.000.000 arasında, Y koordinatları ise 100.000 ile 1.000.000 arasında olan veriler dikkate alınmıştır.

Devamında, LKK projeksiyonu temel alınarak yapılan analizler sonucunda, 4150 grup içerisinde 9600 benzersiz nokta tespit edilmiştir. Bu noktalar arasındaki coğrafi konum ilişkileri değerlendirilmiş; aralarındaki mesafe, örtüşme ve benzerlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerin ardından, coğrafi açıdan yeterli uzaklığa sahip ve birbirinden ayırt edilebilen 8300 nokta kullanıma uygun olarak seçilmiştir.

Son aşamada, bu 8300 nokta üzerinde uyuşumsuz ölçüler testi, istatistiksel kontroller ve diğer doğrulama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kontroller sonucunda, çeşitli nedenlerle

(ölçüm hataları, sistematik farklar, lokal bozulmalar vb.) güvenilir bulunmayan noktalar elenmiş ve nihai olarak 7313 nokta hem ED50 hem de ITRF96 datum sistemleri arasında dönüşüm işlemleri için yeterli doğrulukta ve güvenilirlikte veri sağlayacak şekilde kullanıma hazır hale getirilmiştir.

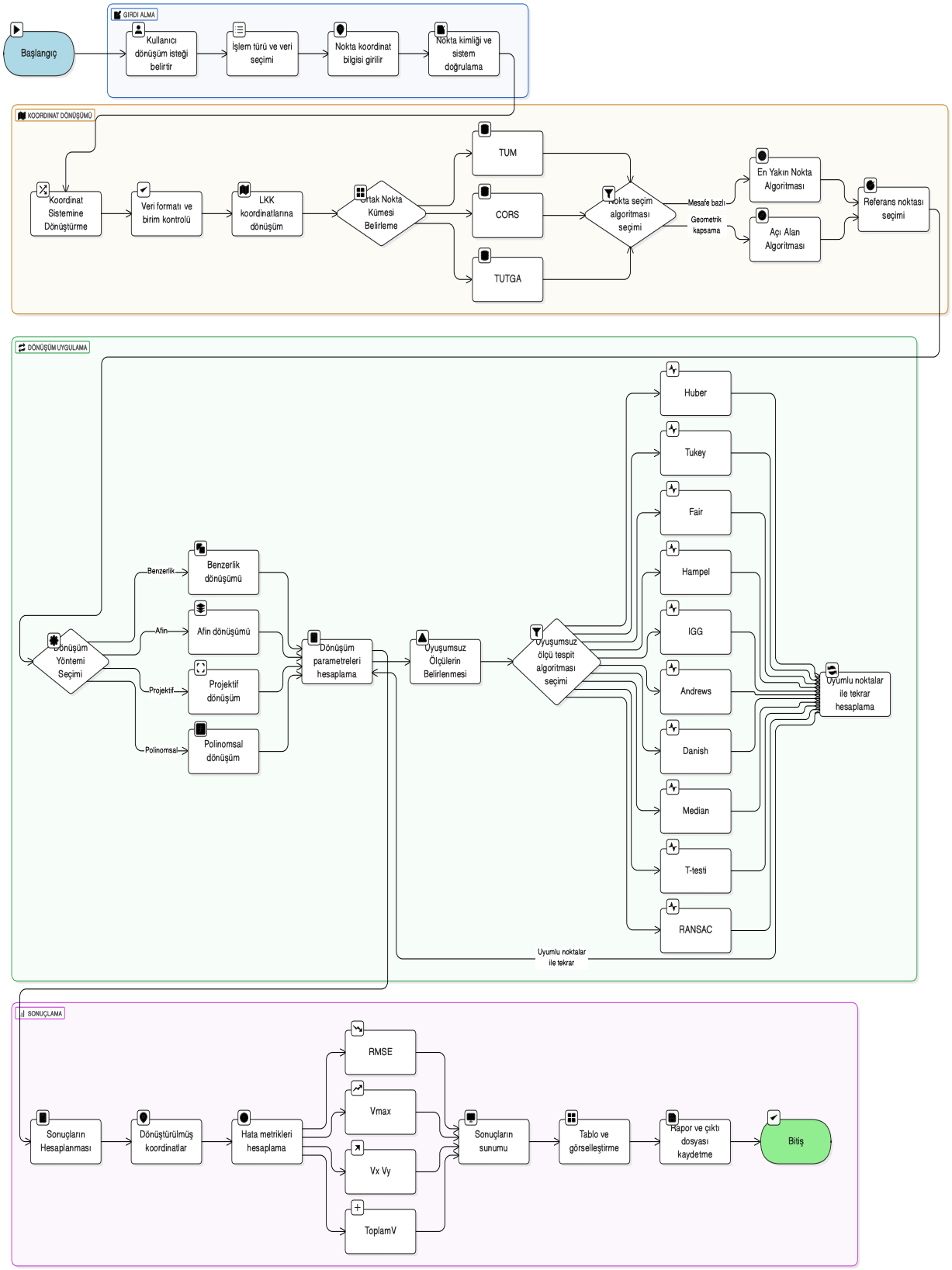
Son aşamada, tüm veriler dosya yolu, dosya adı ve double veri tipindeki koordinat verisi formatında sistematik olarak birleştirilerek kapsamlı ve kullanıma hazır veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veri tabanı, yapılacak hesaplamalar için gerekli olan tüm bilgileri içermekte ve kolayca erişilebilir bir yapıda organize edilmiştir.

2.3. Klasik Datum Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi

Klasik datum dönüşümü algoritmaları, başlangıçta kullanıcının dönüşüm tipini ve veri setini seçmesi, nokta koordinat bilgilerinin sisteme girilmesi ve veri bütünlüğünün sağlanmasıyla başlar. Ardından, seçilen veri seti (TUM, CORS veya TUTGA) üzerinden koordinat sistemi dönüşümleri gerçekleştirilir. Bu aşamada veri formatı ve birim kontrolü yapılır, LKK koordinatlarına dönüşüm tamamlanır ve En Yakın Nokta Algoritması veya Açı Alan Algoritması ile ortak noktalar belirlenir.

Dönüşüm algoritması seçiminden sonra, klasik koordinat dönüşüm yöntemleri devreye girer. Bu yöntemler benzerlik, afin, projektif ve polinomsal dönüşüm modellerini içerir. Her model için dönüşüm parametreleri hesaplanır. Hesaplamalar tamamlandıktan sonra, uyuşumsuz ölçülerin tespiti için robust istatistiksel testler uygulanır. Bu aşamada Huber, Tukey, Fair, Hampel, IGG, Andrews, Danimarka, t-testi ve RANSAC gibi uyuşumsuz ölçü belirleme fonksiyonları kullanılır. Seçilen uyuşumsuz ölçü belirleme algoritması, dönüşüm parametrelerinin güvenilirliğini artırarak hatalı ölçülerin etkisini en aza indirir. Uyumlu noktalar belirlendikten sonra dönüşüm işlemleri tekrar gerçekleştirilerek model doğruluğu pekiştirilir.

Son aşamada, performans analizleri yapılır. RMSE, Vmax, düzeltme vektörleri (Vx, Vy) ve toplam hata büyüklüğü gibi ölçütler hesaplanarak dönüşümün başarımı nicel olarak değerlendirilir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulur. Böylece, dönüşüm sürecinin tüm aşamaları hem matematiksel hem de istatistiksel bakımdan doğrulanmış olur. Bu yapılandırılmış süreç, farklı veri setleri ve algoritmalar arasında karşılaştırma yapmayı, model doğruluğunu ölçmeyi ve gerektiğinde optimizasyon gerçekleştirmeyi mümkün kılar (Şekil 47).



Şekil 47. Klasik dönüşüm yöntemlerinin genel akış şeması

2.3.1. Benzerlik Dönüşümü Algoritmalarının Üretilmesi

51-78 numaralı formüller ile 79-81 numaralı formüller ile matematiksel teorisi anlatılmış olan benzerlik dönüşümünün, MATLAB ortamında üretilmiş olan algoritmasının akış şeması Şekil 48 ile verilmektedir.

2.3.1. Afin Dönüşümü Algoritmalarının Üretilmesi

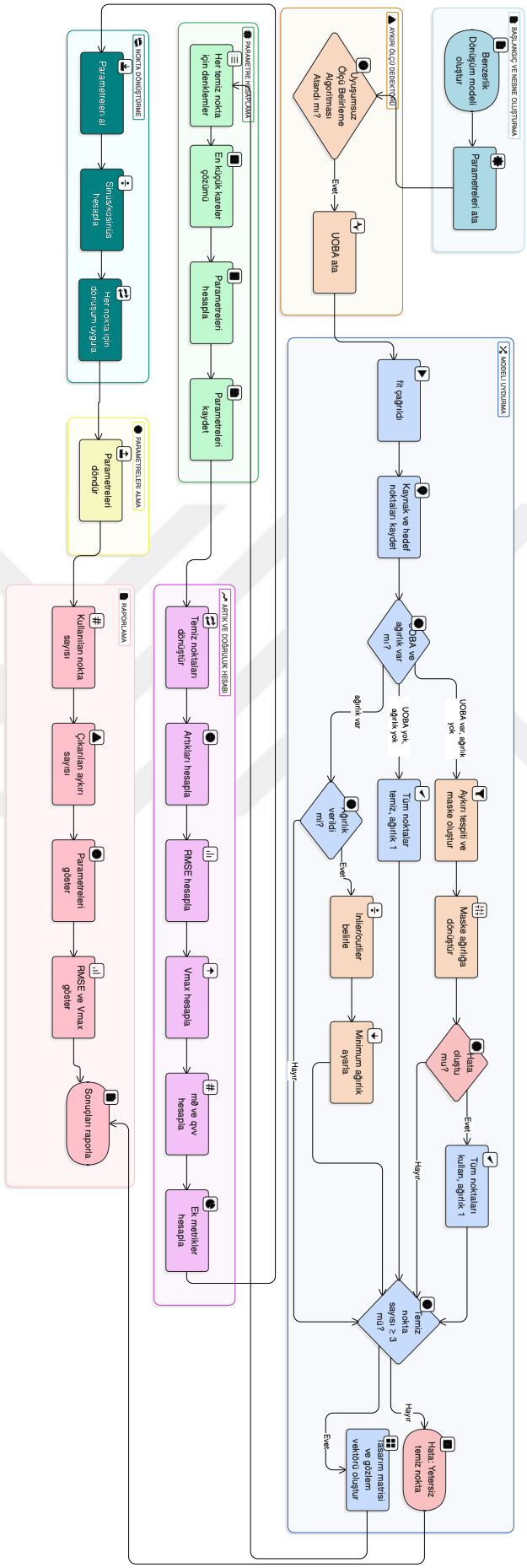
51-78 numaralı formüller ile 82-84 numaralı formüller ile matematiksel teorisi anlatılmış olan afin dönüşümünün, MATLAB ortamında üretilmiş olan algoritmasının akış şeması Şekil 49 ile verilmektedir.

2.3.2. Projektif Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi

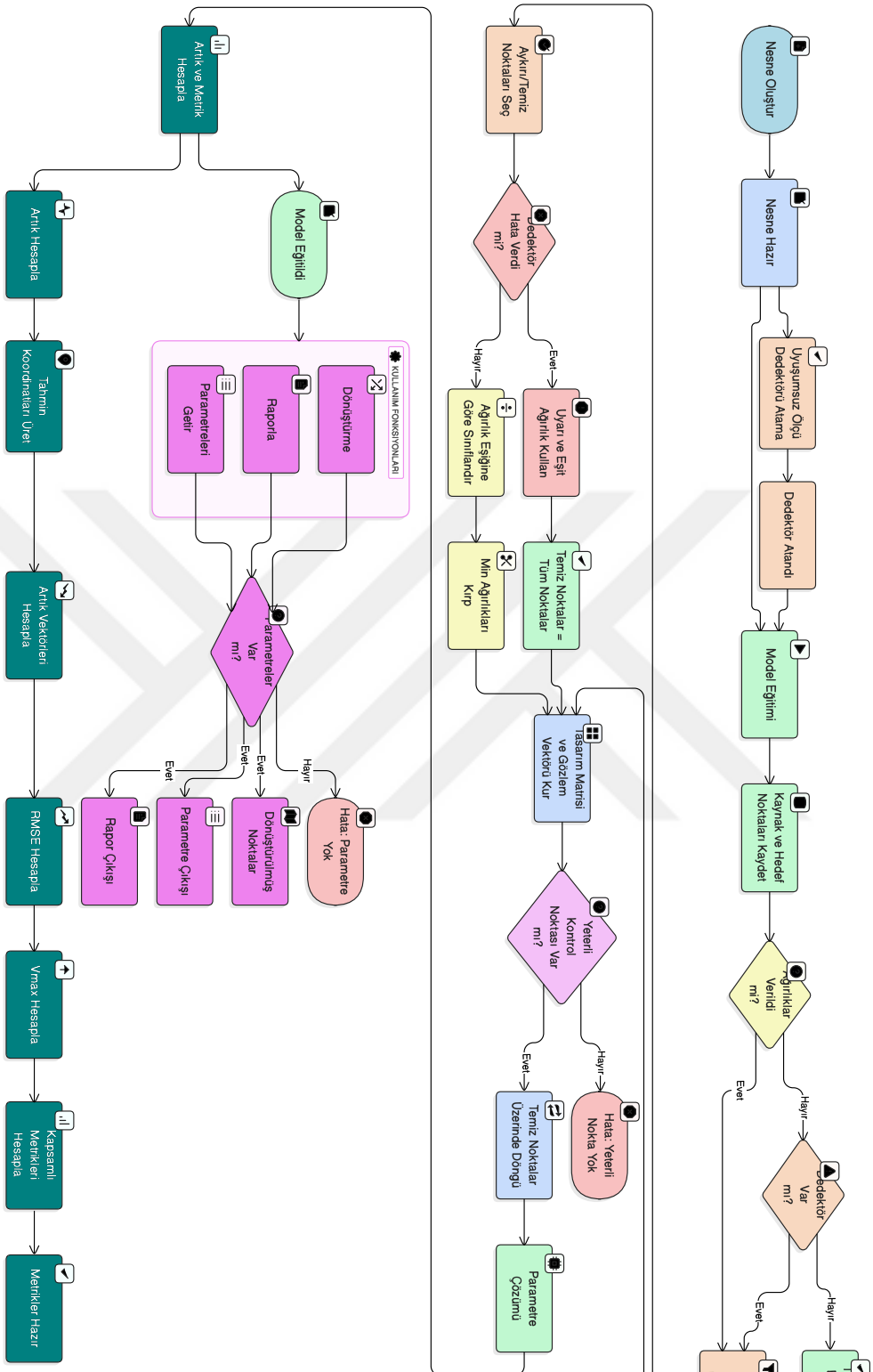
51-78 numaralı formüller ile 85-87 numaralı formüller ile matematiksel teorisi anlatılmış olan projektif dönüşümün, MATLAB ortamında üretilmiş olan algoritmasının akış şeması Şekil 50 ile verilmektedir.

2.3.3. Polinomsal Dönüşüm Algoritmalarının Üretilmesi

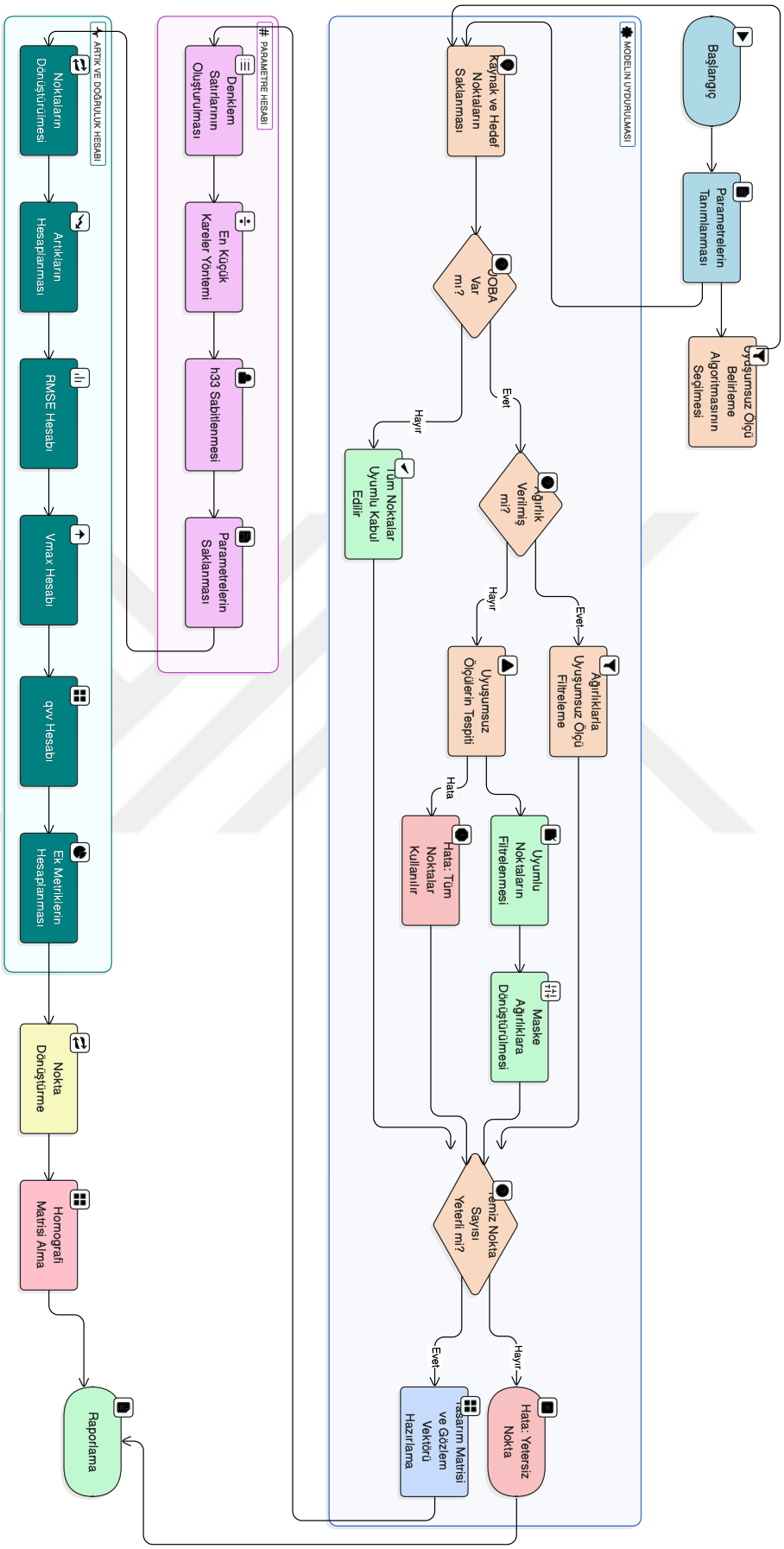
51-78 numaralı formüller ile 88-90 numaralı formüller ile matematiksel teorisi anlatılmış olan polinomsal dönüşümün, MATLAB ortamında üretilmiş olan algoritmasının akış şeması Şekil 51 ile verilmektedir.



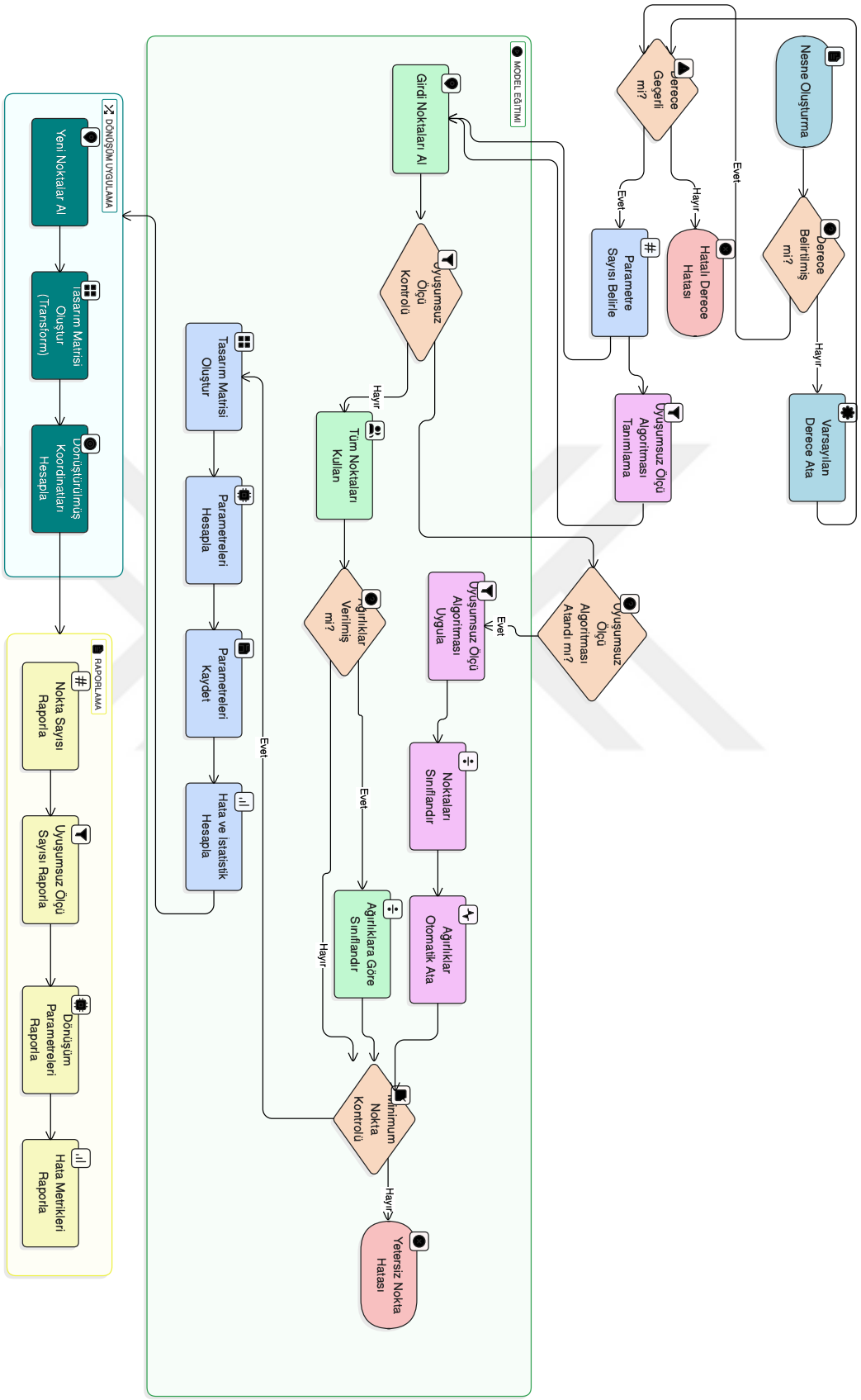
Şekil 48. Benzerlik dönüşümü yönteminin genel akış şeması



Şekil 49. Afin dönüşümü yönteminin genel akış şeması



Şekil 50. Projektif dönüşüm yönteminin genel akış şeması



Şekil 51. Polinomsal dönüşüm yönteminin genel akış şeması

2.4. Ortak Nokta Belirleme Algoritmalarının Oluşturulması

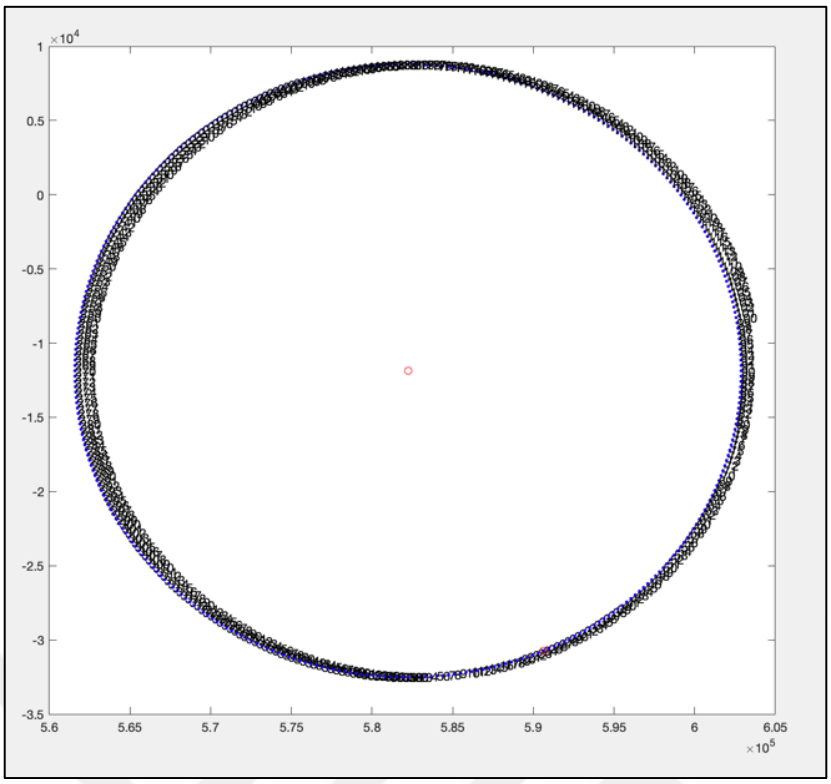
Koordinat dönüşüm işlemlerinde yüksek doğruluk elde edebilmek için kullanılacak ortak noktaların doğru ve etkin biçimde eşleştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle geniş alanlara yayılmış veri setlerinde, farklı datumlarda tanımlanmış nokta çiftlerinin eşleştirilmesinde hata yapılması dönüşüm doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda, tez çalışmasında dönüşüm işlemlerinde kullanılacak noktaların otomatik olarak eşleştirilmesini sağlayan iki farklı algoritma geliştirilmiştir: En Yakın Nokta Algoritması ve Açı Alan Algoritması. Her iki yöntem, farklı geometrik ilişkileri dikkate alarak eşleştirme işlemini gerçekleştirmekte ve dönüşüm algoritmalarına uygun veri çiftlerini oluşturmaktadır.

2.4.1. En Yakın Nokta Algoritması

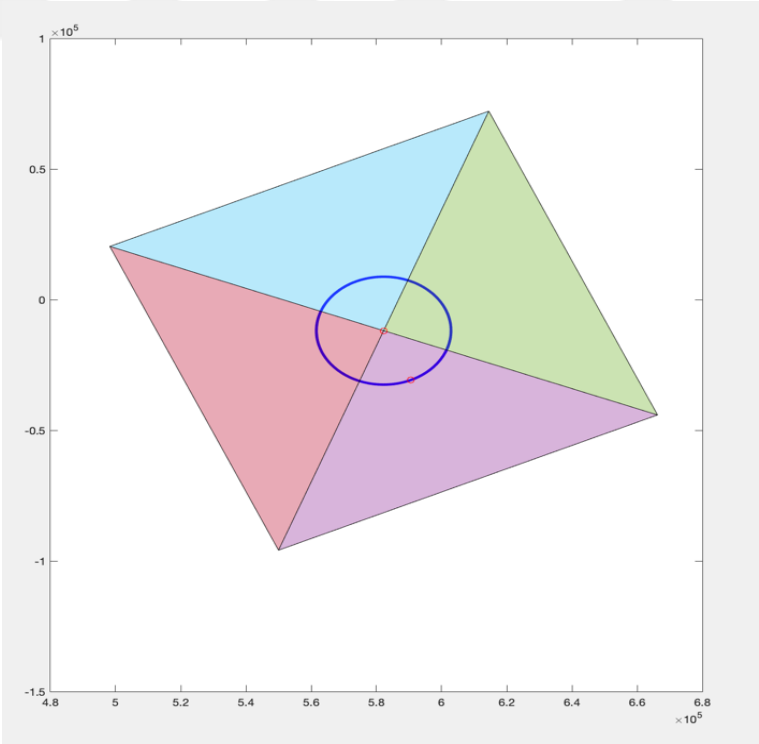
En Yakın Nokta Algoritması, öklidyen uzaklık ilkesine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu yöntemde, bir datumda tanımlı olan her nokta için ortak nokta kümesinde yer alan diğer tüm noktalarla olan mesafeler hesaplanmakta ve en kısa mesafeye sahip olan eş noktalar seçilmektedir. Bu algoritma, özellikle düzenli dağılımlı ve yoğun veri kümelerinde hızlı ve etkili bir eşleştirme çözümü sunmaktadır. Ancak topolojik veya yönlü benzerlik gözetmediği için seyrek veri setlerinde veya benzer konumlara sahip birden fazla noktanın bulunduğu bölgelerde homojen dağılmayan eşleşmelere neden olabilmektedir.

2.4.2. Açı Alan Algoritması

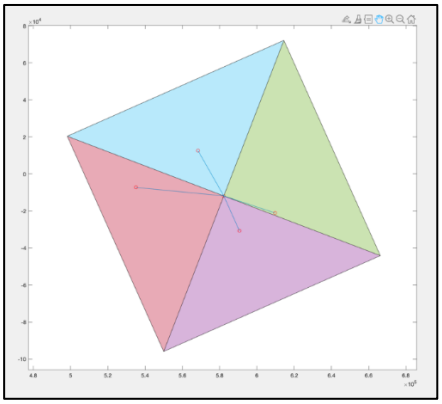
Datum dönüşüm parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan en yakın nokta algoritmalarında, çoğu zaman dönüştürülmek istenen noktanın çevresinde yer alan referans noktalarının mekânsal olarak homojen bir şekilde dağılmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum, dönüşüm parametrelerinin doğruluğunu ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu problemi gidermek amacıyla, dönüşüm işlemi gerçekleştirilecek noktanın çevresinde daha homojen bir dağılıma sahip ortak noktaların seçilmesini sağlayacak yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma “açı-alan algoritması” olarak adlandırılmıştır.



Şekil 52. Dönüşüm noktası ve en yakın ortak nokta



Şekil 53. En yakın nokta oluşturulan ilk üçgeni ortalar



Şekil 54. Her alan içerisinde dönüşüm noktasına en yakın ortak noktalar

Açı-alan algoritması, temel olarak, dönüşüm yapılacak hedef noktanın çevresinin belirli sayıda alana bölünmesi ve her bir alandan, hedef noktaya en yakın referans noktasının seçilmesine dayanmaktadır. Algoritmanın ilk adımında, hedef noktaya en yakın referans noktası belirlenir. Bu referans nokta ile hedef nokta arasında oluşturulan doğru parçası, hedef nokta merkezli ve eşit açılı sektörel bölgelere ayrılacak şekilde ikizkenar üçgenlerin oluşturulmasına temel teşkil eder (Şekil 52, Şekil 53). İlk üçgen, bu doğru parçasının semti ve yüksekliği kullanılarak tanımlanır. Geriye kalan alanlar ise aynı yöntemle hesaplanarak toplam alan, eşit açılı üçgen dilimlerine bölünür.

Ancak, yalnızca ilk referans nokta doğrudan belirlendiğinden, kalan alanlarda başlangıçta herhangi bir nokta yer almayabilir. Bu durumu gidermek amacıyla, tanımlanan üçgenlerin kenarları uzatılarak daha geniş alan kapsayacak şekilde yeniden tanımlanır. Bu genişletme işlemi sırasında, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği (BÖHHBÜY)'nde belirtilen "50 km²'lik alan için en az bir referans noktası" kriteri dikkate alınarak her üçgenin boyutları hesaplanır.

Alanların belirlenmesini takiben, MATLAB ortamında geliştirilen uygulamada inpolygon komutu kullanılarak her bir üçgen alan içerisinde kalan noktalar belirlenir. Daha sonra, her alandaki en yakın nokta tespit edilir (Şekil 54). Seçilen bir noktanın, iki farklı alanın sınırında yer alması durumunda her iki alan için de aynı nokta önerilebileceğinden, algoritma her yeni nokta seçiminde daha önce seçilmiş olup olmadığını kontrol etmektedir. Eğer bir nokta daha önce atanmışsa, o alan için bir sonraki en yakın nokta değerlendirmeye alınır. Belirlenen ortak noktalar kullanılarak datum dönüşüm parametrelerinin hesaplanması süreci başlatılır. Bu noktaların uygunluğu, "en yakın nokta" algoritmasında belirtildiği

üzere, BÖHHBÜY kapsamında belirtilen maksimum ölçü düzeltmesi olan 14 cm sınırı dikkate alınarak kontrol edilir. Uyuşmazlık tespit edilen durumlarda, ilgili alan içerisinden bir sonraki en yakın referans nokta belirlenerek dönüşüm işlemine devam edilir. Bu yöntem ile dönüşüm işleminin hem geometrik doğruluğu artırılmış hem de parametrik kararlılığı sağlanmış olur.

2.5. Uyuşumsuz Ölçü Belirleme Algoritmalarının Üretilmesi

Datum dönüşüm işlemlerinde kullanılan ortak noktaların bir kısmı, ölçüm hataları, koordinat sistemleri arasındaki eşleştirme hataları, yer değiştirmeler veya gözlemlenemeyen sistematik etkiler nedeniyle uyuşumsuz ölçü davranışı sergileyebilmektedir. Bu noktalar dönüşüm parametrelerinin hesaplanmasında istatistiksel olarak hatalı sonuçlara neden olmakta ve modelin genel doğruluğunu düşürmektedir.

Bu kapsamda, tez çalışması süresince dönüşüm denklemine giren noktalardan uyuşumsuz ölçü davranışı gösterenlerin tespiti ve elimine edilmesi amacıyla EKK yöntemini kullanılarak uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi için klasik test yöntemleri, robust yöntemler kullanılmıştır.

2.5.1. T-testi Yöntemi

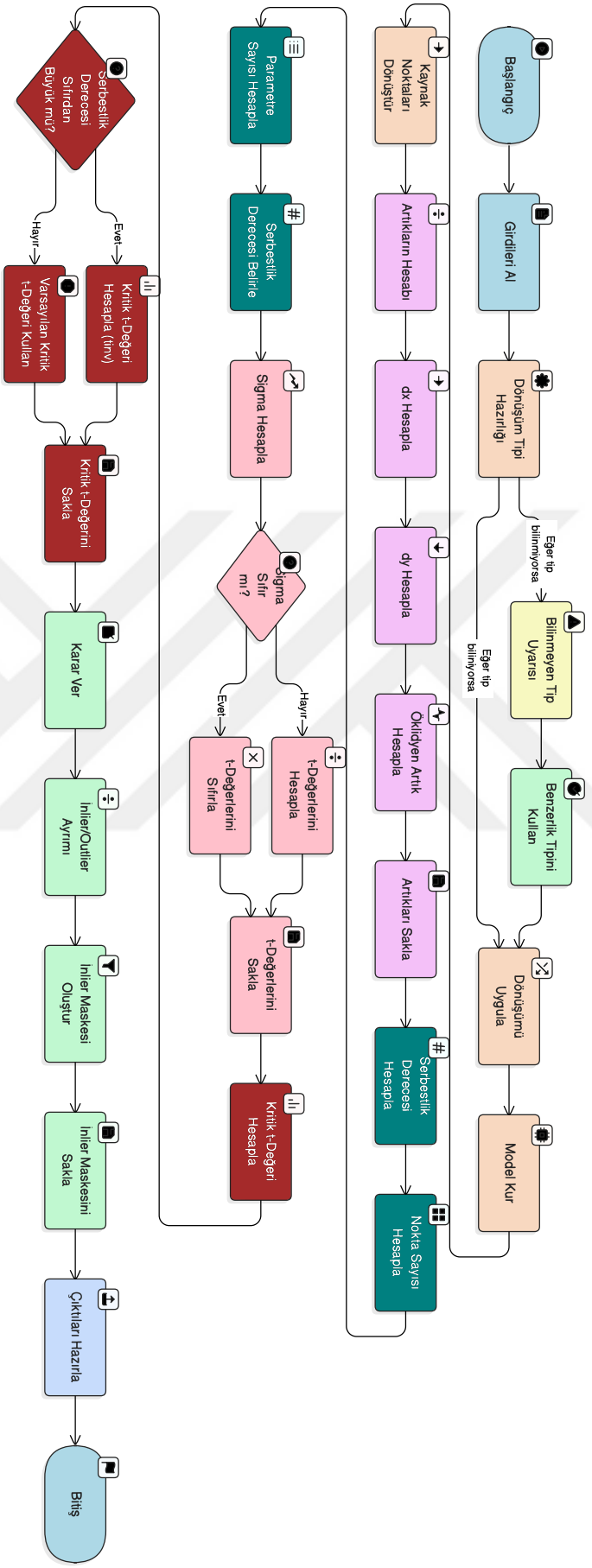
T-testinin matematiksel zemini 1.7 başlıklı bölümde açıklanmıştır. 1.7.9 numaralı bölümdeki formüllere göre üretilen algoritmanın akış şeması Şekil 55‘de sunulmaktadır.

2.5.2. Robust Yöntemler

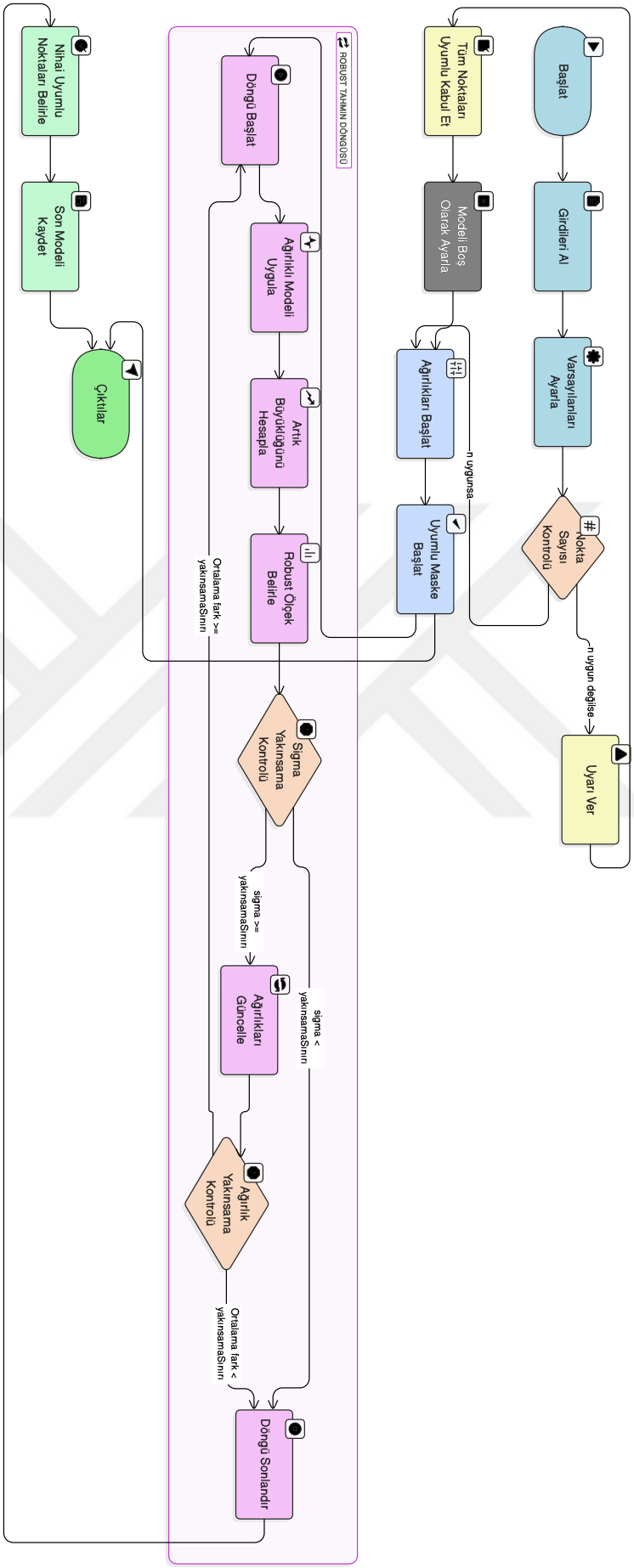
Robust yöntemlerin matematiksel zemini 1.7 başlıklı bölümde açıklanmıştır. 1.7.7 numaralı bölümdeki formüllere göre üretilen algoritmanın akış şeması Şekil 56‘de sunulmaktadır.

2.5.3. RANSAC Yöntemi

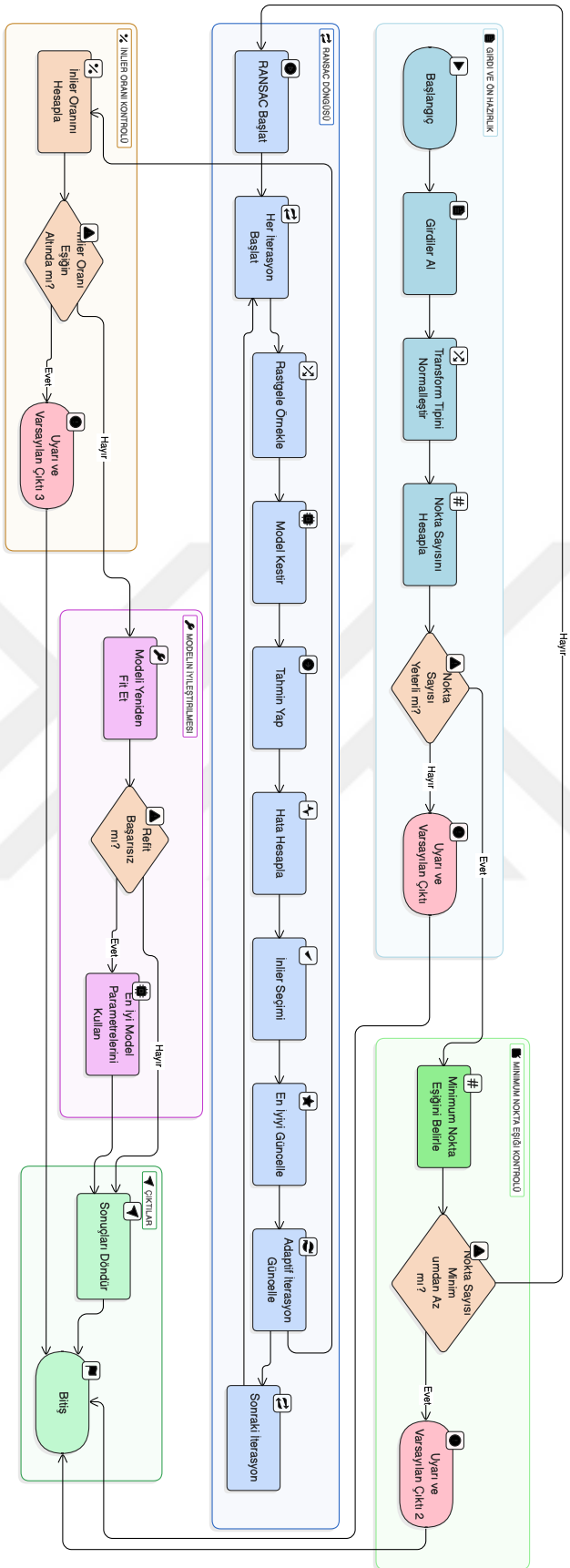
RANSAC yönteminin matematiksel zemini 1.7 başlıklı bölümde açıklanmıştır. Aynı bölümde yer alan formüllere göre üretilen algoritmanın akış şeması Şekil 57‘de sunulmaktadır.



Şekil 55. t-testinin akış şeması



Şekil 56. Robust yöntemlerin genel akış şeması



Şekil 57. RANSAC akış şeması

Çalışmada hem klasik hem de modern robust yöntemler uygulanmış olup, her birinin istatistiksel duyarlılığı ve uyuşumsuz ölçü baskılama gücü farklıdır. Tablo 6'de kullanılan yöntemler ve temel özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 6. Uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemlerine ait özellikler

Yöntem	Özellik / Etki Mekanizması
t-testi	Klasik yöntemdir; artık değerlerin normal dağılıma göre istatistiksel anlamlılıklarını test eder. Yüksek artık değeri olan noktalar %95 güven düzeyi ile reddedilir.
Huber	Küçük artık değerler için EKK davranışı gösterir, büyük değerler için ağırlığı azaltır. Yumuşak geçişli bir robust fonksiyondur.
IGG	Ölçümleri güvenilirliklerine göre kategorilere ayırır; her ölçüye uygun robust ağırlık fonksiyonu iteratif olarak uygulanarak zararlı ölçülerin etkisi azaltılır.
Tukey	Sınırın üzerinde artık değere sahip olan noktalara sıfır ağırlık verir. Aşırı ölçüler tamamen dışlanır.
Fair	Orta düzeyde etkili ve uyuşumsuz ölçü baskılaması sağlar. Daha toleranslıdır.
Hampel	Huber'in genişletilmiş versiyonudur. Farklı eşik değerlerle (soft clipping) daha geniş aralıkta davranışları bastırır.
Danimarka	Özellikle çok değişkenli verilerde yüksek etkili ölçüleri bastırmak için uygundur. Ağırlık fonksiyonu keskin bir şekilde değişir.
RANSAC	Parametrik modelin uygun alt kümesini seçer. Rastgele örnekleme ile uyumlu noktaları tespit eder; uyumsuzlar tamamen dışlanır.
Andrews	Düşük frekanslı osilasyon bazlı ağırlık fonksiyonu ile uç noktaları yumuşak bir şekilde baskılar.

2.6. Makine Öğrenmesi Modellerinin Üretilmesi

ITRF96–ED50 koordinat dönüşüm problemi, klasik dönüşüm modellerinin ötesinde doğrusal olmayan karmaşık yüzeyler içerebildiğinden, bu yapının öğrenilmesinde makine öğrenmesi (ML) algoritmalarına başvurulmuştur. Bu kapsamda, farklı modelleme paradigmasına sahip çeşitli ML modelleri, iki yönlü dönüşüm eğitimi için uygulanmıştır. Her modelin veri ile olan etkileşimi, öğrenme yapısı ve parametre hassasiyeti farklılık göstermektedir (Tablo 7).

Tablo 7. Karşılaştırmalı Makine Öğrenmesi Model Özeti

Model	Kodlama Yaklaşımı	Öğrenme Tipi	Avantajları	Zorluklar / Limitler
Linear Regression (LR)	fitlm veya polynomial genişleme	OLS / Ridge	Basit, açıklanabilir, hızlı	Yalnızca doğrusal ilişkiler
Multivariate LR (MLR)	QR çözümleyici ile çoklu çıktı	OLS + Regularizasyon	Çoklu çıktı, polinom genişletme	Çok boyutlu girdide sapmalara duyarlı
ANN / BPANN	train ile ileri-geri yayılım	Geri yayılım (BP)	Doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri öğrenir	Hiperparametre seçimi ve overfitting riski
Bayesyen Model	MCMC / variational inference	Posterior örnekleme	Belirsizlik modellemesi ve güvenilirlik analizi	Yüksek hesaplama maliyeti
GPR	fitrgp veya özel çekirdek tanımı	Bayesyen doğrusal olmayan	Küçük veriyle güçlü genelleme	Büyük veri ile ölçeklenemez
SVR (SVM)	fitrsvm ile çekirdek seçimi	Margin tabanlı öğrenme	Ayarsız veri ile yüksek doğruluk	Kernel parametresi seçimi zor
TPS (Thin Plate Spline)	Regülarize edilmiş spline fit	Deterministik interpolasyon	Yüzey düzgünlüğü yüksek	Çok noktalı durumda çözüm maliyetli
Kriging	Semivariogram + interpolasyon	Geostatistiksel regresyon	Uzamsal korelasyonları doğrudan modeller	Parametrizasyon (sill, nugget, range) karmaşık
Fraktal (Julia/Kaos)	Kaçış dinamiği üzerinden öğrenme	Heuristik / kaotik öğrenme	Nadir yapıların modellenmesinde yaratıcı	Açıklanabilirlik sınırlı, deneysel

2.6.1. ML Yöntemlerinin Eğitim Verisi

Veri madenciliği, makine öğrenmesi ve istatistiksel analiz gibi pek çok sayısal çözümleme yönteminde, değişkenlerin farklı ölçeklerde olması algoritmaların performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle mesafe tabanlı algoritmalarda, yüksek ölçekli değişkenlerin düşük ölçekli olanlara göre daha baskın hale gelmesi modelin dengesini bozabilir. Bu nedenle, değişkenlerin ortak bir ölçekte ifade edilmesi önemli bir ön işleme adımıdır. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri min-maks normalizasyonudur.

Min-maks normalizasyonu, her bir gözlem değerini (özelliği) belirli bir aralığa genellikle [0, 1] ölçeklendirmeyi amaçlar. Bu yöntemle, her bir değerin o özelliğin minimum ve maksimum değerleri dikkate alınarak dönüştürülmesi sağlanır. Normalizasyon işlemi, $X_{norm} = (X - X_{min})/(X_{max} - X_{min})$ şeklinlde ifade edilir: Bu formülde:

- X : normalize edilmek istenen orijinal değeri,
- X_{min}: ilgili özelliğin gözlemlenen en küçük değerini,

- X_{max}: gözlemlenen en büyük değerini,
- X_{norm}: elde edilen normalize edilmiş değeri temsil etmektedir.

Tablo 8. Normalizasyon Parametreleri

Özellik	Minimum	Maksimum	Aralık
Sağa Koordinat	-793630.47	843275.35	1,636,905.82
Yukarı Koordinat	-342434.57	364382.07	706,816.64

Çalışmada kullanılan veri setine ilişkin normalizasyon parametreleri Tablo 8' da sunulmuştur. Tabloda da görüldüğü üzere, her bir özellik için minimum ve maksimum değerler belirlenmiş ve bu değerler arasındaki fark "aralık" olarak hesaplanmıştır. Bu parametreler kullanılarak veri, her bir gözlem değeri için yukarıda belirtilen formül uygulanarak normalize edilebilir. Böylelikle, tüm özellikler [0, 1] aralığına taşınmış olur ve algoritmaların etkili çalışması sağlanmıştır.

Çalışmada, üretilen 7313 adet ortak noktanın LKK tasvir koordinatları kullanılmıştır. Bu koordinat verileri Tablo 8' da sunulan minimum ve maksimum değerler esas alınarak, min-maks normalizasyon yöntemi ile [0, 1] aralığına ölçeklendirilmiştir. Normalizasyon işlemi, model eğitiminde kullanılan algoritmaların farklı büyüklükteki değişkenler karşısında dengeli bir şekilde öğrenmesini sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen normalize veri kümesi, rastgele ve temsili olacak şekilde üç alt kümeye ayrılmıştır: %70'i eğitim, %15'i doğrulama (validation) ve %15'i test verisi olarak belirlenmiştir. Bu veri ayrımı hem modelin eğitimi hem de bağımsız değerlendirme sürecinde aşırı öğrenme riskini azaltmak ve genellenebilirliği güvence altına almak adına gerçekleştirilmiştir. Tüm makine öğrenmesi modelleri, bu veri kümesi üzerinden eğitilmiş ve karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

2.6.2. Makine Öğrenmesi Modelleri

Her bir model, problem bağlamına uygun şekilde özelleştirilmiş hiperparametrelerle yapılandırılmıştır. Kullanılan modeller ve modellere ait parametreler Tablo 9 ile gösterilmiştir.

a) LR ve MLR Modeli:

Doğrusal regresyon model eri üçüncü dereceden polinom terimleri içerecek biçimde genişletilmiş ve etkileşim terimleri dahil edilerek modelin karmaşık ilişkileri yakalaması sağlanmıştır. MLR modelinde ayrıca QR çözümleyicisi kullanılarak istikrarlı bir çözüm elde edilmiş, aynı zamanda bias terimi (sabit terim) modele dahil edilmiştir. Ridge düzenlemesiyle ($\lambda = 0.001$) aşırı öğrenme riskine karşı önlem alınmıştır. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 58 ile gösterilmektedir.

b) Yapay Sinir Ağı Modeli:

Yapay sinir ağları iki gizli katman içerecek şekilde tasarlanmıştır ([64, 32]), her iki katmanda da doğrusal aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Model, %20 doğrulama oranı ve 15 epoch sabırlı erken durdurma kriteriyle eğitilmiştir. Geri yayılım tabanlı ANN modeli (BPANN) ise benzer bir yapı kullanmakla birlikte, momentuma (0.9) ve L2 düzenlemesine (0.001) sahiptir. Bu sayede öğrenme süreci dengelenmiş ve aşırı uyuma karşı dayanıklı hale getirilmiştir. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 59 ile gösterilmektedir.

c) Fraktal Tabanlı Model:

Fraktal modelde, karmaşık düzlemde tanımlanan Julia kümeleri kullanılmıştır. Model parametreleri olarak Julia sabitinin gerçek ve sanal bileşenleri (-0.0001 ve 0.0001), kaçış yarıçapı (1.1) ve iterasyon sayısı (1000) belirlenmiştir. Model, oldukça düşük bir öğrenme oranı (0.00001) ve yüksek epoch sayısı (1000) ile öğrenmeye açılmıştır. Bu yapı, sistemdeki kaotik davranışları öğrenmek için tercih edilmiştir. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 60 ile gösterilmektedir.

d) Bayesyen Regresyon Modeli:

Bayesyen yaklaşım, Gaussian önsel ve Gaussian likelihood varsayımları ile yapılandırılmıştır. Modelde 1000 örnekleme gerçekleştirilmiş, ilk 200 örnek burn-in aşamasında atılmıştır. MCMC örneklemesi için adım boyutu 0.01 olarak belirlenmiş ve toplamda dört paralel zincir çalıştırılmıştır. Yakınsama eşiği olarak 1e-4 değeri kullanılmıştır. Bu yapı, model belirsizliğini ve parametre dağılımını daha doğru temsil etme kapasitesine sahiptir. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 63 ile gösterilmektedir.

e) SVR Modeli:

SVR modeli lineer çekirdek fonksiyonu ile yapılandırılmış ve çekirdek ölçeği 1 olarak belirlenmiştir. Epsilon-insensitive loss fonksiyonu kapsamında epsilon parametresi çok düşük bir değere (1e-7) ayarlanarak hata toleransı en aza indirgenmiştir. Box constraint (C) parametresi olarak 1.0 kullanılmıştır. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 64 ile gösterilmektedir.

f) GPR Modeli:

GPR modeli, RBF çekirdek fonksiyonu ile tanımlanmış ve kernel parametreleri [$\sigma_f = 1.0, l = 1.0$] olarak belirlenmiştir. Modelde gözlemlere ait hata bileşeni için 1e-7 seviyesinde düşük bir gürültü varyansı varsayılmıştır. Bu model, olasılıksal tahmin yetenekleri nedeniyle özellikle belirsizlik yönetimi gereken problemler için uygundur. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 61 ile gösterilmektedir.

g) TPS Modeli:

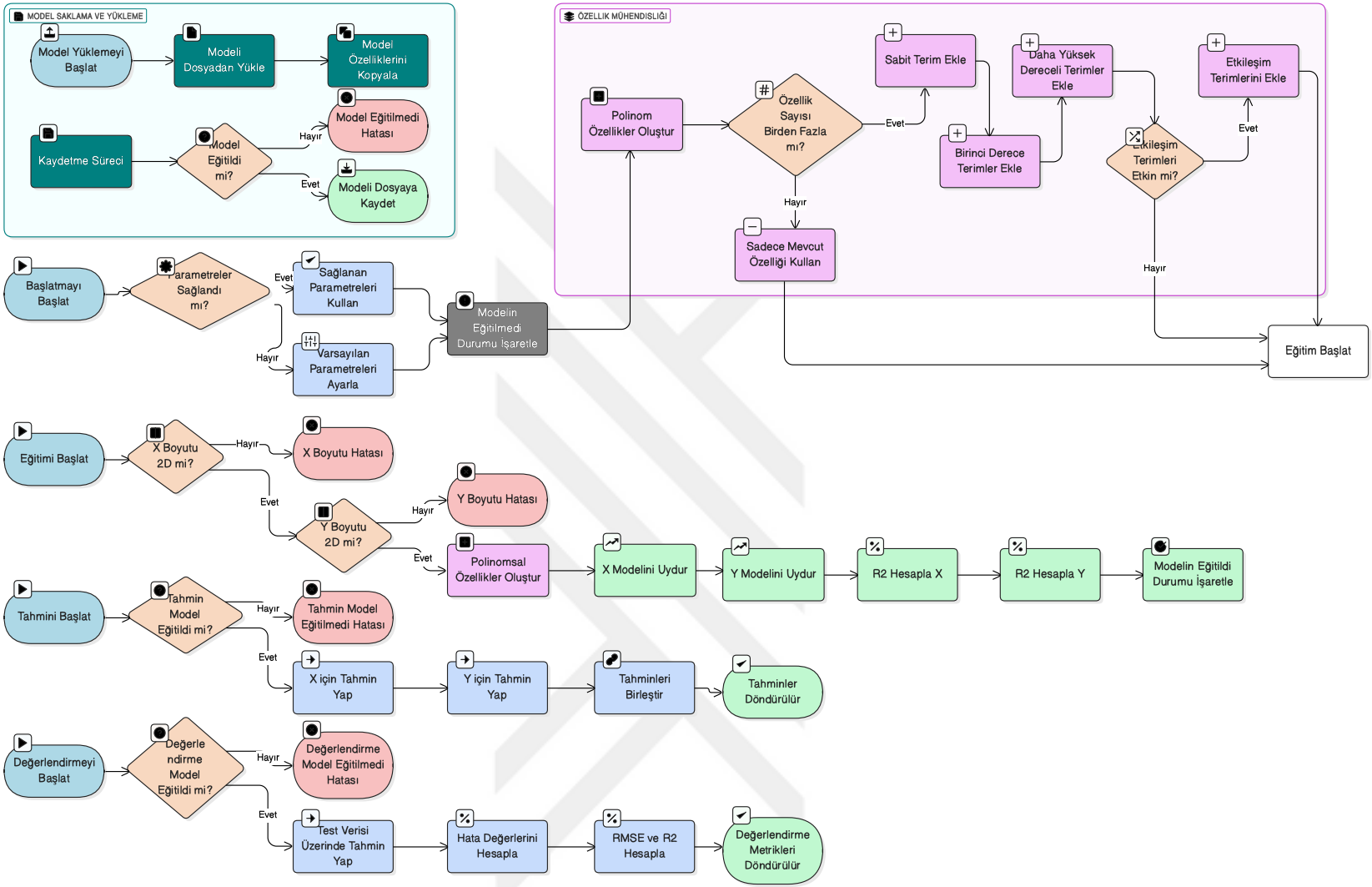
TPS modeli, mekânsal interpolasyon uygulamaları için tercih edilmiş ve çok küçük bir düzenleme katsayısı (0.0001) ile yapılandırılmıştır. Bu yaklaşım, düzlemsel sapmaları minimize ederek yumuşak yüzeyler üretme yeteneğine sahiptir. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 65 ile gösterilmektedir.

h) Kriging Modeli:

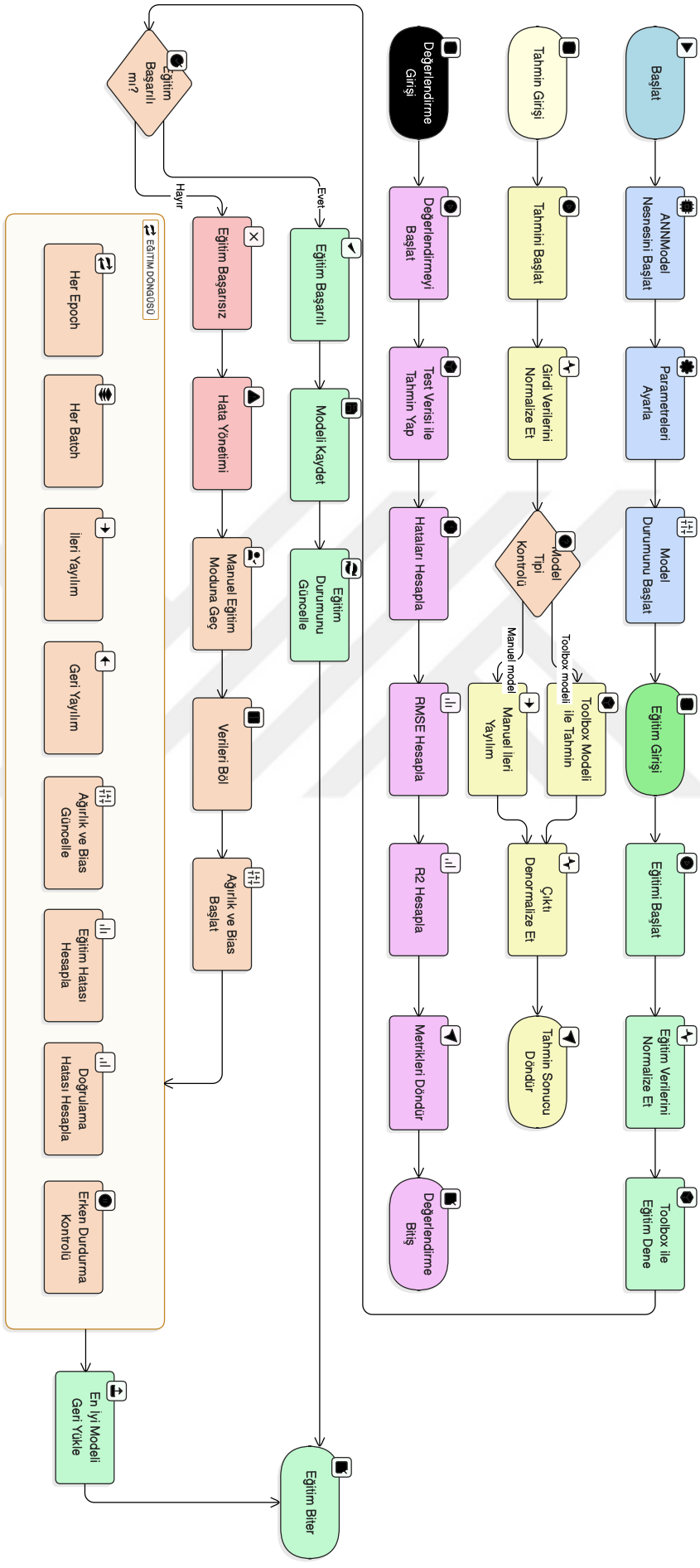
Jeoistatistiksel analizler için kullanılan Kriging modeli, Gaussian variogram tipi ile yapılandırılmıştır. Sill, range ve nugget değerleri sırasıyla 1.0, 1.0 ve 0.0 olarak belirlenmiştir. Modelde anizotropi dikkate alınmış ve X-Y yönünde ayrı modeller oluşturulmuştur. Bu yapı, özellikle mekânsal korelasyonun etkili olduğu alanlarda güçlü bir kestirim sunmaktadır. Modele ait algoritmasının akış şeması Şekil 62 ile gösterilmektedir.

Tablo 9. Model Parametrelerine Göre Karşılaştırma (Özet Tablo)

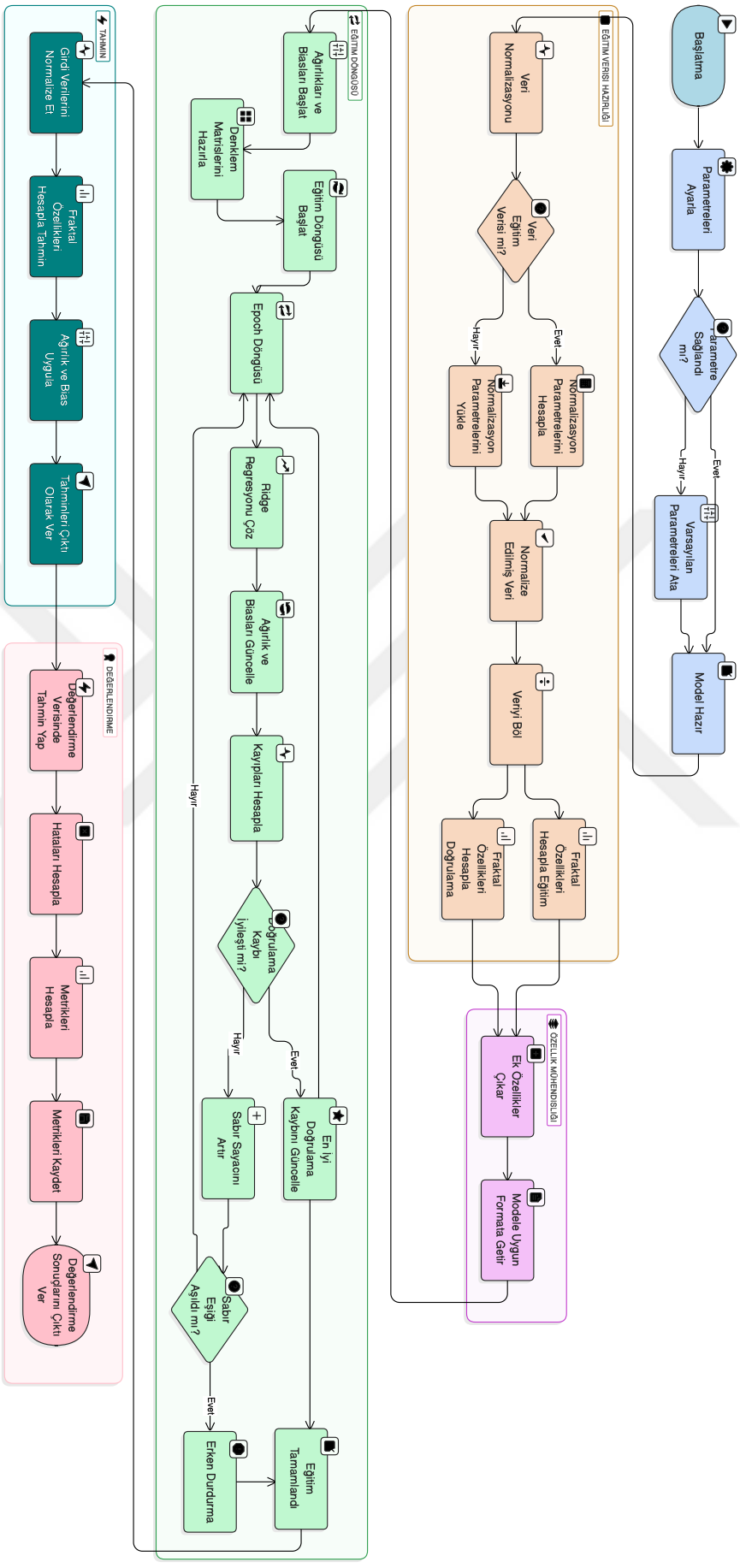
Model	Temel Parametreler	Regularizasyon	Output Dim.	Overfit Riski
LR/MLR	Polinom derecesi, etkileşim	L2 (ridge)	2	Düşük
ANN/BPANN	Katman sayısı, aktivasyon, epoch, L2	L2 + Early Stop	2	Orta-Yüksek
SVR	Kernel tipi, epsilon, C	C parametresi	2	Orta
GPR	Kernel tipi, noise var	Otomatik	2	Düşük
Kriging	Sill, range, nugget	Yok	2	Düşük
TPS	λ (reg. katsayısı)	L2 tipi	2	Orta
Bayesyen	Prior, step size, chains	Likelihood modeli	2	Düşük-Orta
Fraktal	c_{real}, c_{imag}, escape Radius	Yok	2	Yüksek (deneysel)



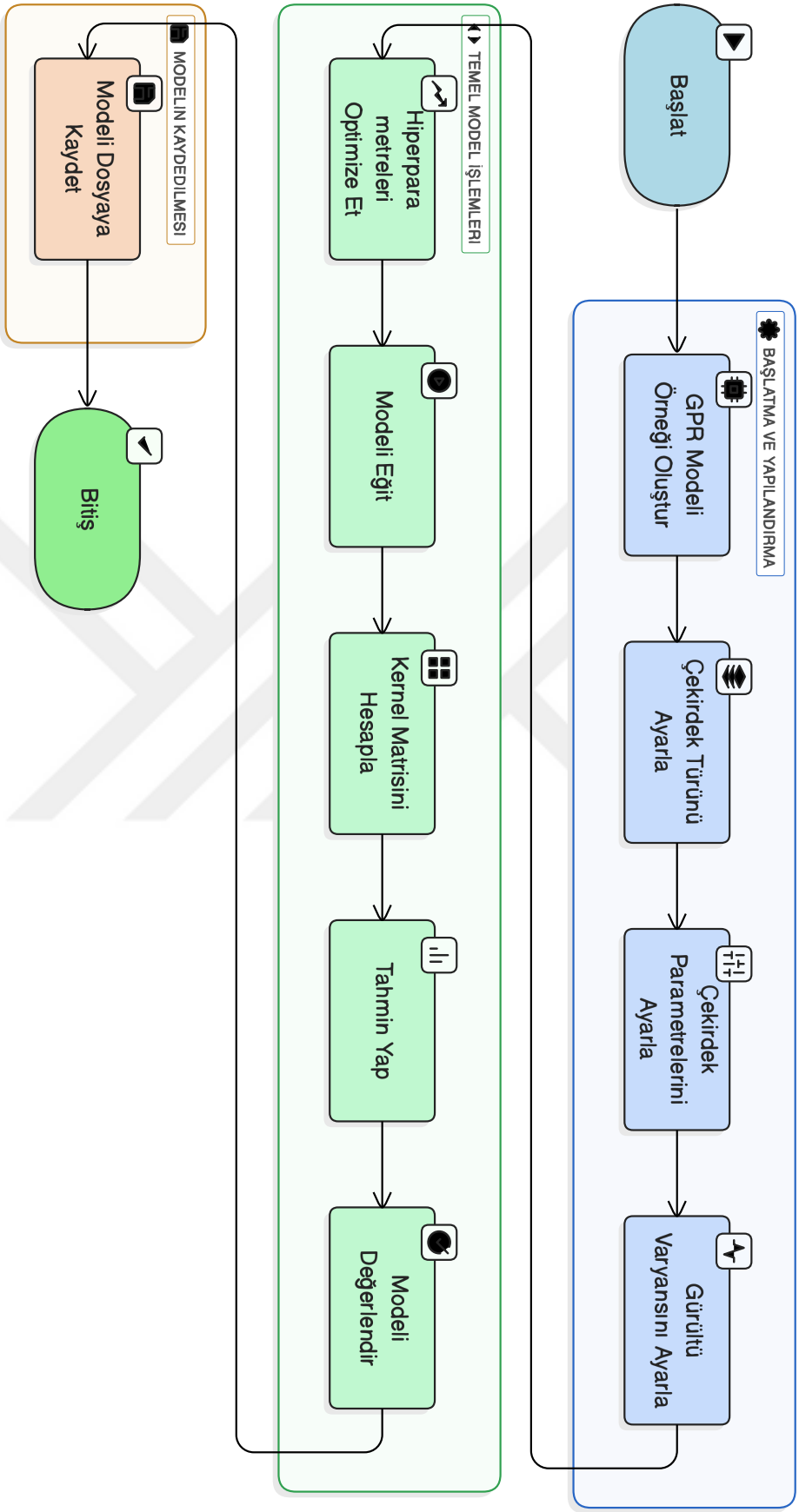
Şekil 58. LR makine öğrenmesi modelinin akış şeması



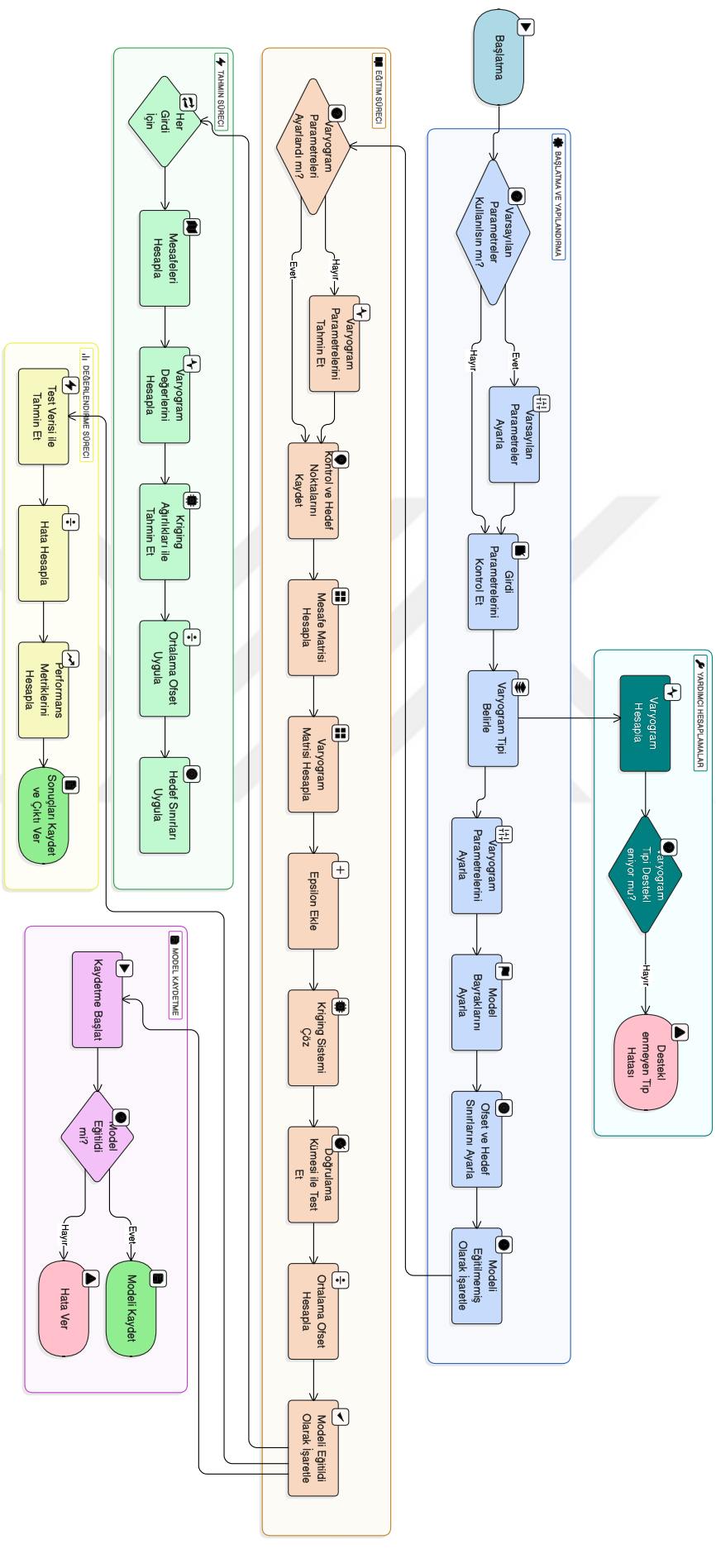
Şekil 59. YSA makine öğrenmesi modelinin akış şeması



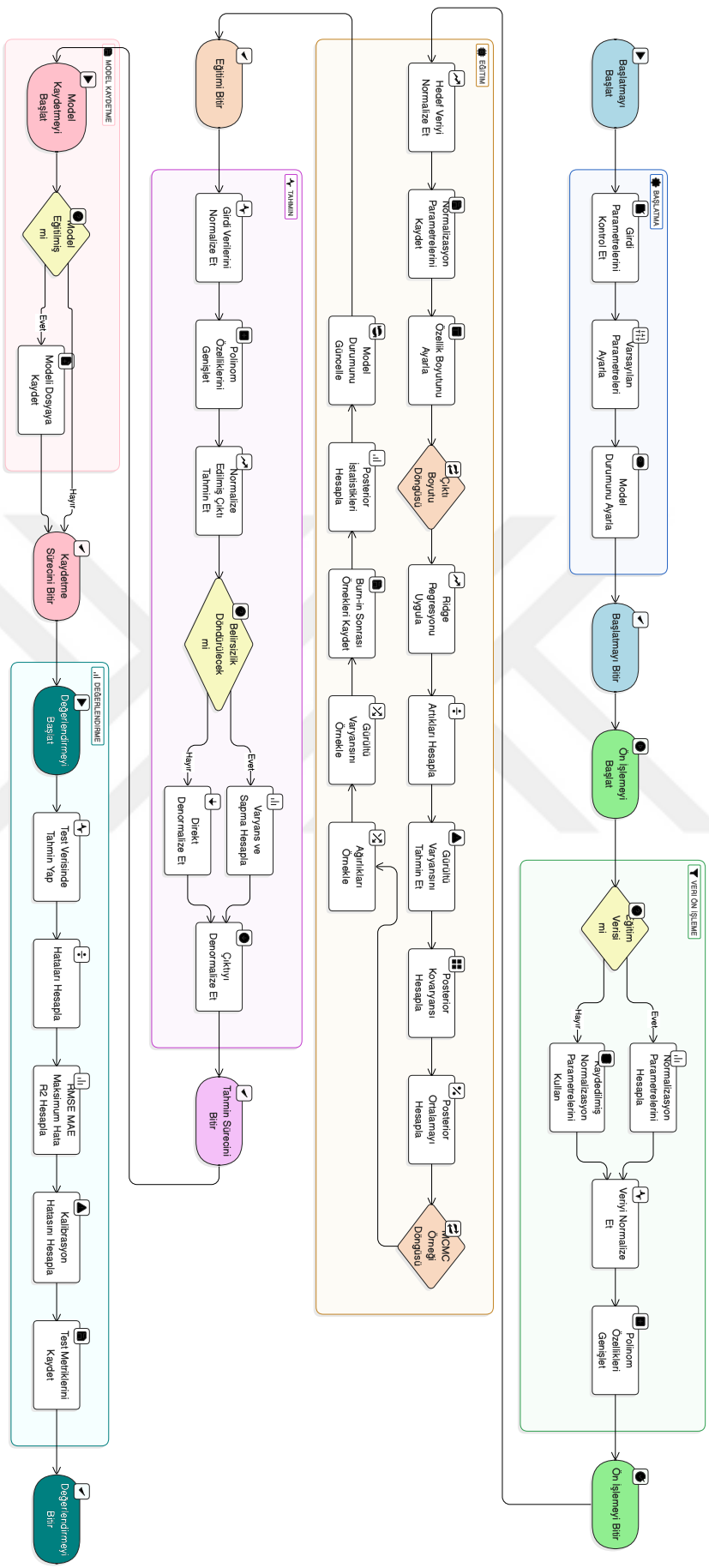
Şekil 60. Fraktal tabanlı makine öğrenmesi modelinin akış şeması



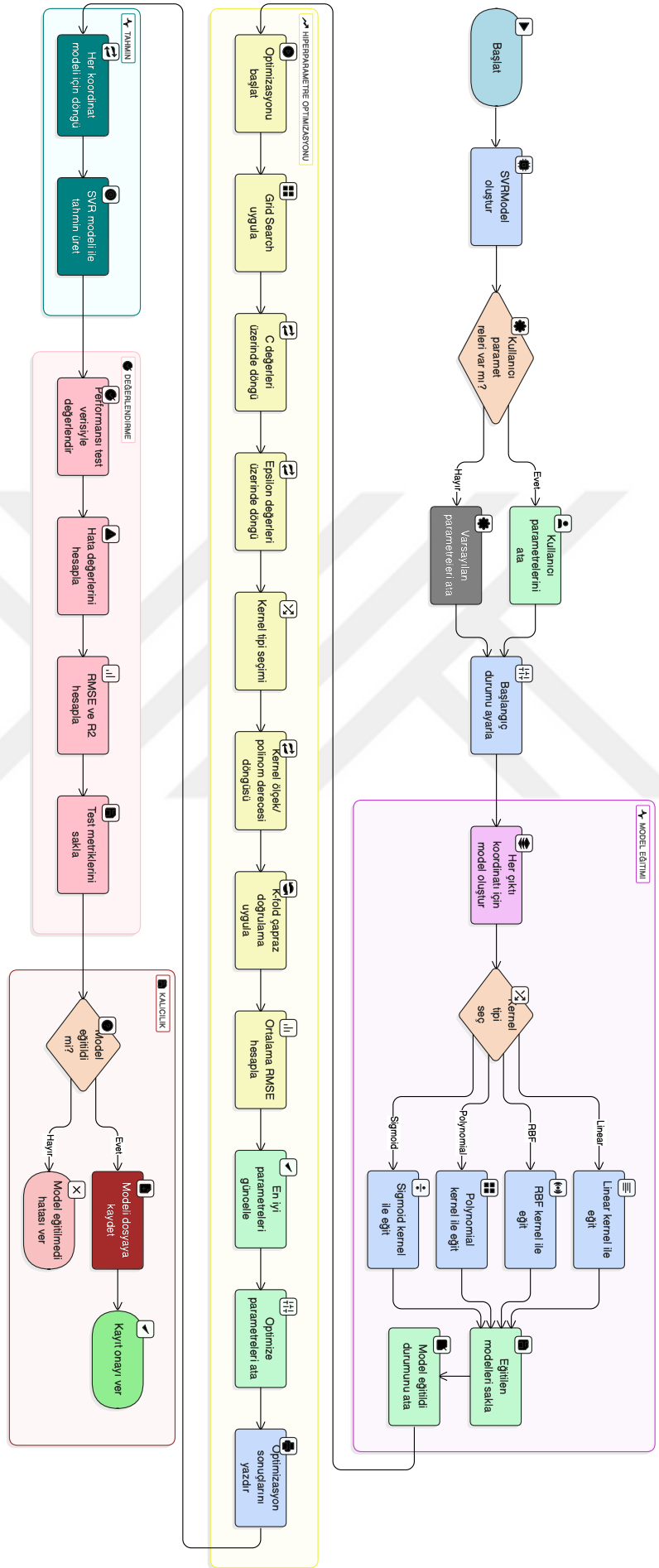
Şekil 61. GPR makine öğrenmesi modelinin akış şeması



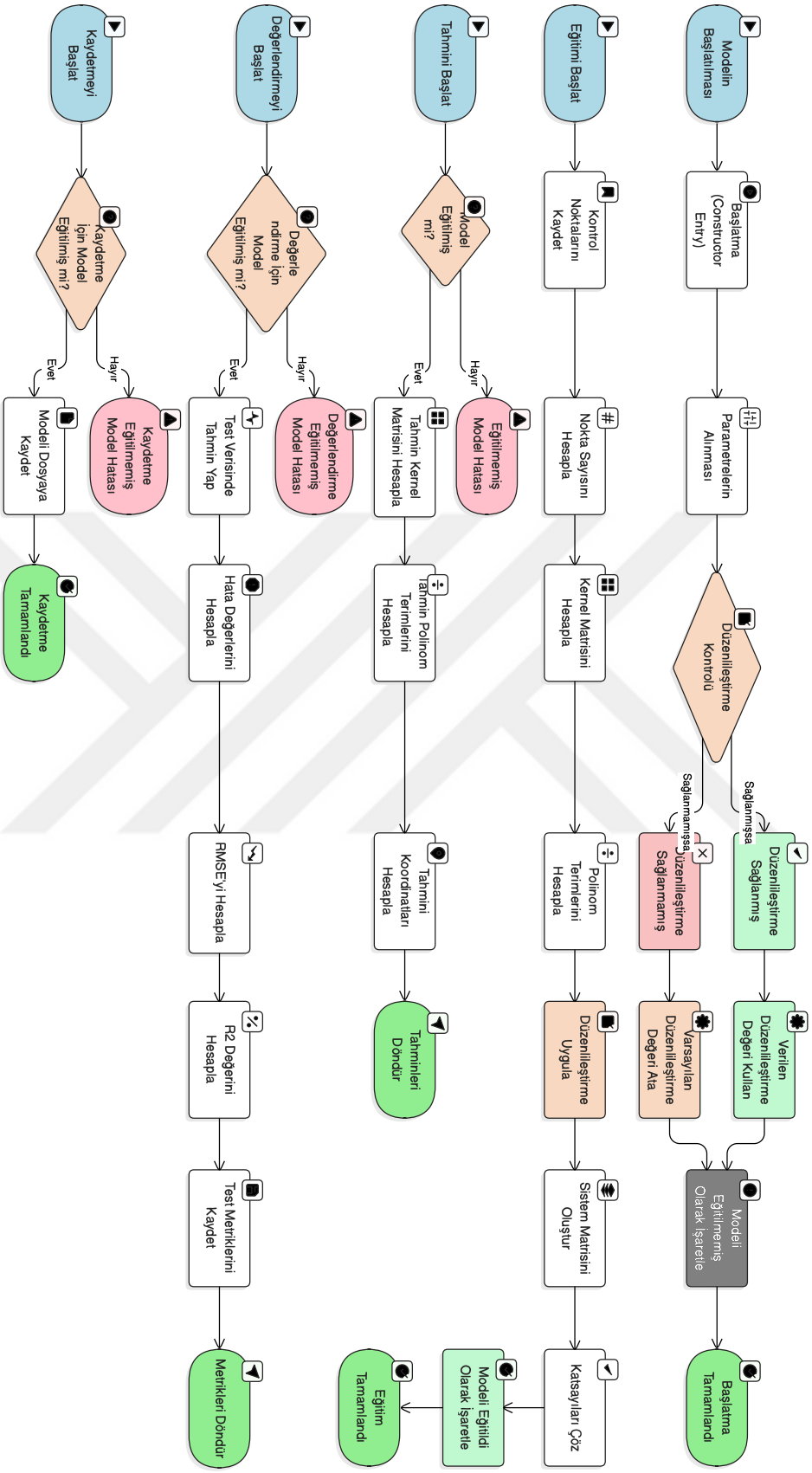
Şekil 62. Kriging makine öğrenmesi modelinin akış şeması



Şekil 63. Bayesyen makine öğrenmesi modelinin akış şeması



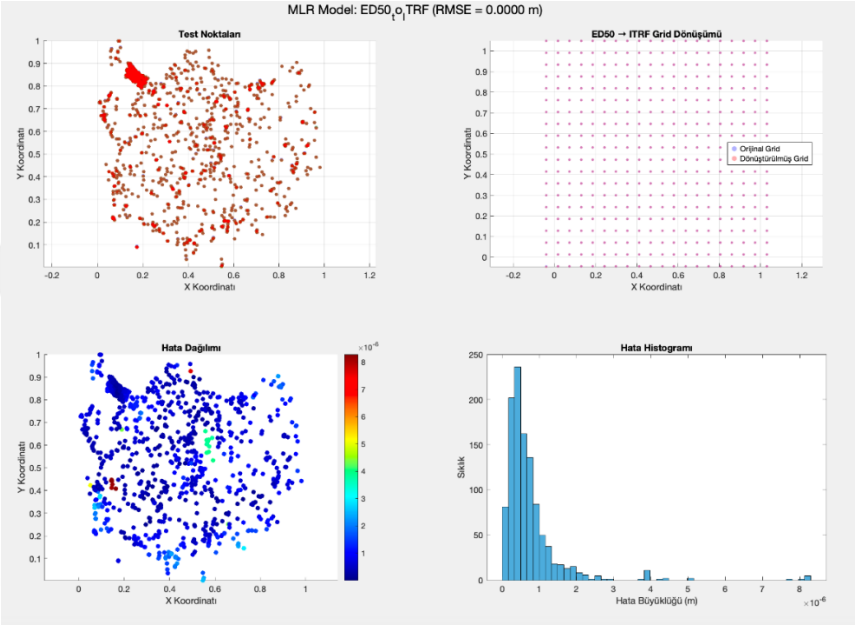
Şekil 64. SVR makine öğrenmesi modelinin akış şeması



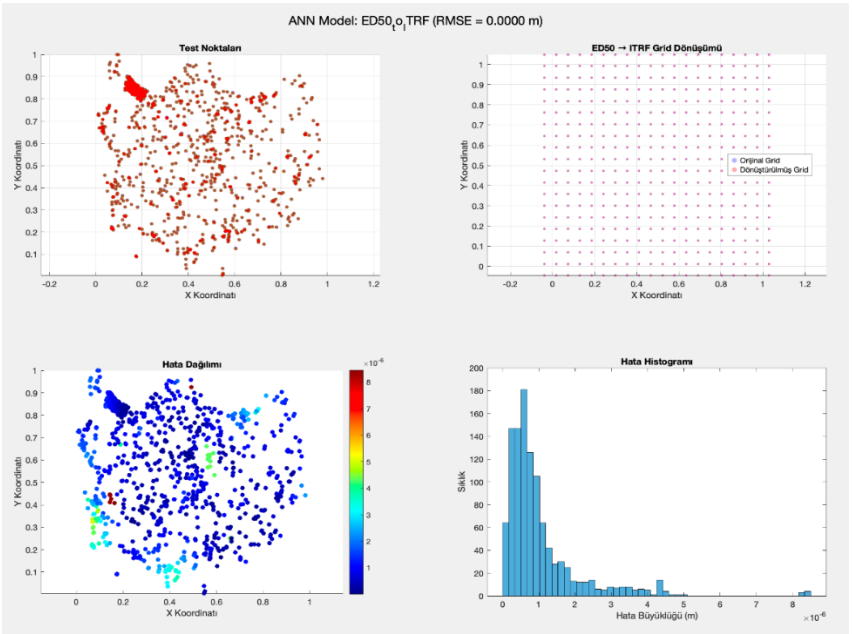
Şekil 65. TPS makine öğrenmesi modelinin akış şeması

2.6.3. Modellerin Eğitim Sonuçları

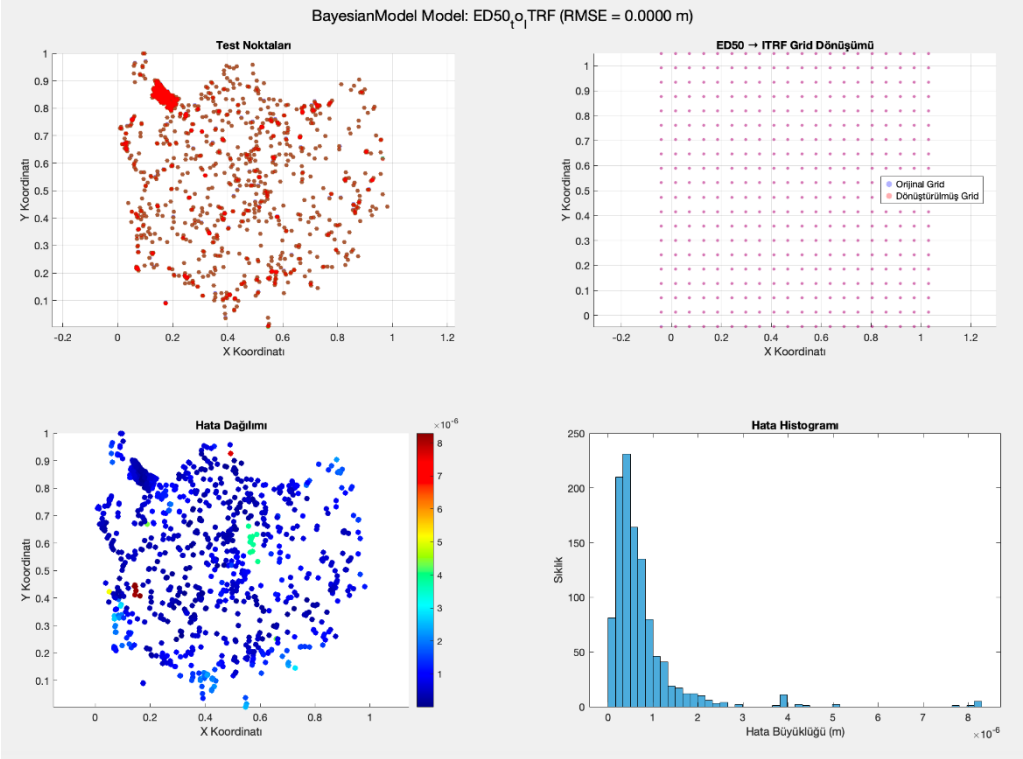
Makine öğrenmesi modellerinin eğitim işlemleri MATLAB ortamında gerçekleştirilerek model eğitim sonuçları görselleştirilmiştir. Bu görsellerin sol üst kısmında test noktalarının dönüşüm sonuçları, sağ üst kısmında bir test ızgarasının dönüştürülmesiyle yapılan test sonucu, sol alt kısımda karesel ortalama hataların mekânsal dağılımı ve sağ alt kısımda hata histogramı yer almaktadır (Şekil 66-Şekil 75 arası).



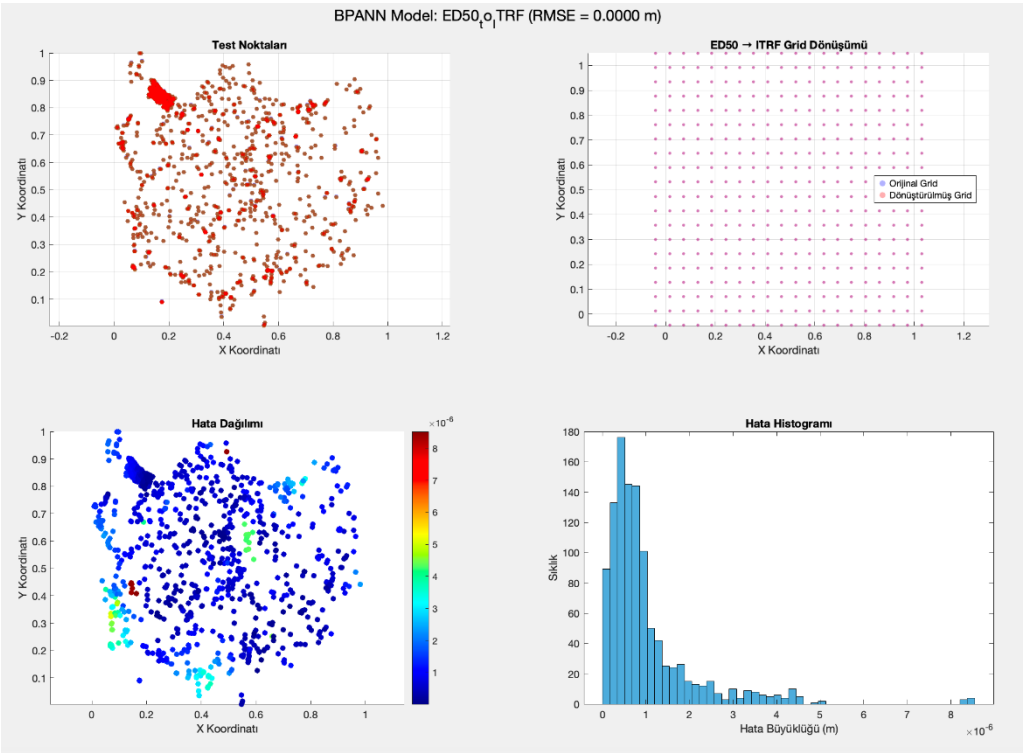
Şekil 66. MLR model eğitim sonuç ekranı



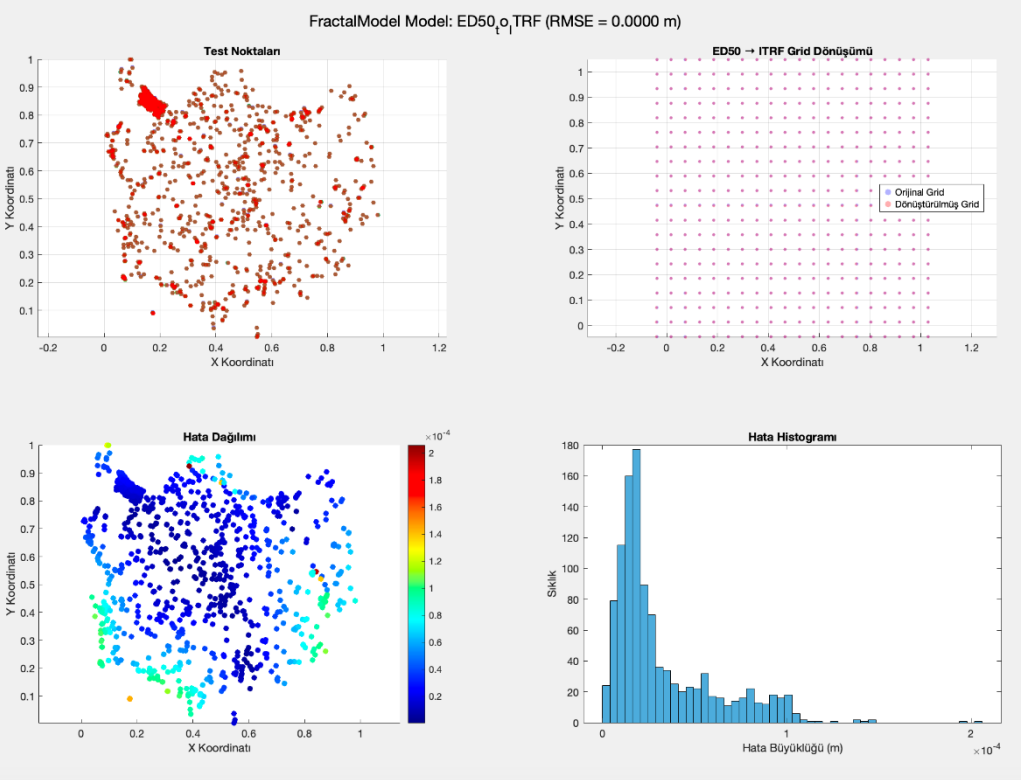
Şekil 67. ANN model eğitim sonuç ekranı



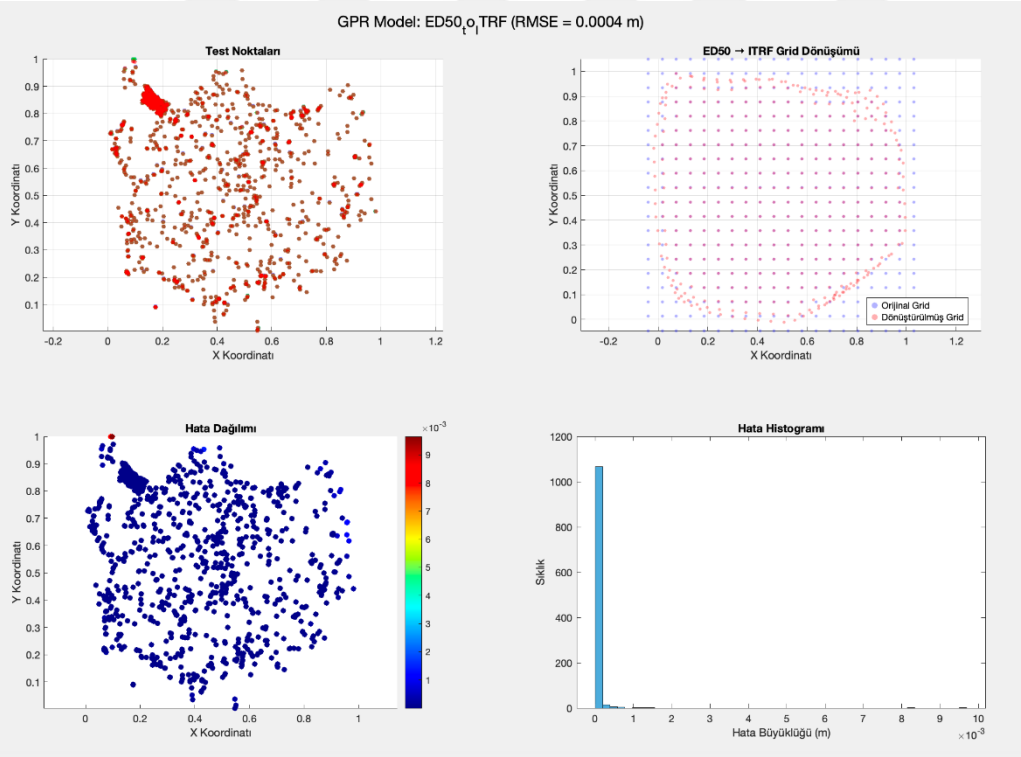
Şekil 68. Bayesyen model eğitim sonuç ekranı



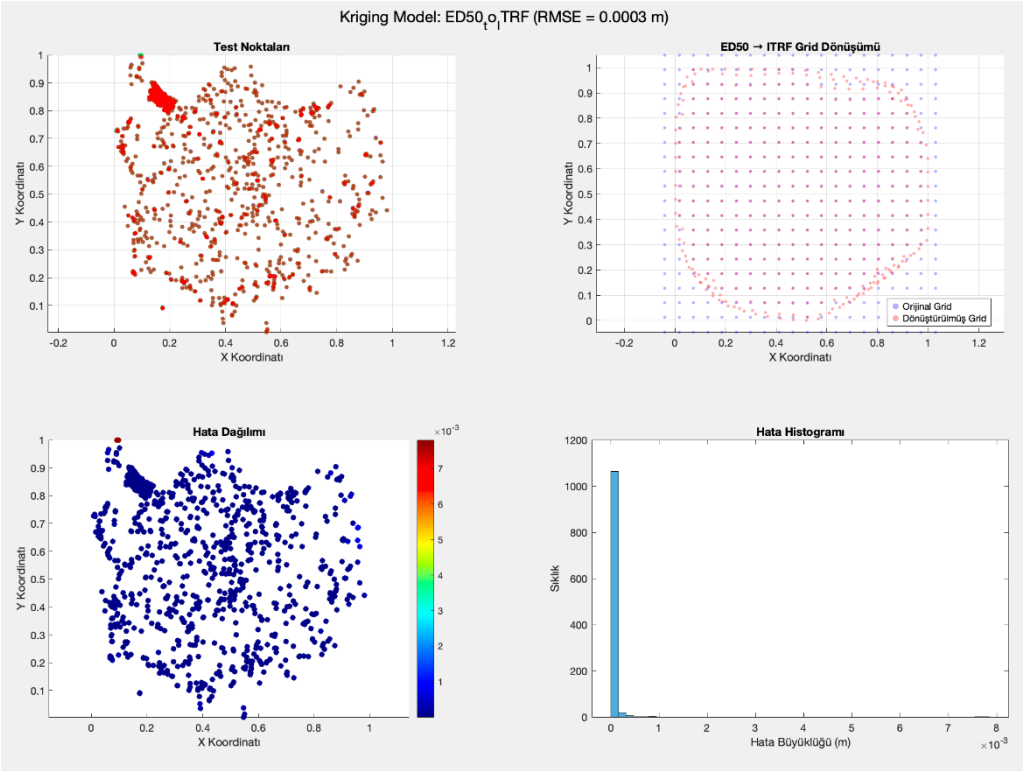
Şekil 69. BPANN model eğitim sonuç ekranı



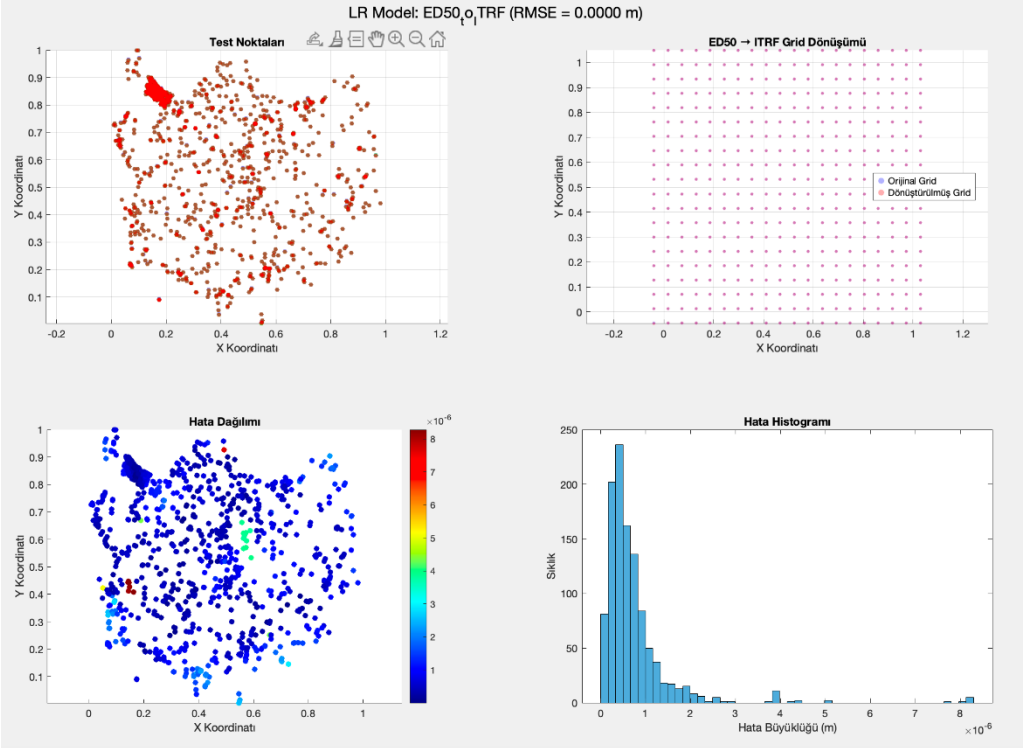
Şekil 70. Fraktal model eğitim sonuç ekranı



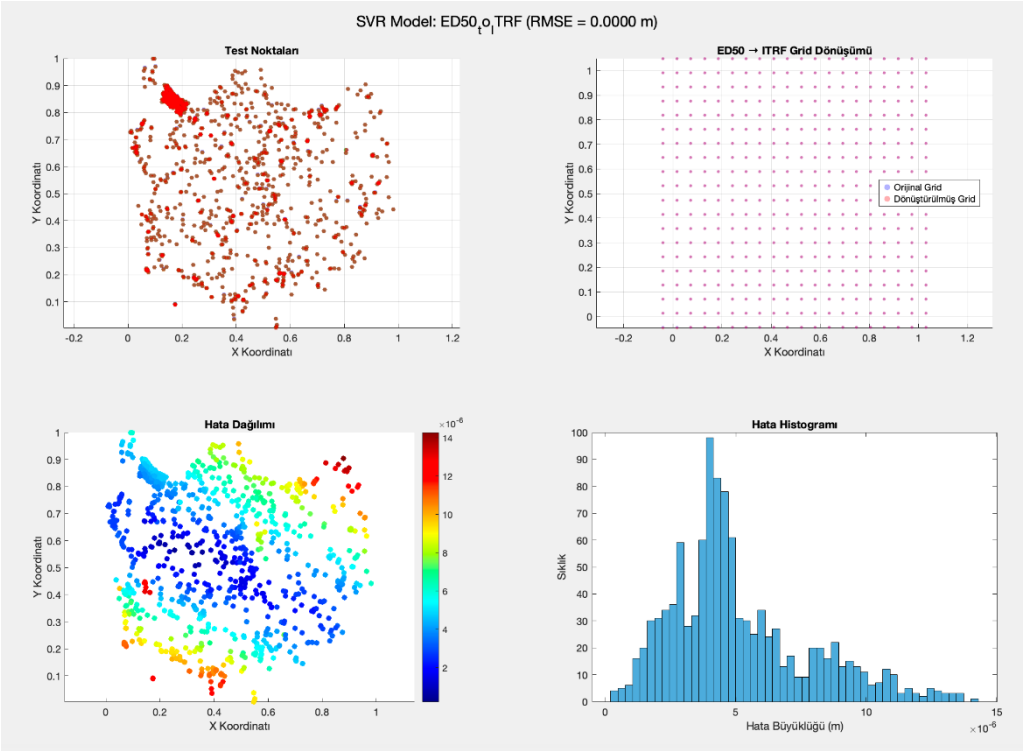
Şekil 71. GPR model eğitim sonuç ekranı



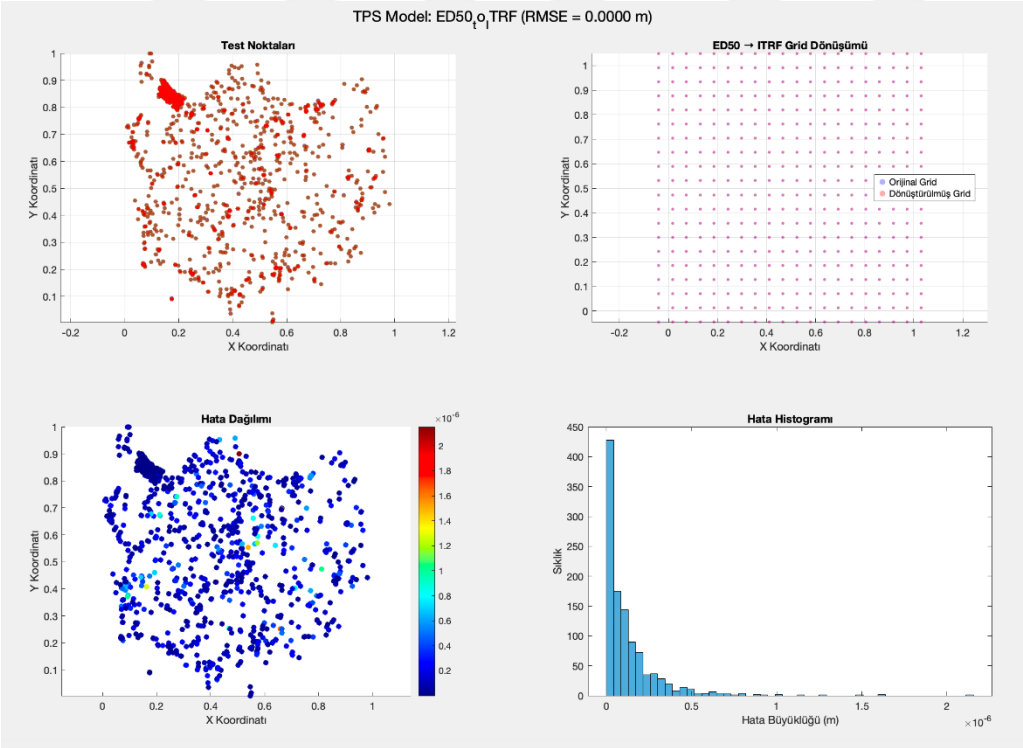
Şekil 72. Kriging model eğitim sonuç ekranı



Şekil 73. LR model eğitim sonuç ekranı



Şekil 74. SVR model eğitim sonuç ekranı



Şekil 75. TPS model eğitim sonuç ekranı

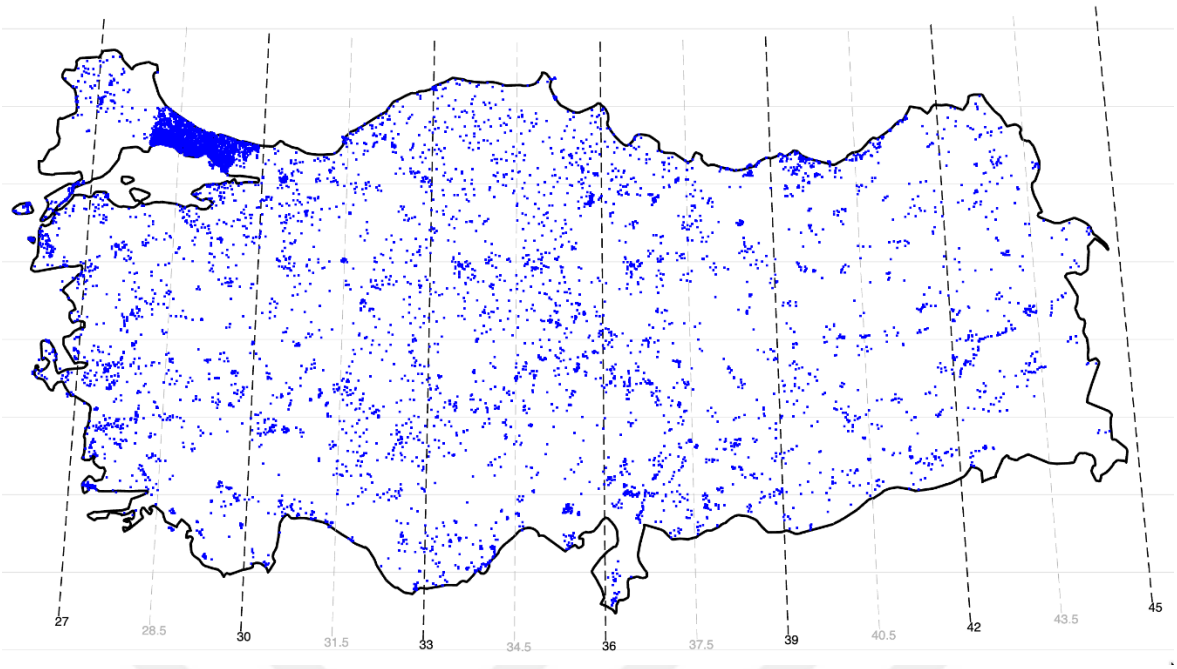
TPS, GPR ve Kriging yöntemlerinin hata histogramlarından da görülebileceği gibi en başarılı sonuçları üretmektedirler. Ek olarak hataların konumsal dağılımı gösteren haritalar incelendiğinde bazı noktaların çoğu yöntemde diğer noktalara göre hatalı sonuçlar ürettiği görülebilir. Test noktalarının dönüşümünde tüm yöntemlerin başarılı olduğu söylenebilir. Fraktal tabanlı model ile SVR modelinin, diğer yöntemlerden hatalı olabileceği eğitim sonuçlarını gösterir şekillerden anlaşılmaktadır bu nedenle bu yöntemleri doğruluğu daha detaylı testlerle incelenecektir.

2.7. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli

İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli, datum dönüşümü yapılmak istenen noktanın koordinatlarını TUM Modeli, TUTGA Modeli, CORS Modeli ve ML Modelleri ile dönüştüren en başarılı sonucu kullanıcıya sunan jeodezik olarak güvenilir dönüşümler gerçekleştiren ve bu dört modelin birlikteliğiyle oluşan modelidir.

2.7.1. TUM Modeli

TUM Modeli, çalışma kapsamında temin edilip kullanıma hazır hale getirilen 7313 adet noktayı kullanarak (Şekil 76), ONBA'lar aracılığıyla dönüşüm için gerekli parametreleri hesaplamak amacıyla istenilen sayıda ortak noktanın seçilmesini sağlar. Ardından klasik iki boyutlu koordinat dönüşüm algoritmaları uygulanır ve uyuşumsuz ölçüler, hem klasik hem de robust yöntemlerle belirlenerek işlemler tamamlanır. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılarak, karesel ortalama hata ve maksimum düzeltme kriterlerine göre en iyi sonuç kullanıcıya sunulur. Bu model, Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin ilk ve en önemli bileşenini oluşturmaktadır.



Şekil 76. TUM Modeli ortak nokta kümesi(7313 nokta)

a) TUM Modelinin İstatistiksel Analizi

TUM Modeli kullanılarak 7313 noktanın herbirisi için, DYA(4), UOBA(9), ONBA(2), NS(3-100,17 adet) 1224 adet sonuç elde edilmiştir. Toplamda 7313 noktada 8951112 adet sonuç elde edilerek belirlenen RMSE, Vmax, Vx, Vy değerleri irdelenmiştir.

b) Tanımlayıcı İstatistikler

Kategorik değişkenlerin: DYA (Tablo 10), ONBA (Tablo 11), UOBA(Tablo 12), NS(Tablo 13) herbiri için her kategorinin gözlem sayısı ve yüzdesi sunulmaktadır. RMSE, Vmax gibi hata ölçütlerinin ortalama, standart sapma, min–maks değerleri verilmektedir (Tablo 14). İncelenen veri kümesinde eksik gözlem bulunmamaktadır.

Tablo 10. DYA Sayı ve Frekans Değerleri

DYA	Sayı	Frekans
Afin	2340160	0.262
Benzerlik	2486420	0.279
Polinomsal	1901380	0.213
Projektif	2193900	0.246

Tablo 11. ONBA Sayı ve Frekans Değerleri

ONBA	Sayı	Frekans
AngleArea	4460930	0.5
Nearest	4460930	0.5

Tablo 12. UOBA Sayı ve Frekans Değerleri

UOBA	Sayı	Frekans
Andrews	892186	0.1
Danimarka	892186	0.1
Fair	892186	0.1
Hampel	892186	0.1
Huber	892186	0.1
IGG	892186	0.1
Medyan	892186	0.1
RANSAC	892186	0.1
TTest	892186	0.1

Tablo 13. NS ve Frekans Değerleri

	Sayı	Frekans
3	146260	0.016
4	292520	0.033
5	438780	0.049
6	438780	0.049
7	585040	0.066
8	585040	0.066
9	585040	0.066
10	585040	0.066
11	585040	0.066

Tablo 14. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler

	ort	std sapma	min	max
NS	20.0	23.789	3.0	100.0
RMSE	0.099	0.241	0.0	6.967
MAE	0.085	0.207	0.0	6.96
Vmax	0.196	0.529	0.0	19.352
StdDevX	0.078	0.228	0.0	7.551
StdDevY	0.06	0.107	0.0	4.092
Vx	-0.001	0.396	-226.862	254.794

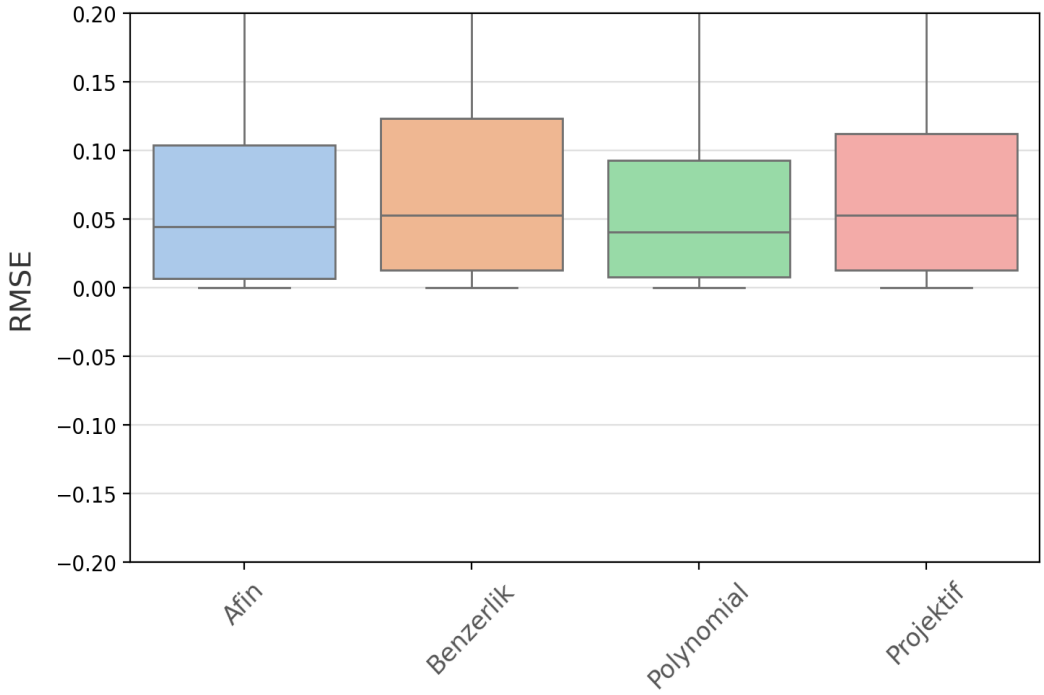
c) DYA Yönünden Analiz

Her bir değişken için DYA gruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi) ve varyans homojenliği (Levene testi) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre(Tablo 15), tüm değişkenler için p-değerleri 0.001'in altında olup DYA yönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir(Tablo 17).

Tablo 15. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri

t	Değişken	Normalite	Levene p	Homojenlik	Test	İstatistik	p-değeri
0	RMSE	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	64110.58	0.0
1	V	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	11233.965	0.0
2	Vx	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	1040.316	0.0
3	Vy	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	54278.63	0.0



Şekil 77. Dönüşüm yöntemlerinin RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği

Tablo 16. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

Grup 1	Grup 2	Ortalama Fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	Anlamlı
Afin	Benzerlik	0.018	0.0	0.018	0.019	✓
Afin	Polinomsal	-0.01	0.0	-0.011	-0.009	✓
Afin	Projektif	0.009	0.0	0.008	0.01	✓
Benzerlik	Polinomsal	-0.028	0.0	-0.029	-0.028	✓
Benzerlik	Projektif	-0.009	0.0	-0.01	-0.008	✓
Polinomsal	Projektif	0.019	0.0	0.018	0.02	✓

Tablo 17. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

Grup 1	Grup 2	p-değeri
Afin	Benzerlik	0.0
Afin	Polinomsal	0.0
Afin	Projektif	0.0
Benzerlik	Polinomsal	0.0
Benzerlik	Projektif	0.0
Polinomsal	Projektif	0.0

Testlerin(Tablo 16, Tablo 17) sonucuna göre DYA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 77), Polinomsal > Afin > Projektif > Benzerlik dönüşümü sonucuna varılır.

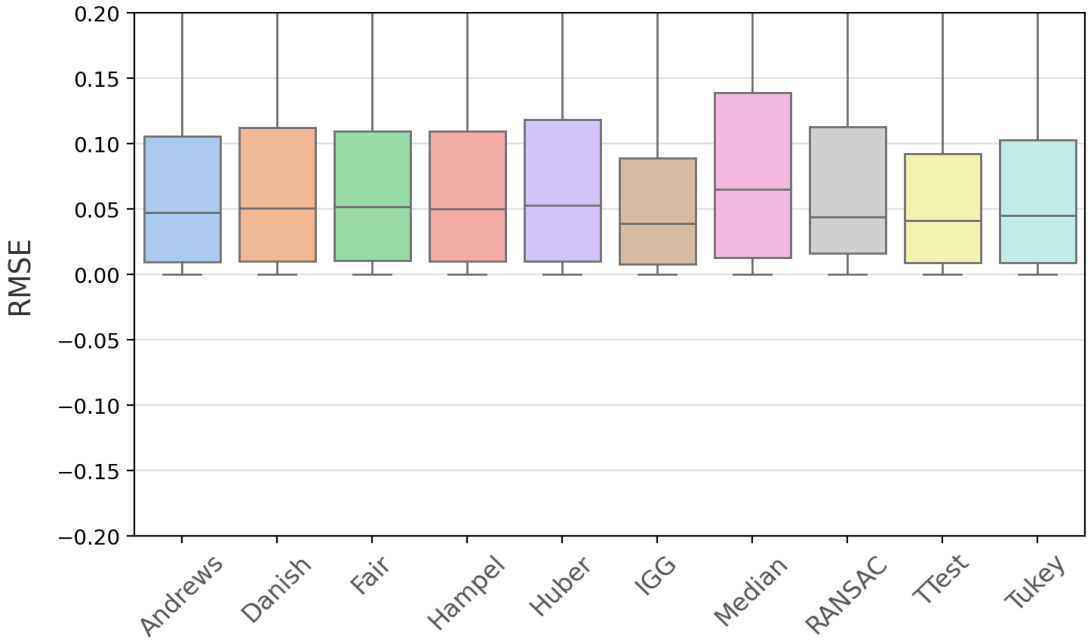
d) UOBA Yönünden Analiz

Her bir değişken için UOBAgruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi) ve varyans homojenliği (Levene testi) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, tüm değişkenler için p-değerleri 0.001'in altında olup UOBAyönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir(Tablo 18).

Tablo 18. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri

	Değişken	Normalite	Levene p	Homojenlik	Test	İstatistik	p-değeri
0	RMSE	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	61216.182	0.0
1	V	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	2705.353	0.0
2	Vx	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	162.19	0.0
3	Vy	False	0.0	False	Kruskal-Wallis	509.647	0.0



Şekil 78. Uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemlerinin RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği

Tablo 19. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

Grup 1	Grup 2	Ortalama Fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	Anlamlı
Andrews	Fair	0.002	0.0	0.001	0.004	✓
Andrews	Hampel	0.002	0.0	0.001	0.003	✓
Andrews	Huber	0.008	0.0	0.007	0.009	✓
Andrews	IGG	-0.016	0.0	-0.017	-0.015	✓
Andrews	Medyan	0.039	0.0	0.038	0.04	✓

Tablo 20. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

Grup 1	Grup 2	p-değeri
Andrews	Danimarka	0.0
Andrews	Fair	0.0
Andrews	Hampel	0.0
Andrews	Huber	0.0
Andrews	IGG	0.0

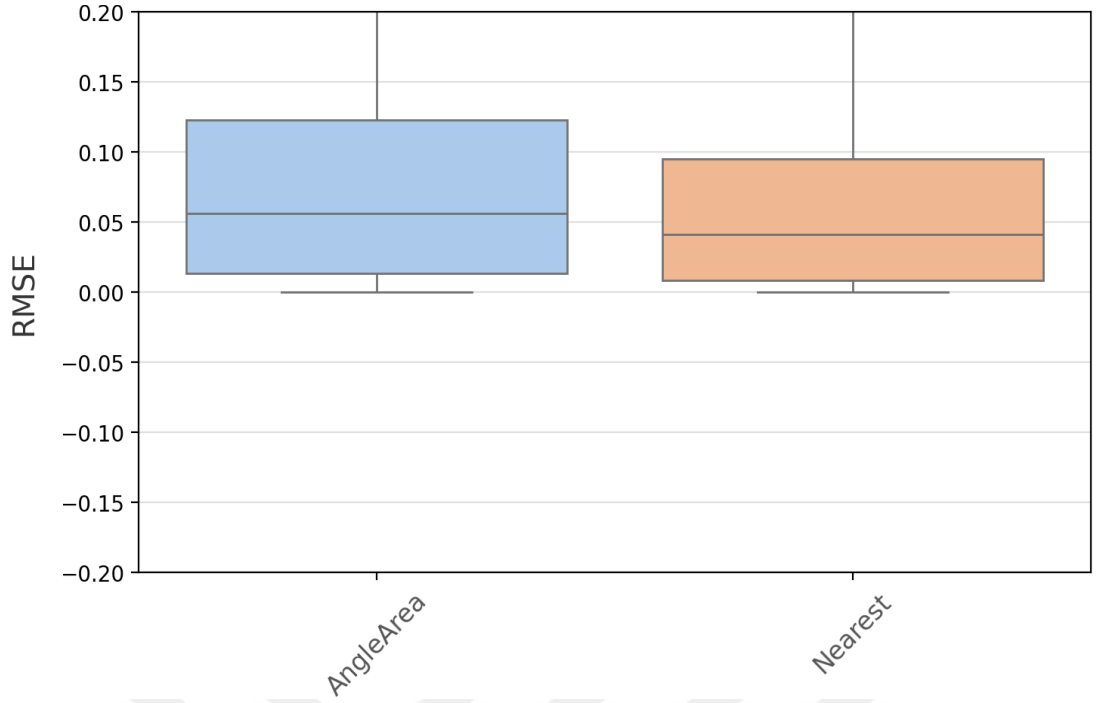
Testlerin(

Tablo 19,

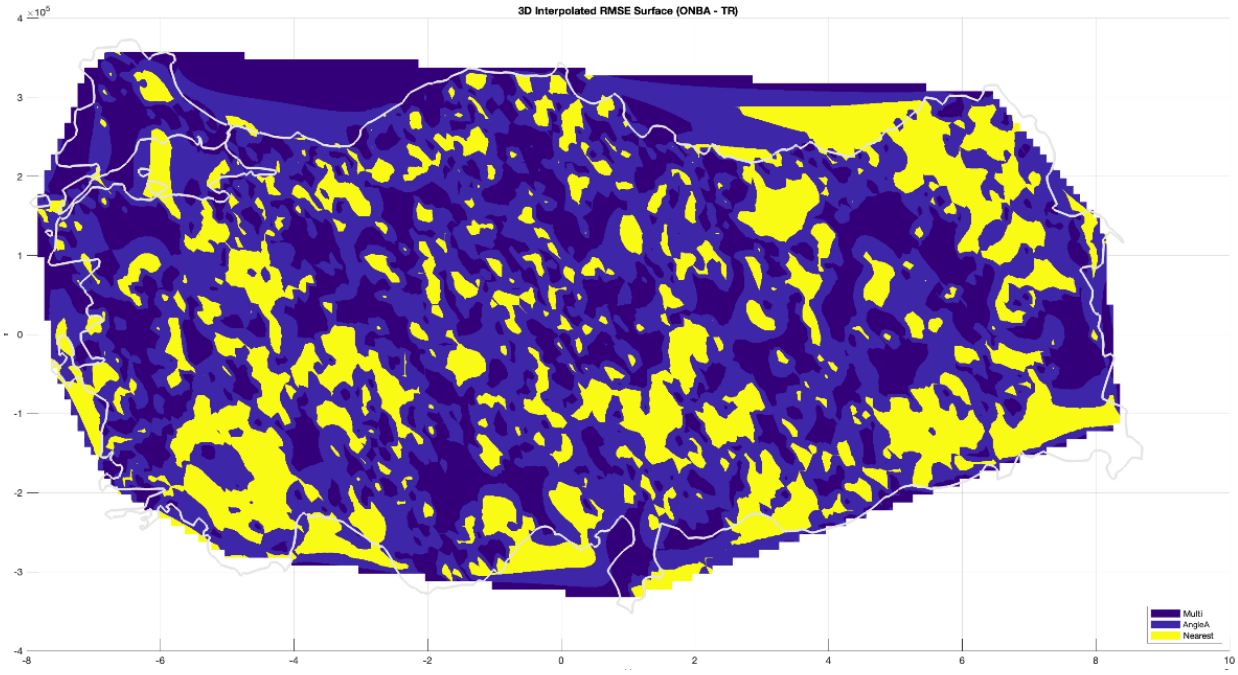
Tablo 20) sonucuna göre UOBA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 78), IGG, Tukey, t-testi ve RANSAC yöntemlerinin diğerlerinden daha iyi sonuçlar ürettiği sonucuna varılır().

e) ONBA Yönünden Analiz

ONBA yönünden yapılan analizlerde, açı alan algoritmasının ülke sınırlarında algoritma gereği nokta bulamaması ve düzgün çalışmaması nedeniyle yüksek ortalama hata verdiği görülmüştür(Şekil 79).



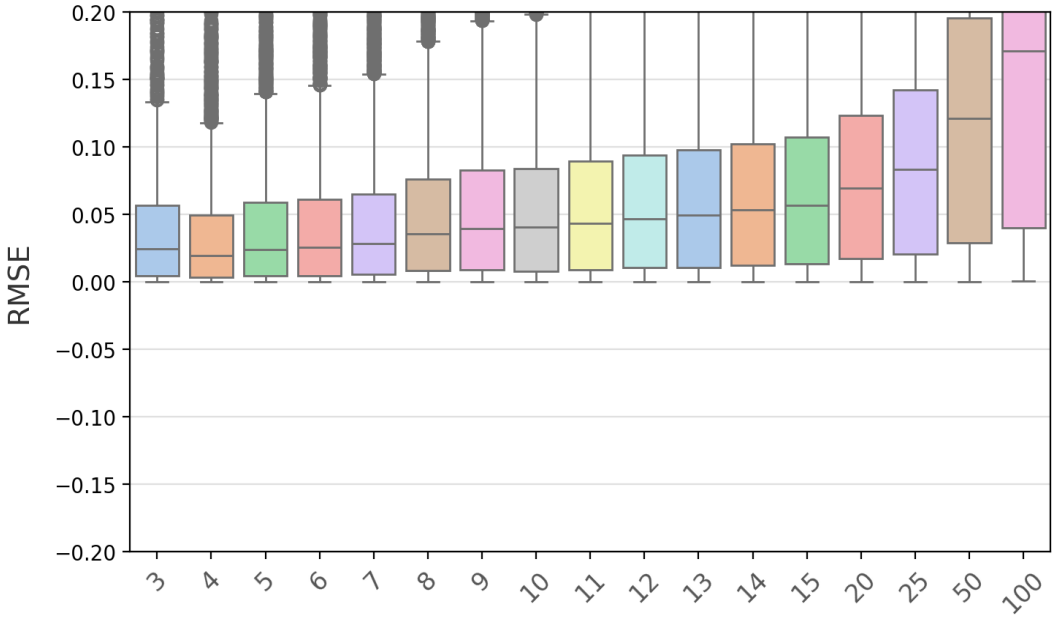
Şekil 79. ONBA'ların RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği



Şekil 80. ONBA'ların alansal başarı haritası

Haritada(Şekil 80) görüleceği üzere nokta dağılımın fazla ve homojen olduğu bölgelerde açı-alan algoritması, en yakın nokta algoritmasından başarılı sonuçlar üretmektedir.

f) Ortak Nokta Sayısı Yönünden Analiz



Şekil 81. NS'ye bağlı RMSE değerlerini gösterir kutu grafiği

Nokta sayısının artması durumunda RMSE değerlerinin arttığı Şekil 81 ile gösterilmektedir. Bu inceleme yöntemlerin minimum ihtiyaç duydukları nokta sayılarının kullanılmasının başarıyı artıracağını göstermektedir.

g) Çok Faktörlü ANOVA Testleri

Tablo 21. RMSE değerleri üzerindeki etkileri gösteren çok faktörlü ANOVA testi

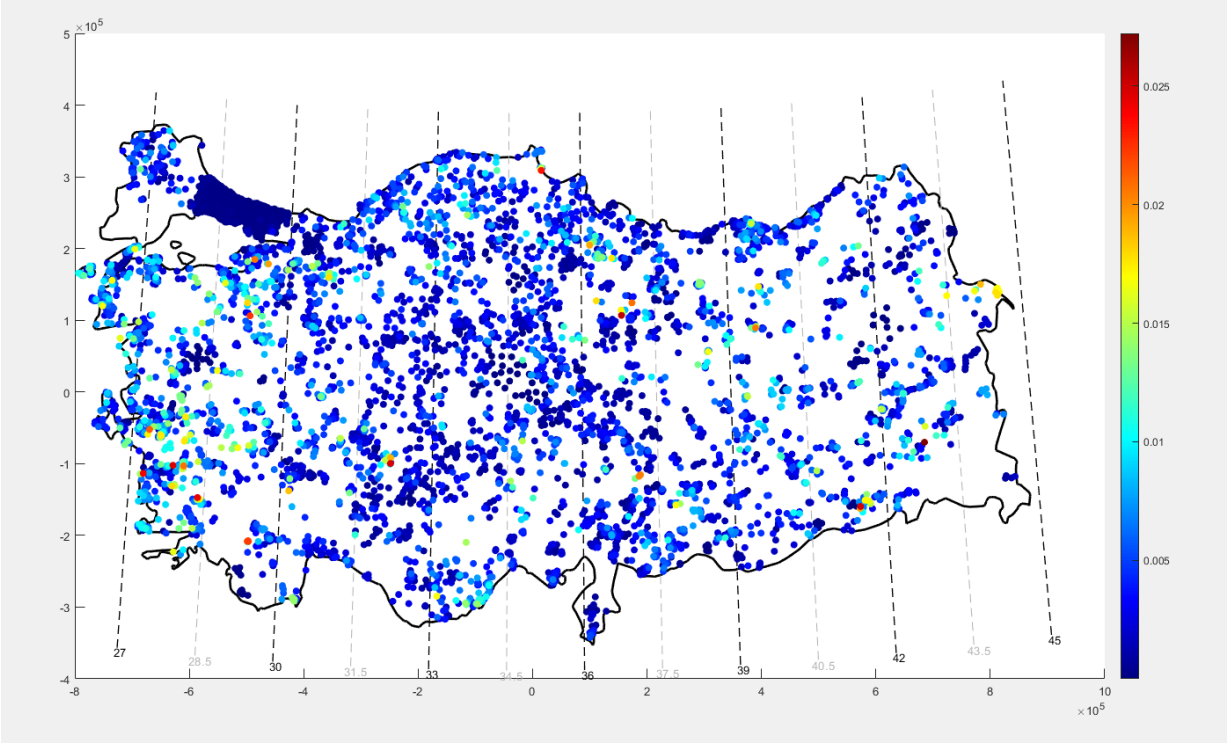
Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	F-İstatistiği	p-değeri	Anlamlılık
DYA	17.387	3	100.296	0.000	***
ONBA	29.747	1	514.796	0.000	***
UOBA	53.176	9	102.249	0.000	***
DYA × ONBA	2.502	3	14.433	0.000	***
DYA × UOBA	9.396	27	6.023	0.000	***
ONBA × UOBA	2.667	9	5.129	0.000	***
DYA × ONBA × UOBA	2.124	27	1.362	0.100	-
Residual	8663.092	149920	-	-	-

DYA, ONBA ve UOBA yöntemlerinin hata metrikleri üzerindeki bireysel ve etkileşimli etkilerini değerlendirmek amacıyla üç faktörlü ANOVA testi uygulanmıştır

(Tablo 21). Analiz sonuçlarına göre, RMSE metriği üzerinde üç ana faktörün tamamı anlamlı etki göstermektedir ($p < 0.001$) ve tüm ikili etkileşimler de istatistiksel olarak anlamlıdır.

h) Konumsal Analiz

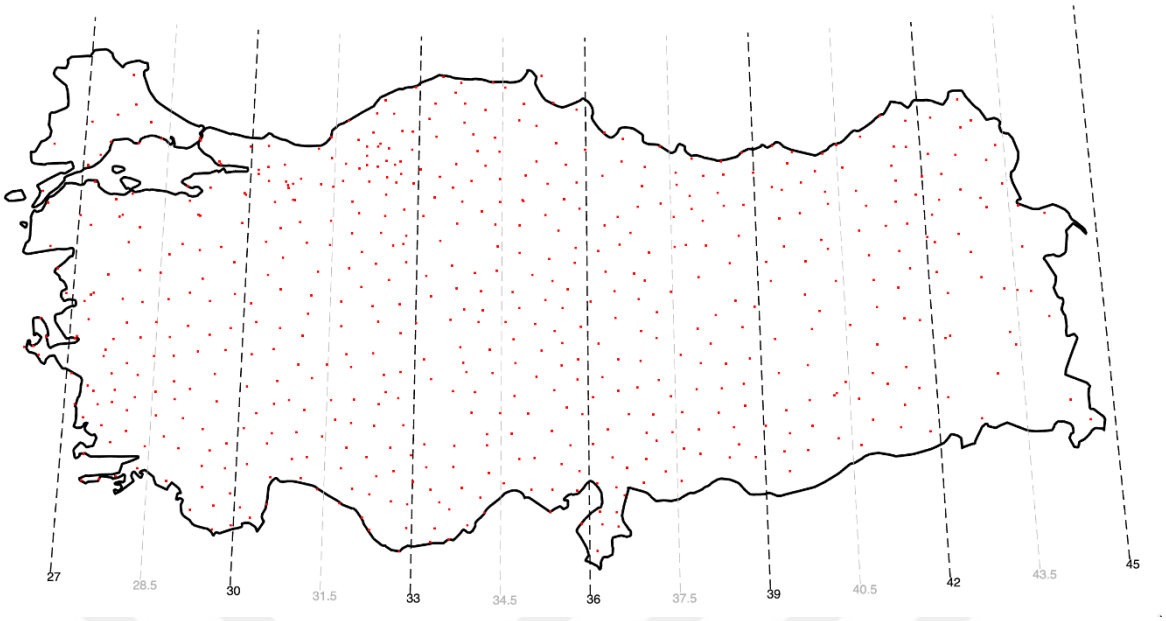
Geliştirilen algoritmalar ve kullanılan ortak noktalar ile yapılan işlem sonuçlarının ülke genelinde arzulanan duyarlıkta olduğu belirlenmiştir(Şekil 82).



Şekil 82. TUM Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri

2.7.2. TUTGA Modeli

TUTGA Modeli, çalışma kapsamında ED50 koordinatları hesaplanarak kullanıma hazır hale getirilen 611 adet TUTGA(Şekil 83) noktasını ortak nokta kümesi olarak kullanır. ONBA'lar aracılığıyla dönüşüm için gerekli parametreleri hesaplamak amacıyla minimum sayıda ortak nokta belirlenir. Ardından klasik iki boyutlu koordinat dönüşüm algoritmaları uygulanır ve uyuşumsuz ölçüler, hem klasik hem de robust yöntemlerle tespit edilerek işlemler tamamlanır. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılarak, karesel ortalama hata ve maksimum düzeltme kriterlerine göre en iyi sonuç kullanıcıya sunulur. Bu model, Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin bileşenlerinden birini oluşturmaktadır.



Şekil 83. TUTGA Modeli ortak nokta kümesi(611 nokta)

a) TUTGA Modelinin İstatistiksel Analizi

Türkiye'nin tamamında datum dönüşüm işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi adına hazırlanmış olan ortak nokta küme verisi 7313 adet nokta içermektedir. Üretilen tüm ortak nokta belirleme algoritmaları, dönüşüm yöntemi algoritmaları, uyuşumsuz ölçü belirleme algoritmalarının hem başarısını test etmek hem de ortak nokta kümesine alternatif üretilip üretilemeyeceğinin test edilmesi amacıyla TUTGA noktalarının kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak TUTGA noktalarının ITRF96 datumundaki koordinatları bilinse de ED50 datumundaki koordinatları bilinmemektedir. Bu nedenle öncelikle TUTGA noktalarının ED50 koordinatları 7313 adet nokta kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda bölgesel olarak en düşük RMSE, Vy ve Vx değerlerini veren yöntem baz alınmıştır.

b) Tanımlayıcı İstatistikler

Kategorik değişkenlerin: UOBA(Tablo 22), DYA(Tablo 24) herbiri için her kategorinin gözlem sayısı ve yüzdesi sunulmaktadır. RMSE, Vmax gibi hata ölçütlerinin ortalama, standart sapma, min–maks değerleri verilmektedir (Tablo 23). İncelenen veri kümesinde eksik gözlem bulunmamaktadır.

Tablo 22. UOBA'ların Sayı ve Frekans Değerleri

UOBA	Sayı	Frekans (%)
RANSAC	15886	10.0
Medyan	15886	10.0
Danimarka	15886	10.0
TTest	15886	10.0
IGG	15886	10.0
Andrews	15886	10.0
Huber	15886	10.0
Tukey	15886	10.0
Fair	15886	10.0

Tablo 23. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler

Değişken	Mean	Std	Min	Max
NS	5.538	1.278	3.0	7.0
RMSE	0.112	0.263	0.0	6.732
MAE	0.1	0.239	0.0	6.573
Vmax	0.168	0.397	0.0	10.102
StdDevX	0.092	0.255	0.0	7.215
StdDevY	0.074	0.150	0.0	3.604
Vx	0.001	5.379	-1025.398	240.872

Tablo 24. DYA'ların Sayı ve Frekans Değerleri

DYA	Sayı	Frekans (%)
Benzerlik	61100	38.462
Afin	48880	30.769
Projektif	36660	23.077
Polinomsal	12220	7.692

c) DYA Yönünden Analiz

Her bir değişken için DYA gruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi,

Tablo 25) ve varyans homojenliği (Levene testi, Tablo 26) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Tablo 25. RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Shapiro-Wilk testi

Değişken	DYA Grubu	p-değeri
RMSE	Tüm gruplar	0.000
Vy	Tüm gruplar	0.000
Vx	Tüm gruplar	0.000

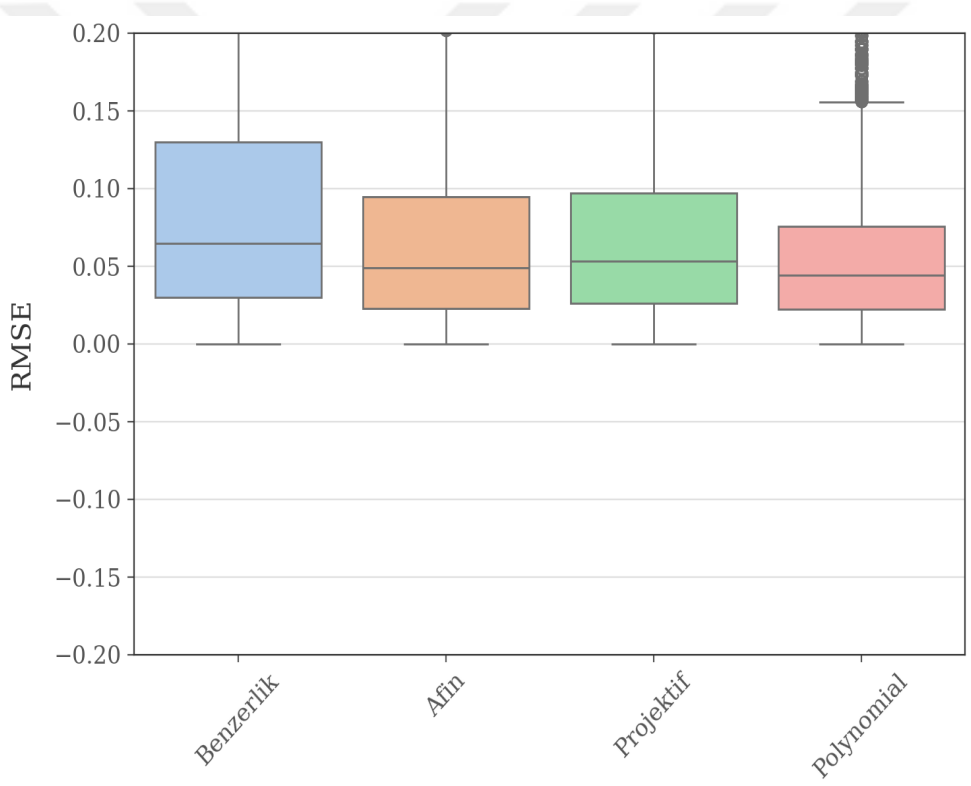
Tablo 26. RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Levene testi testi

Değişken	p-değeri
RMSE	0.000
V	0.000
Vx	0.000
Vy	0.000

Tablo 27 RMSE, Vy, Vx ve V değerleri için Kruskal-Wallis testi

Değişken	H İstatistiği	p-değeri	Yorum
RMSE	2555.149	0.000	Anlamlı fark var
V	1253.846	0.000	Anlamlı fark var
Vx	5.346	0.148	Anlamlı fark yok
Vy	62.143	0.000	Anlamlı fark var

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır(Tablo 27). Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, RMSE, Vx ve Vy değişkenleri için p-değerleri 0.001'in altında olup DYA yönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir.



Şekil 84. DYA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği

Tablo 28. RMSE değerleri için Tukey HSD testinin sonuçları

Grup 1	Grup 2	Fark	p-değeri	Anlamlı mı
Afin	Benzerlik	0.039	0.000	Evet
Afin	Polinomsal	-0.027	0.000	Evet
Afin	Projektif	0.002	0.789	Hayır
Benzerlik	Polinomsal	-0.066	0.000	Evet
Benzerlik	Projektif	-0.038	0.000	Evet

Polinomsal	Projektif	0.028	0.000	Evet

Tablo 29. RMSE değerleri için Dunn-Bonferroni testinin sonuçları

	Afin	Benzerlik	Polinomsal	Projektif
Afin	1.0	0.000	0.000	0.000
Benzerlik		1.0	0.000	0.000
Polinomsal			1.0	0.000
Projektif				1.0

Testlerin(Tablo 28, Tablo 29) sonucuna göre DYA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 84), Polinomsal > Afin > Projektif > Benzerlik dönüşümü sonucuna varılır.

d) UOBA Yönünden Analiz

Her bir değişken için UOBA gruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi, Tablo 30) ve varyans homojenliği (Levene testi, Tablo 31) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Tablo 30. Shapiro-Wilk testine ait sonuçlar

#	Vari.	UOBA	ShW	p
0	RMSE	Andrews	0.311	0.000
1	RMSE	Danimarka	0.330	0.000
2	RMSE	Fair	0.325	0.000
3	RMSE	Hampel	0.308	0.000
4	RMSE	Huber	0.327	0.000
5	RMSE	IGG	0.313	0.000
6	RMSE	Medyan	0.346	0.000
7	RMSE	RANSAC	0.295	0.000
8	RMSE	TTest	0.297	0.000

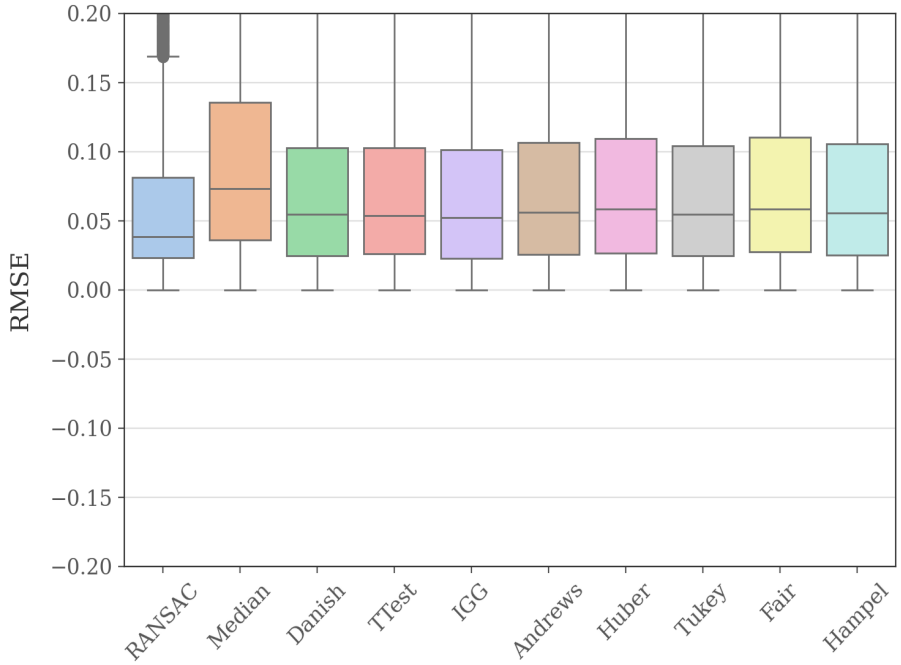
Tablo 31. Levene testine ait sonuçlar

#	Vari.	Lev	p
0	RMSE	18.233	0.000
1	V	0.347	0.959
2	Vx	0.370	0.950
3	Vy	0.295	0.976

Tablo 32. Kruskal-Wallis testine ait sonuçlar

#	Vari.	H	p	Res.
0	RMSE	1916.029	0.000	Var
1	V	27.693	0.001	Var
2	Vx	1.788	0.994	Yok
3	Vy	3.712	0.929	Yok

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, tüm değişkenler için p-değerleri 0.001'in altında olup UOBAyönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir(Tablo 32).



Şekil 85. UOBA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği

Tablo 33 RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

Grup 1	Grup 2	Fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	Anlamlı?
Andrews	Medyan	0.034	0.000	0.024	0.043	Evet
Danimarka	Medyan	0.034	0.000	0.025	0.043	Evet
Fair	Medyan	0.032	0.000	0.022	0.042	Evet
IGG	Medyan	0.028	0.000	0.019	0.038	Evet
RANSAC	Medyan	0.025	0.000	0.016	0.035	Evet
Huber	Medyan	0.024	0.000	0.014	0.033	Evet
…	…	…	…	…	…	—

Tablo 34 RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

	Andrews	Danimarka	Fair	Hampel	Huber	IGG	Medyan	RANSAC	TTest
Andrews	1.000	0.432	0.005	1.000	0.517	0.000	0.000	0.000	1.000
Danimarka		1.000	0.000	1.000	0.000	0.064	0.000	0.000	1.000
Fair			1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hampel				1.000	0.030	0.000	0.000	0.000	1.000
Huber					1.000	0.000	0.000	0.000	0.001
IGG						1.000	0.000	0.000	0.002
Medyan							1.000	0.000	0.000
RANSAC								1.000	0.000
TTest									1.000

Testlerin(Tablo 33, Tablo 34) sonucuna göre UOBA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 85), IGG, Tukey, t-testi, Danimarka ve RANSAC yöntemlerinin diğerlerinden daha iyi sonuçlar ürettiği sonucuna varılır.

e) ONBA Yönünden Analiz

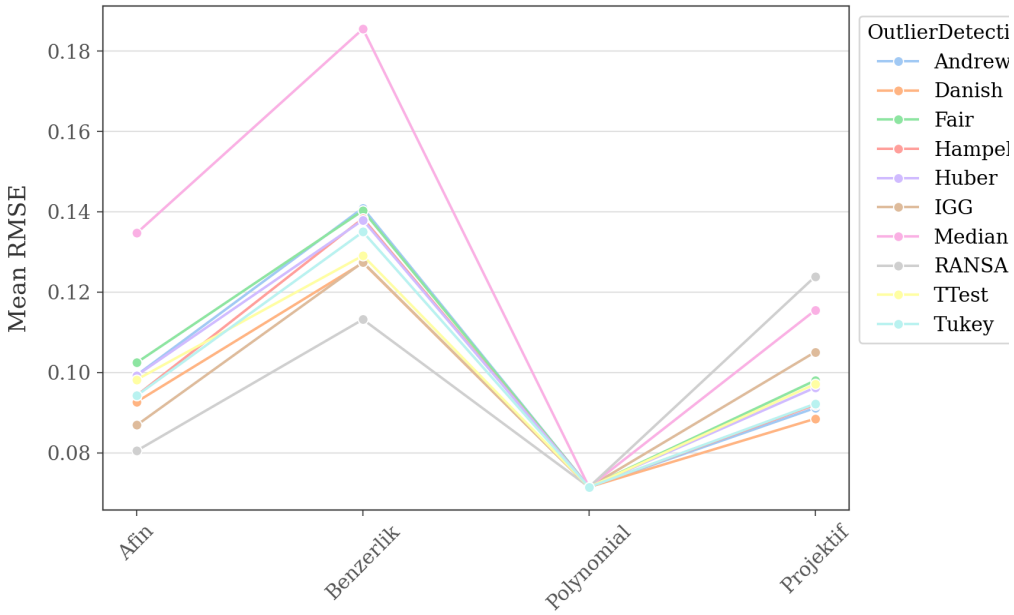
TUTGA Modelinde, TUTGA noktaları kullanıldığından yöntemler için gerekli olan nokta sayısı şartı aranmıştır ve bu nedenle açı alan algoritması kullanılmamıştır. Benzerlik için en yakın 3, afin için en yakın 4, projektif için en yakın 5 ve polinomsal dönüşüm için en yakın 7 nokta kullanılmıştır. ONBA yönünden bir irdeleme yapılmamıştır.

f) Ortak Nokta Sayısı Yönünden Analiz

TUTGA Modelinde, TUTGA noktaları kullanıldığından yöntemler için gerekli olan nokta sayısı şartı aranmıştır ve bu nedenle açı alan algoritması kullanılmamıştır. Benzerlik için en yakın 3, afin için en yakın 4, projektif için en yakın 5 ve polinomsal dönüşüm için en yakın 7 nokta kullanılmıştır. NS yönünden bir irdeleme yapılmamıştır.

g) İkili Faktör Analizi

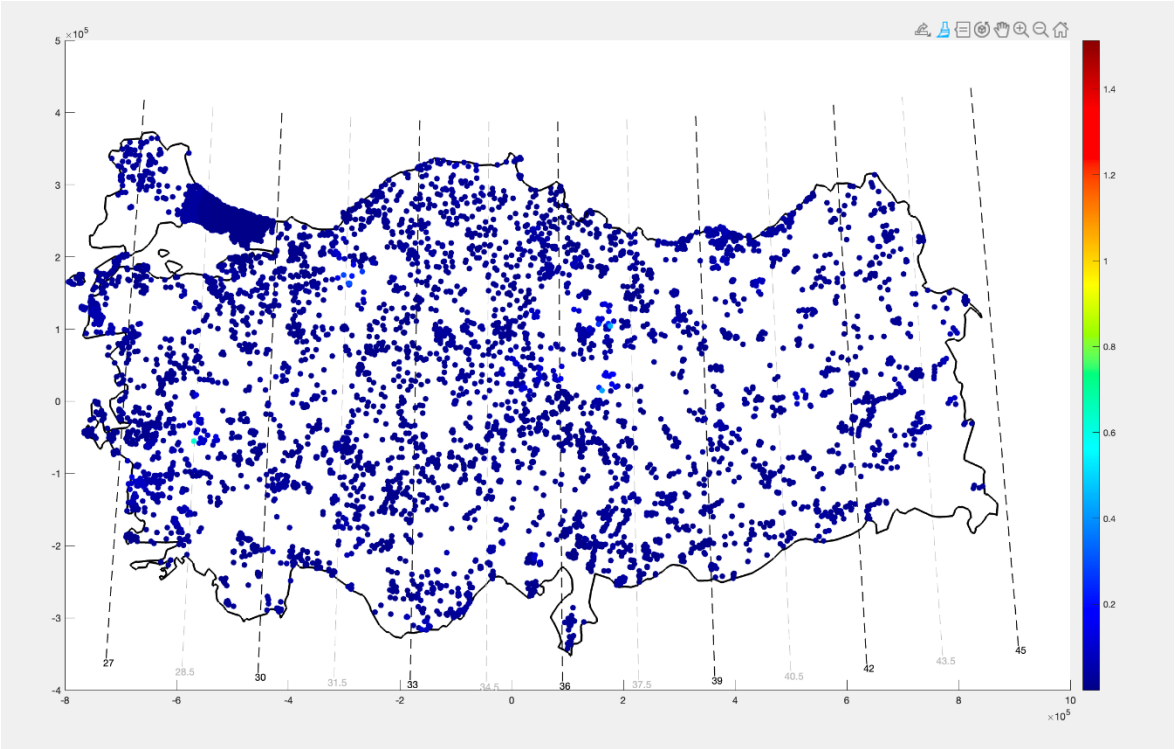
UOBA ile DYA birlikte değerlendildiğinde, en iyi DYA olan polinomsal dönüşüm için UOBA'lar arasında fark bulunmadığı, ancak diğer yöntemler için RANSAC, Danimarka, IGG yöntemlerinin iyi olduğu söylenebilir(Şekil 86).



Şekil 86. DYA-UOBA RMSE metriği için kutu grafiği

h) Konumsal Analiz

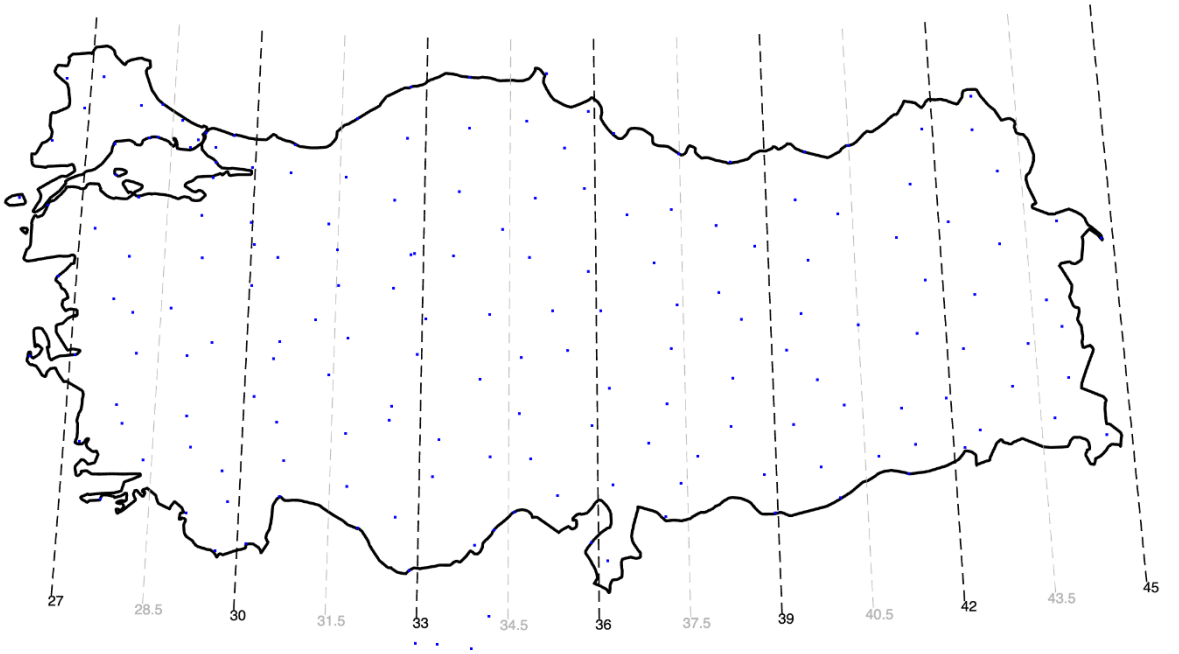
%85 ‘lik bir başarı oranı ile TUTGA Modeli kullanılarak 7313 adet ortak nokta 9 cm karesel ortalama hata değerinin altında dönüştürülmüştür. (Şekil 87).



Şekil 87. TUTGA Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri

2.7.3. CORS Modeli

CORS Modeli, çalışma kapsamında ED50 koordinatları hesaplanarak kullanıma hazır hale getirilen 181 adet CORS noktasını(Şekil 88) ortak nokta kümesi olarak kullanır. ONBA’lar aracılığıyla dönüşüm için gerekli parametreleri hesaplamak amacıyla minimum sayıda ortak nokta belirlenir. Ardından klasik iki boyutlu koordinat dönüşüm algoritmaları uygulanır ve uyuşumsuz ölçüler, hem klasik hem de robust yöntemlerle tespit edilerek işlemler tamamlanır. Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılarak, karesel ortalama hata ve maksimum düzeltme kriterlerine göre en iyi sonuç kullanıcıya sunulur. Bu model, Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli’nin bileşenlerinden birini oluşturmaktadır.



Şekil 88. CORS Modeli ortak nokta kümesi(181 nokta)

a) CORS Modelinin İstatistiksel Analizi

Türkiye'nin tamamında datum dönüşüm işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi adına hazırlanmış olan ortak nokta küme verisi 7313 adet nokta içermektedir. Üretilen tüm ortak nokta belirleme algoritmaları, dönüşüm yöntemi algoritmaları, uyuşumsuz ölçü belirleme algoritmalarının hem başarısını test etmek hem de ortak nokta kümesine alternatif üretilip üretilemeyeceğinin test edilmesi amacıyla CORS noktalarının kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak CORS noktalarının ITRF96 datumundaki koordinatları bilinse de ED50 datumundaki koordinatları bilinmemektedir. Bu nedenle öncelikle CORS noktalarının ED50 koordinatları 7313 adet nokta kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda bölgesel olarak en düşük RMSE, Vy ve Vx değerlerini veren yöntem baz alınmıştır.

b) Tanımlayıcı İstatistikler

Kategorik değişkenlerin: DYA (Tablo 35), UOBA(Tablo 36) herbiri için her kategorinin gözlem sayısı ve yüzdesi sunulmaktadır. RMSE, Vmax gibi hata ölçütlerinin ortalama, standart sapma, min–maks değerleri verilmektedir (Tablo 37). İncelenen veri kümesinde eksik gözlem bulunmamaktadır.

Tablo 35. DYA'ların Sayı ve Frekans Değerleri

	Sayı	Frekans
Benzerlik	18100	0.385
Afin	14480	0.308
Projektif	10860	0.231
Polinomsal	3620	0.077

Tablo 36. UOBA'ların Sayı ve Frekans Değerleri

	Sayı	Frekans
RANSAC	4706	0.1
Medyan	4706	0.1
Danimarka	4706	0.1
TTest	4706	0.1
IGG	4706	0.1
Andrews	4706	0.1
Huber	4706	0.1
Tukey	4706	0.1
Fair	4706	0.1

Tablo 37. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler

Değişken	Mean	Std	Min	Max
NS	5.538	1.278	3.0	7.0
RMSE	0.112	0.263	0.0	6.732
MAE	0.1	0.239	0.0	6.573
Vmax	0.168	0.397	0.0	10.102
StdDevX	0.092	0.255	0.0	7.215
StdDevY	0.074	0.150	0.0	3.604
Vx	0.001	5.379	-1025.398	240.872

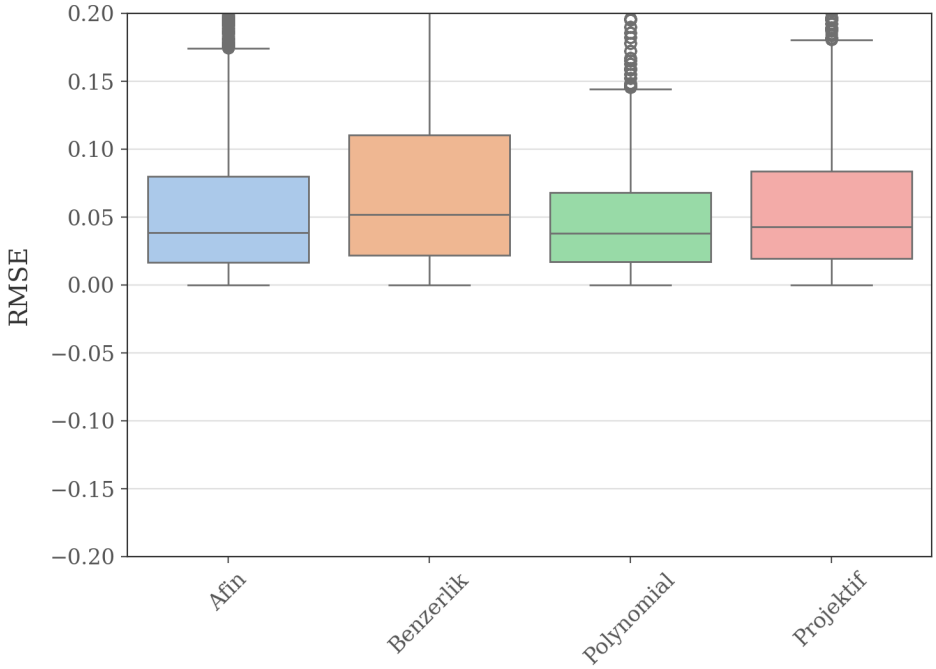
c) DYA Yönünden Analiz

Her bir değişken için DYA gruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi) ve varyans homojenliği (Levene testi) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Tablo 38. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri

	Değişken	Normalite	Homojenlik	Test	İstatistik	p-değeri
0	RMSE	False	False	Kruskal	574.49	0.0
1	V	False	False	Kruskal	236.033	0.0
2	Vx	False	False	Kruskal	12.525	0.006
3	Vy	False	False	Kruskal	31.398	0.0

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, RMSE, V ve Vy değişkenleri için p-değerleri 0.001'in altında olup DYA yönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir(Tablo 38).



Şekil 89. DYA RMSE metrik değerleri için kutu grafiği

Tablo 39. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

grup1	grup2	ort.fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	reject
Afin	Benzerlik	0.029	0.000	0.023	0.035	True
Afin	Polinomsal	-0.017	0.000	-0.027	-0.007	True
Afin	Projektif	0.003	0.711	-0.004	0.010	False
Benzerlik	Polinomsal	-0.046	0.000	-0.056	-0.036	True
Benzerlik	Projektif	-0.026	0.000	-0.032	-0.019	True
Polinomsal	Projektif	0.020	0.000	0.009	0.030	True

Tablo 40. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

	Benzerlik	Afin	Projektif	Polinomsal
Benzerlik	1.000	0.000	0.000	0.000
Afin	0.000	1.000	0.000	0.867
Projektif	0.000	0.000	1.000	0.000
Polinomsal	0.000	0.867	0.000	1.000

Testlerin(Tablo 39,

Tablo 40) sonucuna göre DYA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 89), Polinomsal > Afin >Projektif > Benzerlik dönüşümü sonucuna varılır.

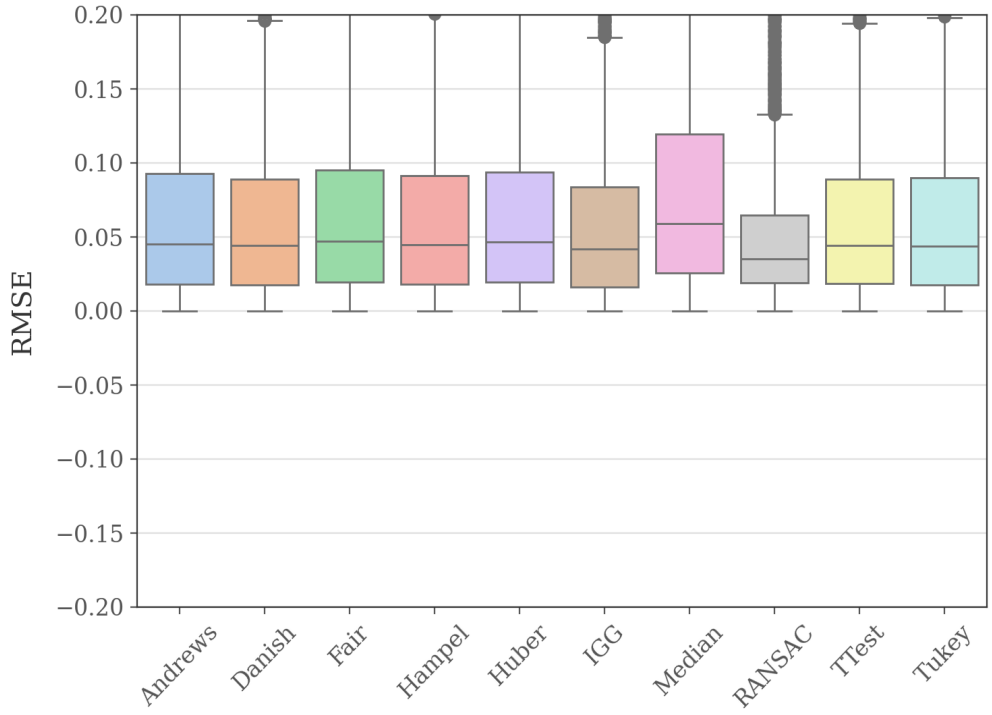
d) UOBA Yönünden Analiz

Her bir değişken için UOBAgruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi) ve varyans homojenliği (Levene testi) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Tablo 41. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri

	Değişken	Normalite	Homojenlik	Test	İstatistik	p-değeri
0	RMSE	False	False	Kruskal	400.176	0.0
1	V	False	True	Kruskal	2.216	0.988
2	Vx	False	True	Kruskal	3.082	0.961
3	Vy	False	True	Kruskal	3.612	0.935

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, tüm değişkenler için p-değerleri 0.001'in altında olup UOBAyönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir(Tablo 41).



Şekil 90. UOBA RMSE metriği için kutu grafiği

Tablo 42. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

	grup1	grup2	ort.fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	reject
0	Andrews	Danimarka	-0.005	0.975	-0.019	0.009	False
1	Andrews	Fair	0.001	1.0	-0.013	0.015	False
2	Andrews	Hampel	-0.002	1.0	-0.015	0.012	False
3	Andrews	Huber	0.001	1.0	-0.013	0.015	False
4	Andrews	IGG	-0.008	0.736	-0.022	0.006	False
5	Andrews	Medyan	0.03	0.0	0.016	0.044	True
6	Andrews	RANSAC	-0.004	0.993	-0.018	0.01	False
7	Andrews	TTest	-0.001	1.0	-0.015	0.012	False
8	Andrews	Tukey	-0.004	0.992	-0.018	0.01	False

Tablo 43. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

	Andrews	Danimarka	Fair	Hampel	Huber	IGG	Medyan	RANSAC	TTest
Andrews	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.028	0.0	0.0	1.0
Danimarka	1.0	1.0	0.153	1.0	1.0	0.674	0.0	0.0	1.0
Fair	1.0	0.153	1.0	0.926	1.0	0.0	0.0	0.0	0.615
Hampel	1.0	1.0	0.926	1.0	1.0	0.105	0.0	0.0	1.0
Huber	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0
IGG	0.028	0.674	0.0	0.105	0.0	1.0	0.0	0.002	0.171
Medyan	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
RANSAC	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.002	0.0	1.0	0.0
TTest	1.0	1.0	0.615	1.0	1.0	0.171	0.0	0.0	1.0

Testlerin(Tablo 42, Tablo 43) sonucuna göre UOBA'lar arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde(Şekil 90), IGG, Tukey, t-testi, Danimarka ve RANSAC yöntemlerinin diğerlerinden daha iyi sonuçlar ürettiği sonucuna varılır.

e) ONBA Yönünden Analiz

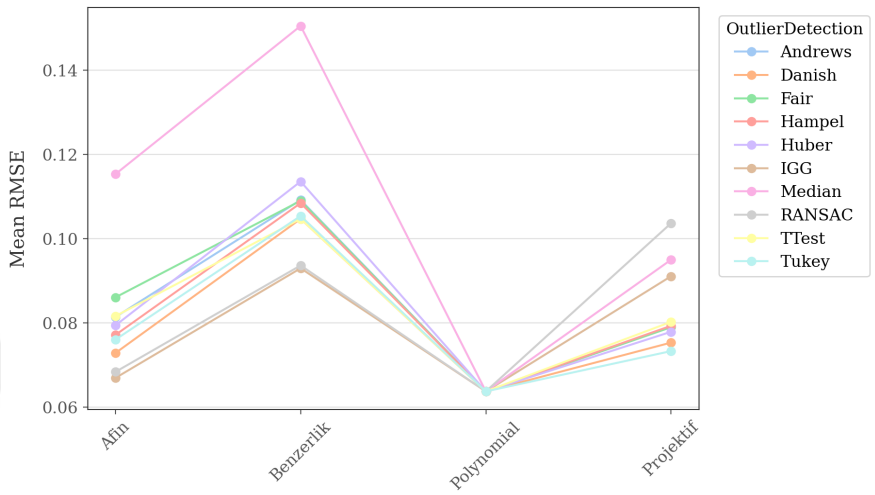
CORS Modelinde, CORS noktaları kullanıldığından yöntemler için gerekli olan nokta sayısı şartı aranmıştır ve bu nedenle açı alan algoritması kullanılmamıştır. Benzerlik için en yakın 3, afin için en yakın 4, projektif için en yakın 5 ve polinomsal dönüşüm için en yakın 7 nokta kullanılmıştır. ONBA yönünden bir irdeleme yapılmamıştır.

f) Ortak Nokta Sayısı Yönünden Analiz

CORS Modelinde, CORS noktaları kullanıldığından yöntemler için gerekli olan nokta sayısı şartı aranmıştır ve bu nedenle açı alan algoritması kullanılmamıştır. Benzerlik için en yakın 3, afin için en yakın 4, projektif için en yakın 5 ve polinomsal dönüşüm için en yakın 7 nokta kullanılmıştır. NS yönünden bir irdeleme yapılmamıştır.

g) İkili Faktör Analizi

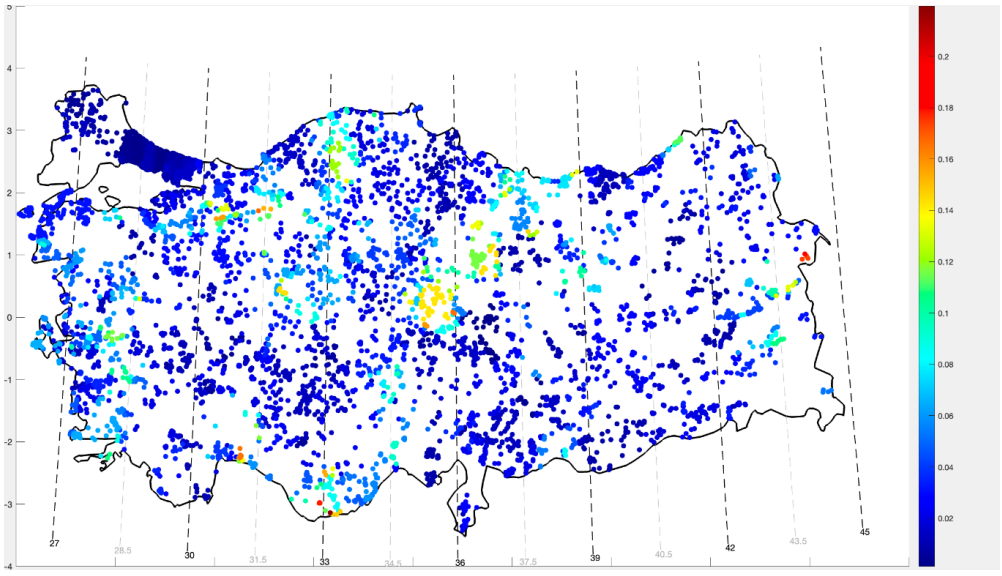
UOBA ile DYA birlikte değerlendildiğinde (Şekil 91), en iyi DYA olan polinomsal dönüşüm için UOBA'lar arasında fark bulunmadığı, ancak diğer yöntemler için RANSAC, Danimarka, IGG yöntemlerinin iyi olduğu söylenebilir.



Şekil 91. DYA-UOBA RMSE metriği için kutu grafiği

h) Konumsal Analiz

%71 'lik bir başarı oranı ile CORS Modeli kullanılarak 7313 adet ortak nokta 9 cm karesel ortalama hata değerinin altında dönüştürülmüştür. (Şekil 92).



Şekil 92. TUTGA Modeli 7313 noktada minimum RMSE değerleri

2.7.4. ML Modeli

ML Modeli, makine öğrenmesi tabanlı datum dönüşüm yaklaşımlarından oluşur. ANN, LR, SVR, GPR, TPS, Kriging, Bayesyen ve Fraktal tabanlı bu modeller, TUM Modeli'ne ait 7.313 adet ortak nokta kullanılarak eğitilmiştir. Bu sayede, ek bir ortak noktaya gerek duymaksızın Türkiye coğrafi sınırları içerisinde datum dönüşüm işlemlerini gerçekleştirebilir. Bu model, Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin bileşenlerinden birini oluşturmaktadır.

a) ML Modelinin İstatistiksel Analizi

TUM Modeline ait ortak nokta kümesi, ML Modellerinin tümü ile dönüştürülerek Vx ve Vy değerleri irdelenmiştir.

b) Tanımlayıcı İstatistikler

Kategorik değişkenlerin: ML yöntemleri için her yöntemin gözlem sayısı ve yüzdesi sunulmaktadır (Tablo 44). Vx ve Vy gibi hata ölçütlerinin ortalama, standart sapma, min–maks değerleri verilmektedir (Tablo 45). İncelenen veri kümesinde eksik gözlem bulunmamaktadır.

Tablo 44. Makine öğrenmesi yöntemlerinin frekans değerleri

	MLyontemi	Frekans
0	ANN	7313
1	BPANN	7313
2	BayesyenModel	7313
3	FraktalModel	7313
4	GPR	7313
5	Kriging	7313
6	LR	7313
7	MLR	7313
8	SVR	7313

Tablo 45. Makine öğrenmesi yöntemlerinin tanımlayıcı istatistikleri

	ort	Std Sapma	min	max
Vy	0.337	44.76	-3691.359	4332.394
Vx	-0.031	45.338	-6781.279	1202.908
V	6.843	63.343	0.0	7013.484

c) ML Yöntemi Yönünden Analiz

Her bir değişken için ML gruplarındaki örnekler üzerinde normalite (Shapiro-Wilk testi, Tablo 46) ve varyans homojenliği (Levene testi,

Tablo 47) varsayımları test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tüm değişkenlerde Shapiro-Wilk testine ait p-değerlerinin 0.05'in altında olması nedeniyle normal dağılım varsayımı sağlanmamıştır. Benzer şekilde, Levene testi sonuçları da varyans homojenliği varsayımının karşılanmadığını göstermiştir ($p \approx 0$).

Tablo 46. Vy, Vx ve V değerleri için Shapiro-Wilk testleri

	MLyontemi	SW-Vy	p	SW-Vx	p	SW-V	p
0	ANN	0.578	0.0	0.92	0.0	0.534	0.0
1	BPANN	0.586	0.0	0.918	0.0	0.535	0.0
2	BayesyenModel	0.494	0.0	0.963	0.0	0.389	0.0
3	FraktalModel	0.91	0.0	0.678	0.0	0.704	0.0
4	GPR	0.064	0.0	0.072	0.0	0.065	0.0
5	Kriging	0.067	0.0	0.058	0.0	0.064	0.0
6	LR	0.494	0.0	0.963	0.0	0.386	0.0
7	MLR	0.494	0.0	0.963	0.0	0.386	0.0
8	SVR	0.571	0.0	0.979	0.0	0.777	0.0

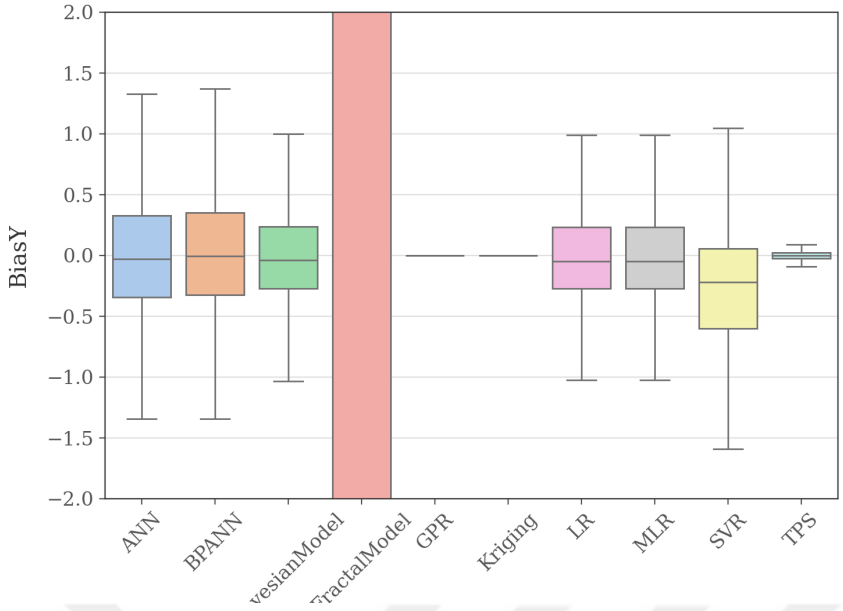
Tablo 47. Vy, Vx ve V değerleri için Levene testi

	Değişken	Levene_F	p
0	Vy	595.513	0.0
1	Vx	53.392	0.0
2	V	147.843	0.0

Bu nedenle, parametrik ANOVA testi yerine, varsayımlardan bağımsız olan non-parametrik Kruskal-Wallis testi uygulanmıştır. Kruskal-Wallis testi sonuçlarına göre, RMSE, V ve Vy değişkenleri için p-değerleri 0.001'in altında olup ML yönteminin bu değişkenler üzerinde anlamlı farklılıklar yarattığı belirlenmiştir (Tablo 48).

Tablo 48. Vy, Vx ve V değerleri için Kruskal-Wallis testi

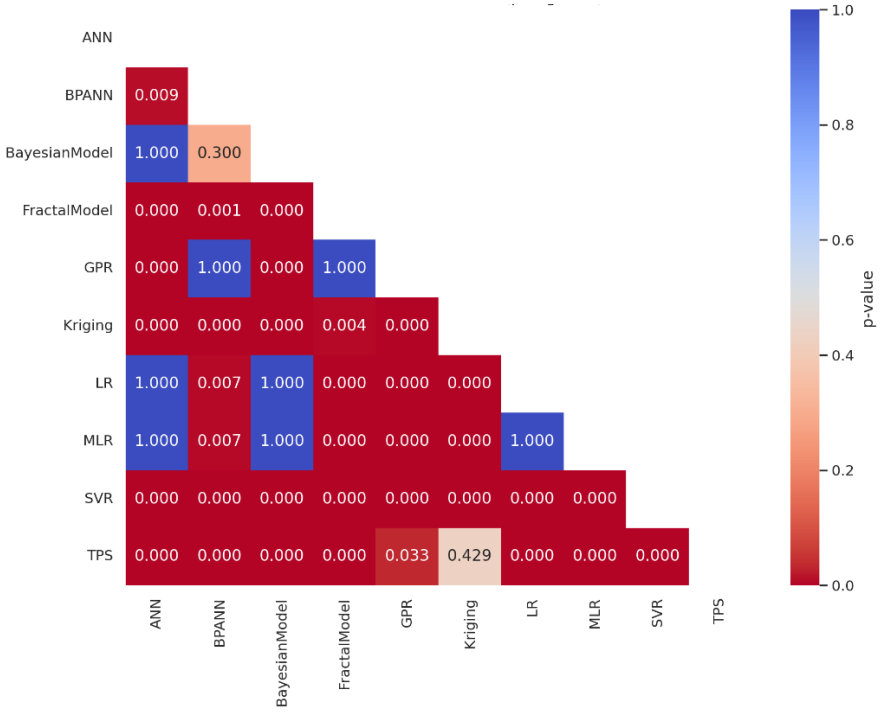
	Değişken	Kruskal_H	p
0	Vy	1818.075	0.0
1	Vx	4269.873	0.0
2	V	43195.233	0.0



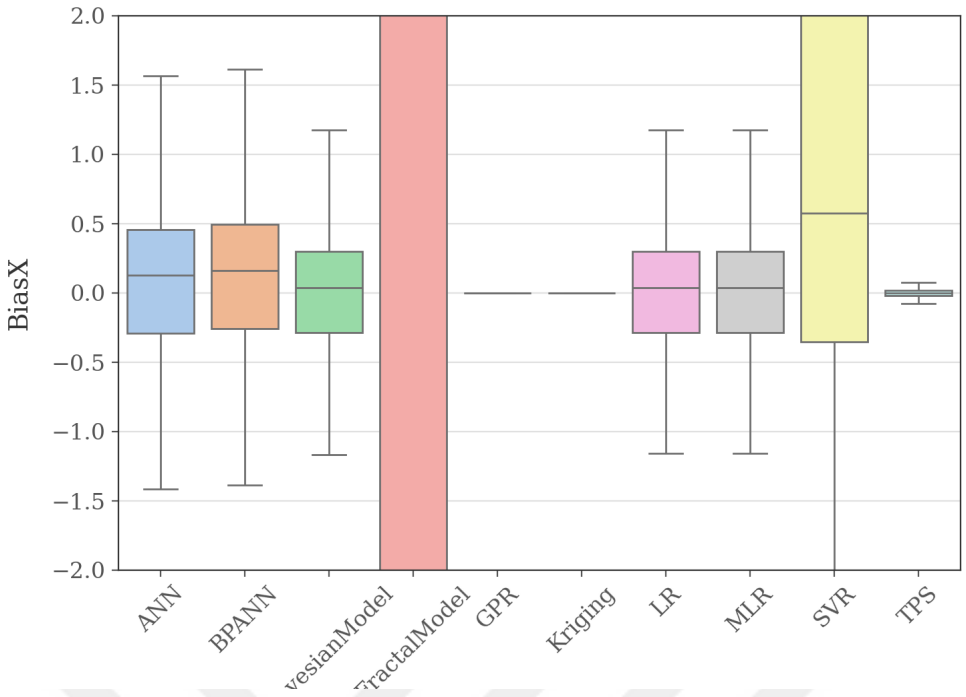
Şekil 93. ML yöntemlerinin Vy değerlerini gösterir kutu grafiği

Tablo 49. Vy değerleri için Tukey HSD testinin anlamlı sonuçları

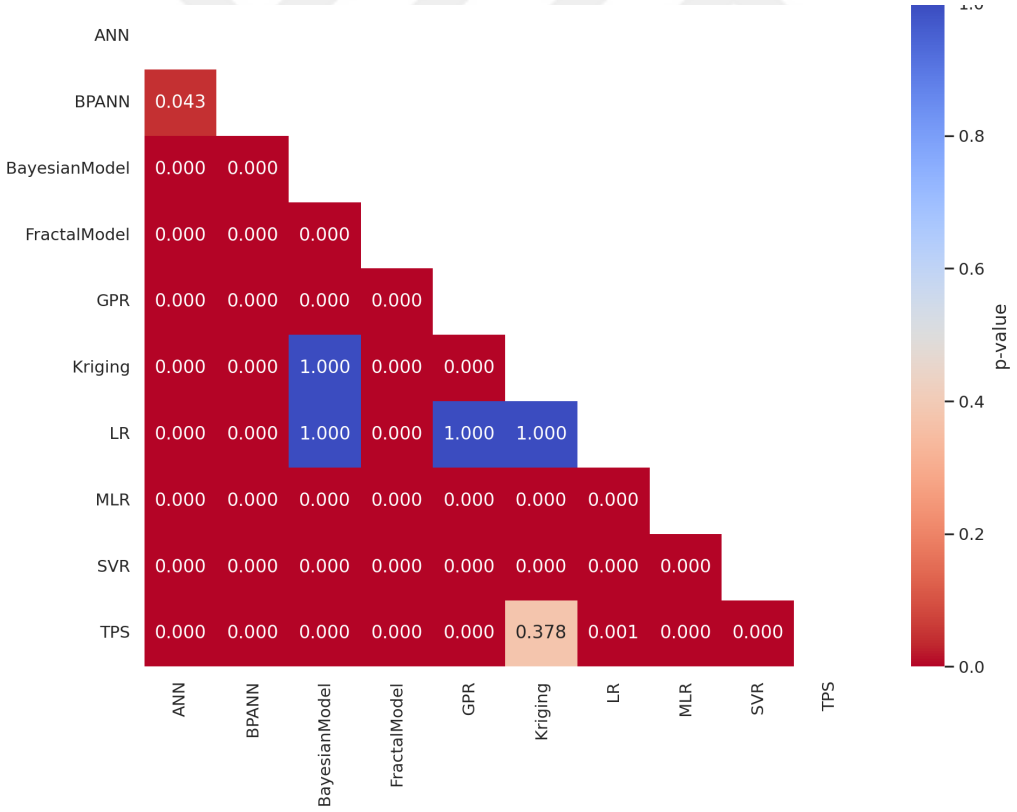
grup1	grup2	ort.fark	p-adj
FraktalModel	GPR	2.935	0.003
FraktalModel	Kriging	2.934	0.003
GPR	SVR	-2.353	0.048
Kriging	SVR	-2.352	0.048



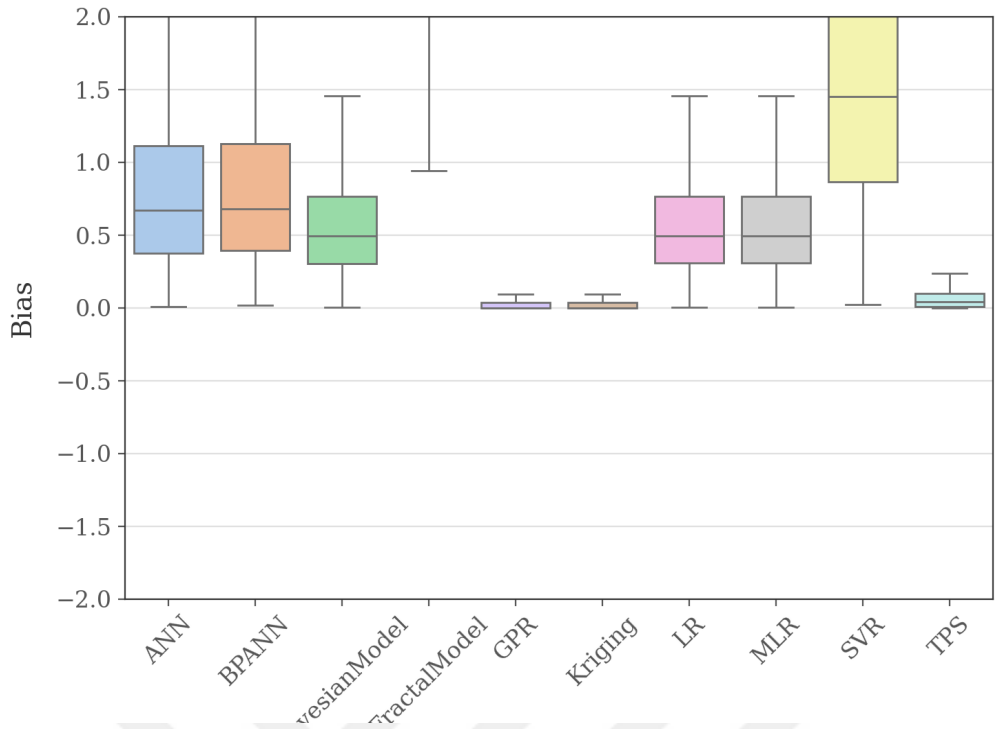
Şekil 94. Vy değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları



Şekil 95. ML yöntemlerinin Vx değerlerini gösterir kutu grafiği



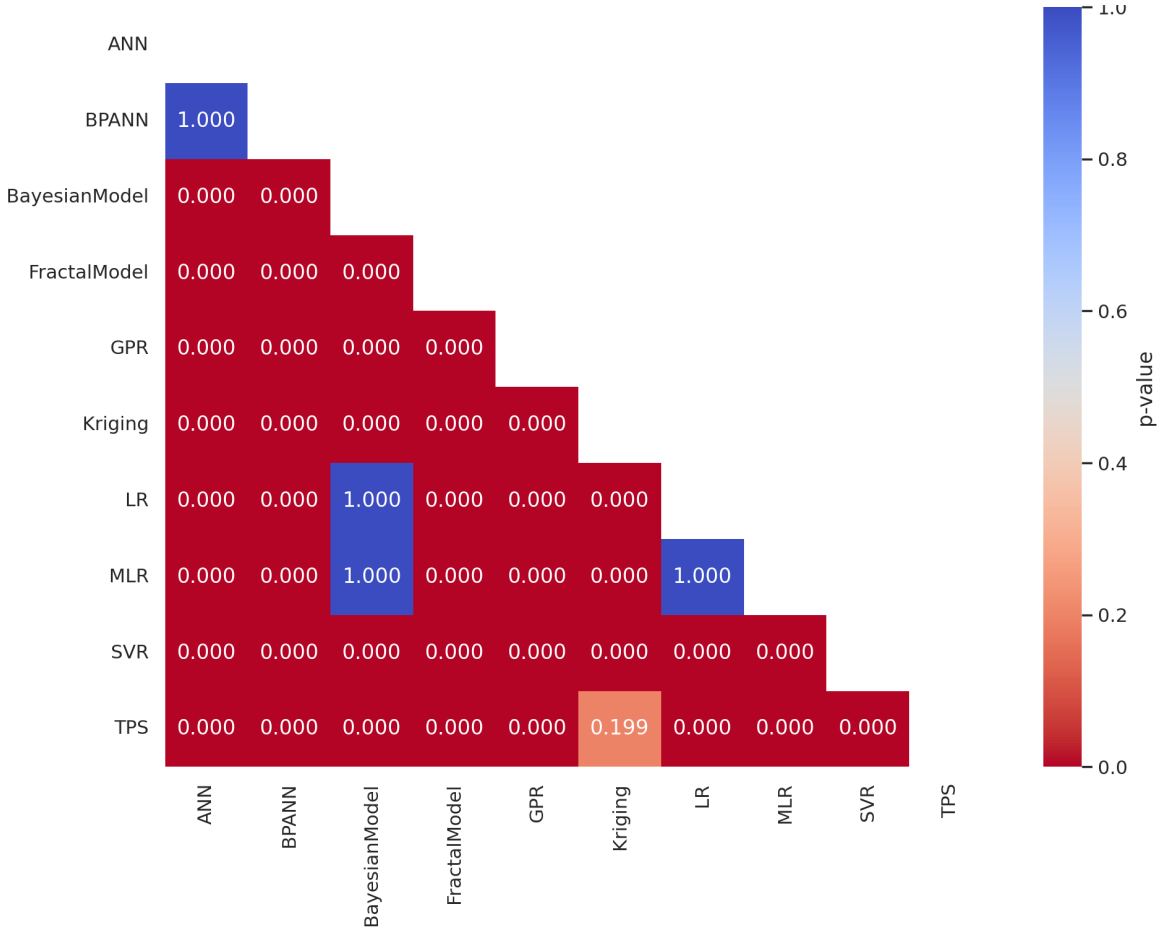
Şekil 96. Vx değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları



Şekil 97. ML yöntemlerinin V değerlerini gösterir kutu grafiği

Tablo 50. V değerleri için Tukey HSD testinin anlamlı sonuçları

grup1	grup2	ort.fark	p-adj	reject
ANN	FraktalModel	42.606	0.0	TRUE
ANN	GPR	8.985	0.0	TRUE
ANN	Kriging	8.229	0.0	TRUE
ANN	MLR	-231	1.0	FALSE
ANN	SVR	785	999	FALSE
BPANN	FraktalModel	42.595	0.0	TRUE
BPANN	GPR	8.974	0.0	TRUE
BPANN	Kriging	8.218	0.0	TRUE
BPANN	MLR	-242	1.0	FALSE
BayesyenModel	FraktalModel	42.839	0.0	TRUE
BayesyenModel	GPR	9.218	0.0	TRUE

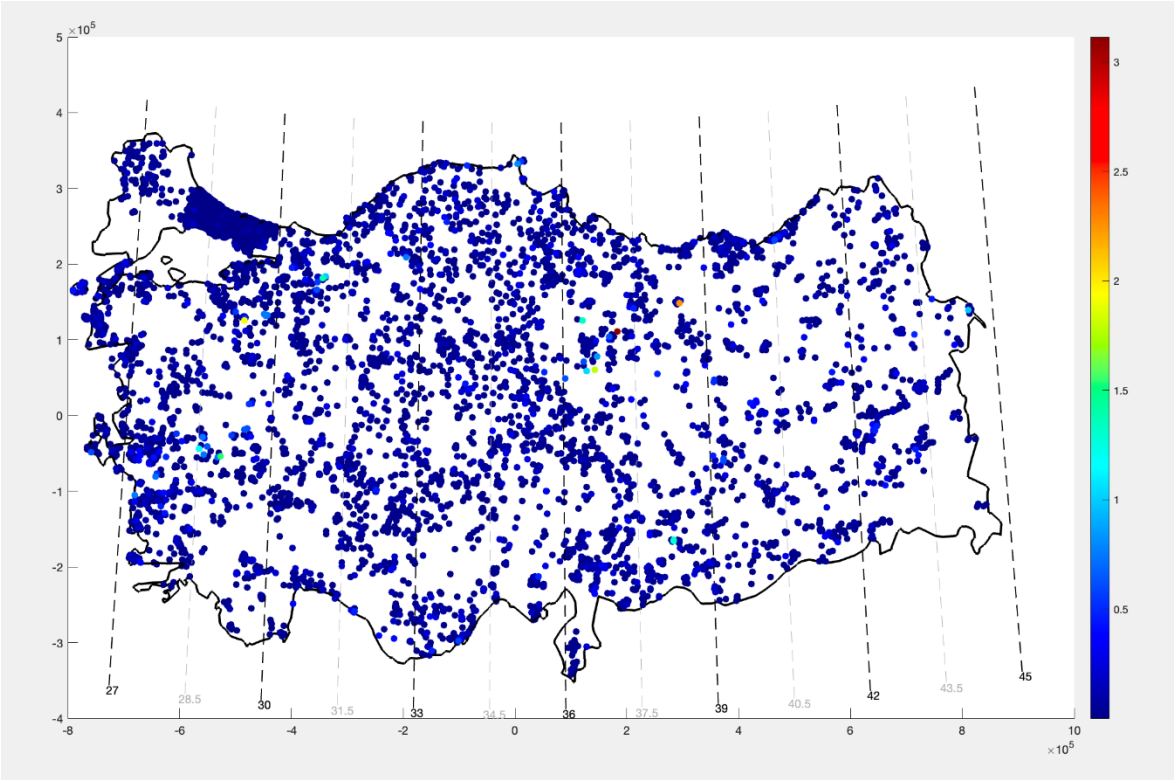


Şekil 98. V değerleri için Dunn-Bonferroni testi sonuçları

Testlerin (Tablo 49, Tablo 50) sonucuna göre ML yöntemleri arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde (Şekil 93, Şekil 94, Şekil 95, Şekil 96, Şekil 97, Şekil 98) TPS, Kriging ve GPR yöntemlerinin en iyi sonuçları ürettiğini, Fraktal tabanlı yöntem ile SVR yönteminin diğer yöntemlerden başarısız sonuçları elde ettiği sonucuna varılır.

d) Konumsal Analiz

7313 noktanın koordinatları üretilen makine öğrenmesi modelleri ile dönüştürülmüştür (Şekil 99). Modellerin ürettiği sonuçlar ile gerçek koordinat değeri farklarına göre renklendirilen harita Şekil 99 ile gösterilmektedir. Noktaların %87'si 10 cm'den az kayıklık ile dönüştürülmüştür.



Şekil 99. ML yöntemleri ile dönüştürülen 7313 noktanın V değerlerine göre gösterimi

2.7.5. Modellerin Karşılaştırılması

Bu kısımdaki testler, 7313 noktaya ait datum dönüşüm sonuçları üzerinde gerçekleştirilen kapsamlı istatistiksel analizler sunulmaktadır. TUM, TUTGA ve CORS Modelleri ile birlikte ML Modellerini karşılaştırılmıştır. Analizlerde temel performans göstergeleri olarak RMSE, Vx ve Vy kullanılmış; normallik testleri, parametrik ve parametrik olmayan anlamlılık testleri ile değerlendirmeler yapılmıştır.

a) Tanımlayıcı İstatistikler

Veri kümesine ait tanımlayıcı istatistikler incelendiğinde, deney tasarımının sekiz farklı uyuşumsuz ölçü belirleme yöntemini eşit örneklem büyüklükleriyle temsil edecek biçimde dengelendiği görülmektedir (Tablo 51); bu durum, yöntemler arası karşılaştırmalarda olası yanlılık riskini en aza indirir. Ortak nokta sayılarının çoğunlukla altı ile yedi arasında yoğunlaşması (Tablo 52), ölçü ağının geometrik açıdan yeterli düzeyde zengin olduğunu ve konum çözümlemelerinde istikrar sağladığını göstermektedir. CORS, TUTGA ve TUM Modellerine ait tanımlayıcı istatistiksel veriler Tablo 53 ile gösterilmiştir.

ML Modelleri diğer model sonuçlarıyla tutarlı olup anlamlı bir sistematik kayma içermemekte, ancak münferit uç değerler modele ait olası lokal duyarlık sorunlarına işaret etmektedir (Tablo 54). Bütüncül olarak değerlendirildiğinde, istatistiksel özet verileri veri setinin tutarlı, yöntemsel çeşitliliğin dengeli ve hata seviyelerinin uygulamada kabul gören sınırlar içinde olduğunu ortaya koymakta; dolayısıyla analiz sonuçlarında "olağan dışı" veya metodolojik açıdan sorun teşkil eden bir durum gözlenmemektedir.

Tablo 51. UOBA Sayı ve Frekans Değerleri

	Sayı	Frekans (%)
Andrews	95069	10.0
Danimarka	95069	10.0
Fair	95069	10.0
Hampel	95069	10.0
Huber	95069	10.0
IGG	95069	10.0
Medyan	95069	10.0
RANSAC	95069	10.0
TTest	95069	10.0

Tablo 52. Kullanılan ortak nokta sayısı ve frekans değerleri

	Sayı	Frekans (%)
3	73130	7.7
4	146260	15.4
5	219390	23.1
6	219390	23.1
7	292520	30.8

Tablo 53. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler (CORS, TUTGA, TUM)

Değişken	Ortalama	Std Sapma	Min	Max
RMSE	0.222	0.311	0.001	3.188
MAE	0.201	0.278	0.001	2.970
Vmax	0.332	0.494	0.003	5.999

Tablo 54. Tanımlayıcı İstatistiksel Veriler (ML)

Değişken	Ortalama	Std Sapma	Min	Max
Vy	0.337	44.760	-3691.359	4332.394
Vx	-0.031	45.338	-6781.279	1202.908
V	6.843	63.343	0.000	7013.484

b) Model Bazlı İrdeleme

Normalite ve varyans homojenliği varsayımlarına yönelik ilk incelemede her üç değişken grubunda da normal dağılım koşulunun ve varyans eşitliğinin sağlanmadığı belirlenmiştir; dolayısıyla parametrik varyans-analizi yerine sıralama temelli Kruskal-Wallis ve Dunn-Bonferroni testlerine başvurulmuştur (Tablo 55).

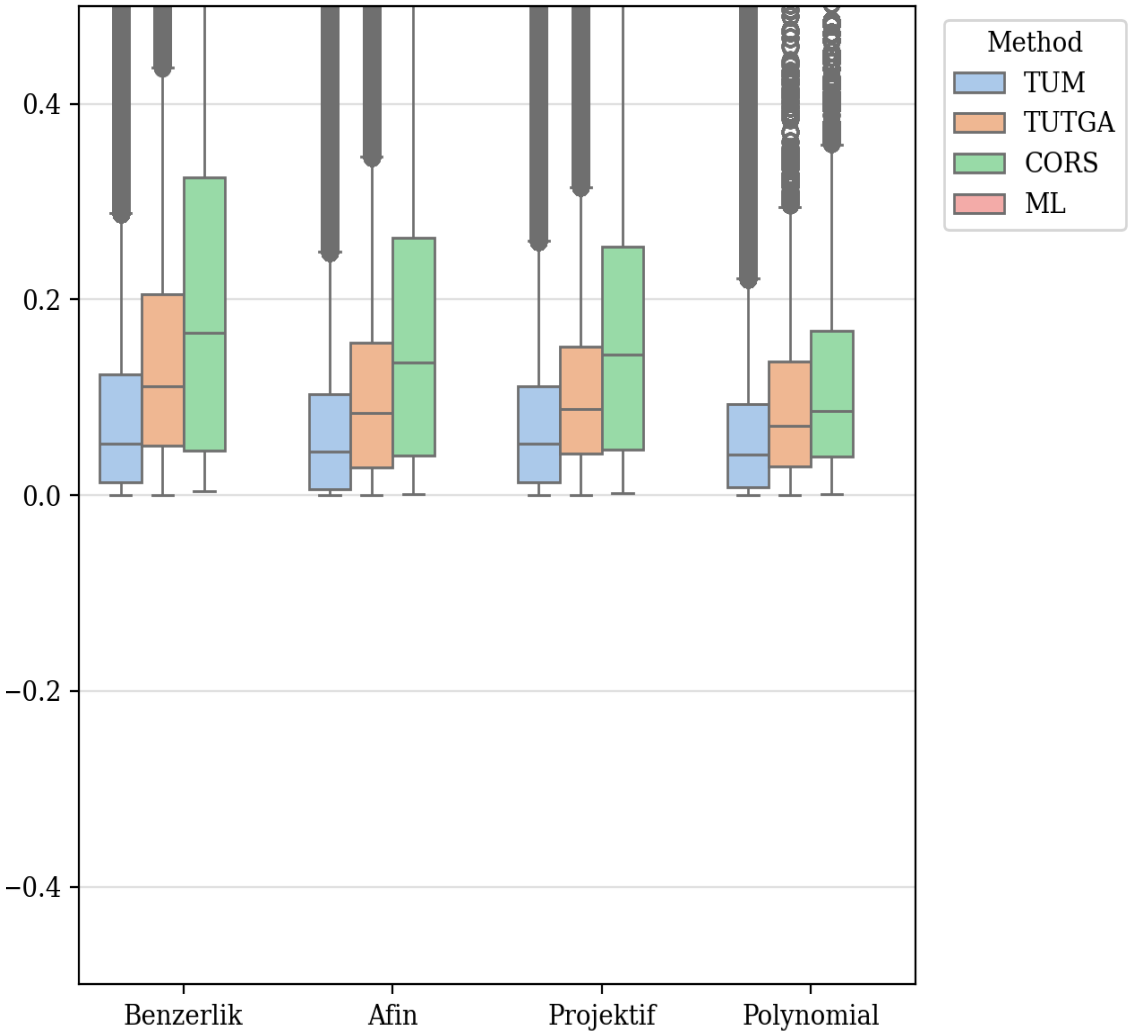
RMSE için yapılan karşılaştırmalarda (Tablo 56, Tablo 57) bütün yöntem çiftleri istatistiksel olarak ayırt edilebilir düzeyde farklılık sergilemiştir; en yüksek hata CORS, onu TUTGA ve en düşük hatayı veren TUM Modeli izlemiştir.

Vx metriğinde (Tablo 58, Tablo 59) parametrik testler fark saptamazken non-parametrik sonuçlar tüm eşleşmelerin istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermiştir; ancak ortalama farkların santimetre düzeyini geçmemesi, bu farklılığın uygulamada göz ardı edilebilecek büyüklükte olduğuna işaret etmektedir.

Vy açısından (Tablo 60, Tablo 61) ML modelin yaklaşık 34 cm'lik hata üretmesi onu diğer üç yöntemin anlamlı biçimde altına taşırken, CORS, TUM ve TUTGA arasında istatistiksel olarak kayda değer bir sapma görülmemiştir. Özetle, normallik ihlaline bağlı olarak tercih edilen sıralı testler tüm metriklerde "küçük fakat istatistiksel olarak anlamlı" farklılıklar ortaya koyarken, pratik etki büyüklüğü yalnızca RMSE'de belirgin ve Vy'de sınırlı düzeydedir; Vx'teki farklar ise uygulama açısından ihmal edilebilir niteliktedir.

Tablo 55. Normalite ve Varyans Homojenliği Testleri

	Test	İstatistik	p	Normal	VarHom	Levene_p	TUMpS	TUTGA_pS	CORS_pS
0	Kruskal-Wallis	675980.13	0.0	False	False	0.0	0.0	0.0	0.0
1	Kruskal-Wallis	1817.938	0.0	False	False	0.0	0.0	0.0	0.0
2	Kruskal-Wallis	5048.599	0.0	False	False	0.0	0.0	0.0	0.0



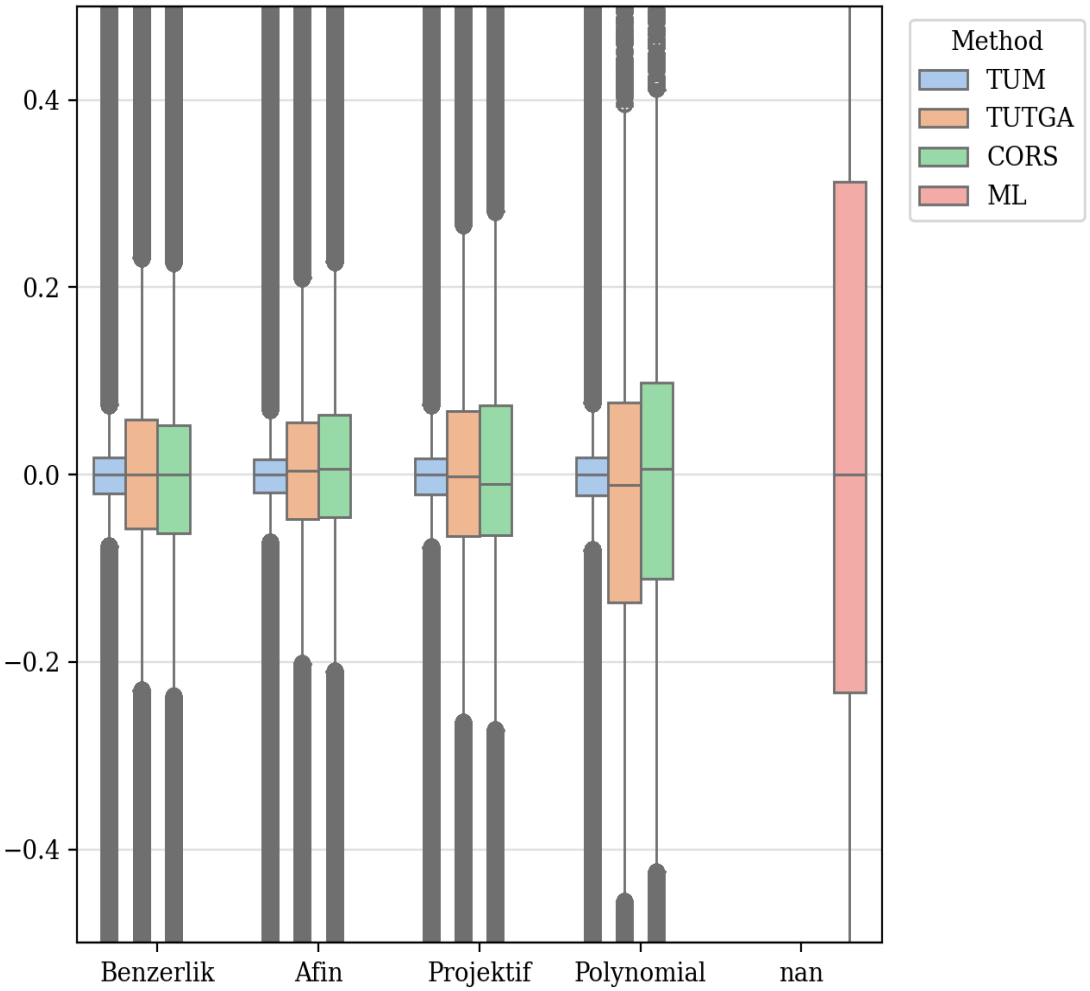
Şekil 95. RMSE – DYA / Model kutu grafiği

Tablo 56. RMSE metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

grup1	grup2	ort.fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	reject
CORS	TUM	-0.124	0.000	-0.124	-0.123	True
CORS	TUTGA	-0.051	0.000	-0.052	-0.050	True
TUM	TUTGA	0.072	0.000	0.072	0.073	True

Tablo 57. RMSE metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

	CORS	TUM	TUTGA
CORS	1.0	0.0	0.0
TUM	0.0	1.0	0.0
TUTGA	0.0	0.0	1.0



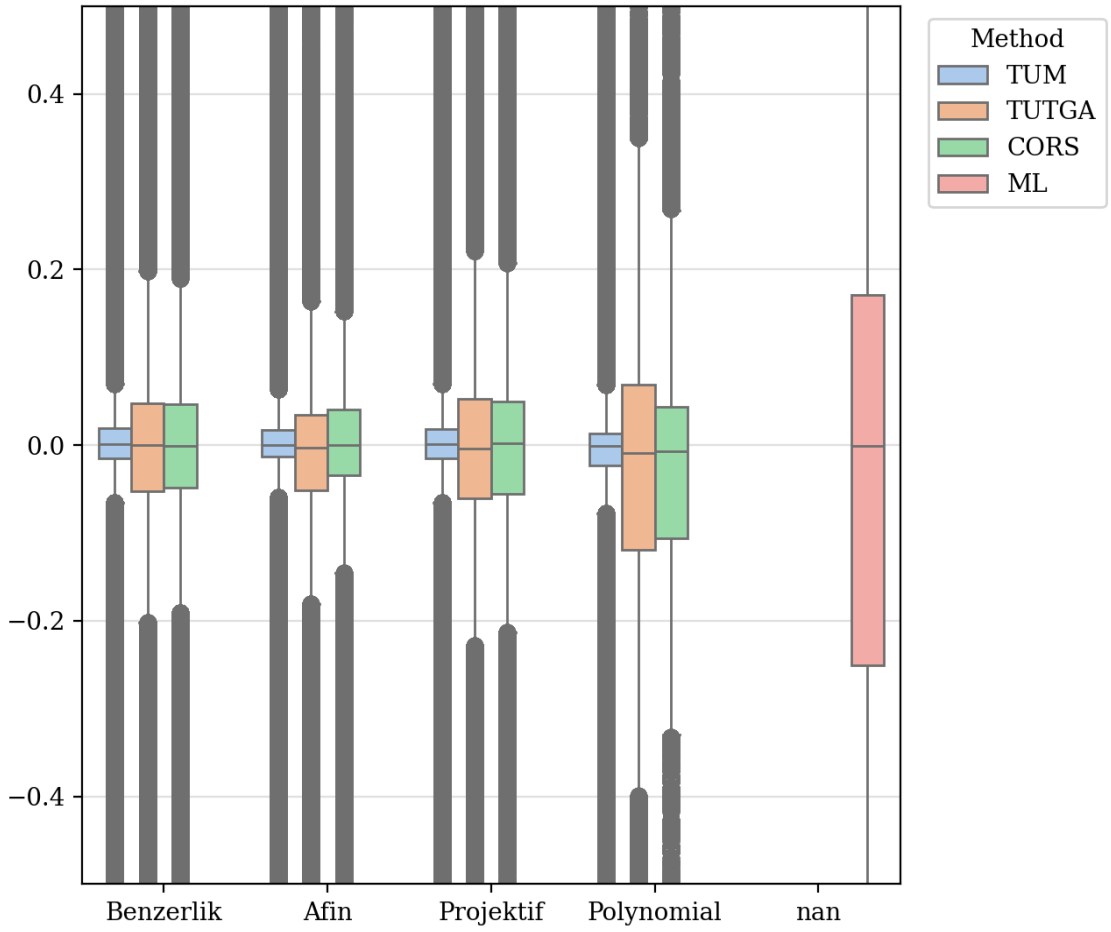
Şekil 100. Vx – DYA / Model kutu grafiği

Tablo 58. Vx metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

grup1	grup2	ort.fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	reject
CORS	ML	-0.032	0.118	-0.069	0.005	False
CORS	TUM	-0.002	0.983	-0.012	0.009	False
CORS	TUTGA	-0.001	0.998	-0.015	0.013	False
ML	TUM	0.030	0.127	-0.005	0.066	False
ML	TUTGA	0.031	0.138	-0.006	0.068	False
TUM	TUTGA	0.000	1.000	-0.010	0.011	False

Tablo 59. Vx metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

	CORS	ML	TUM	TUTGA
CORS	1.0	0.0	0.0	0.0
ML	0.0	1.0	0.0	0.0
TUM	0.0	0.0	1.0	0.0
TUTGA	0.0	0.0	0.0	1.0



Şekil 101. Vy – DYA / Model kutu grafiği

Tablo 60. Vy metriği için Tukey HSD (Parametrik) Testi

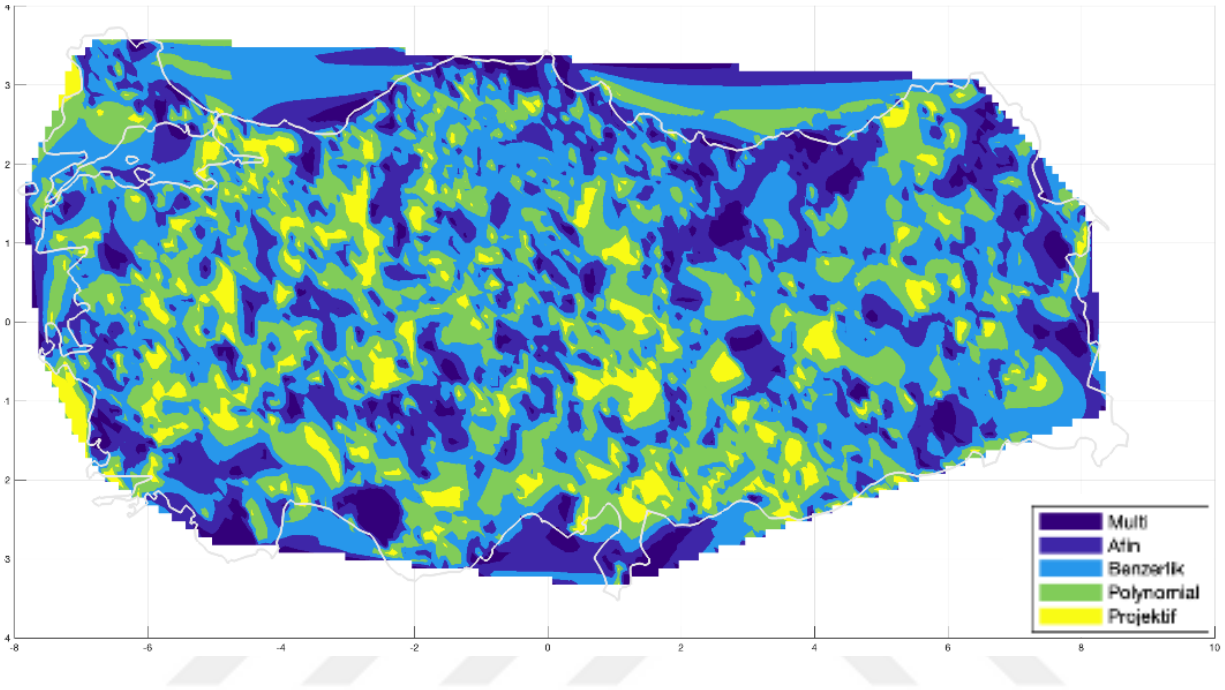
grup1	grup2	ort.fark	p-adj	Alt Sınır	Üst Sınır	reject
CORS	ML	0.338	0.000	0.301	0.374	True
CORS	TUM	0.000	1.000	-0.010	0.010	False
CORS	TUTGA	-0.000	1.000	-0.014	0.014	False
ML	TUM	-0.338	0.000	-0.373	-0.302	True
ML	TUTGA	-0.338	0.000	-0.374	-0.302	True
TUM	TUTGA	-0.001	0.999	-0.011	0.010	False

Tablo 61. Vy metriği için Dunn-Bonferroni (Non-parametrik) Testi

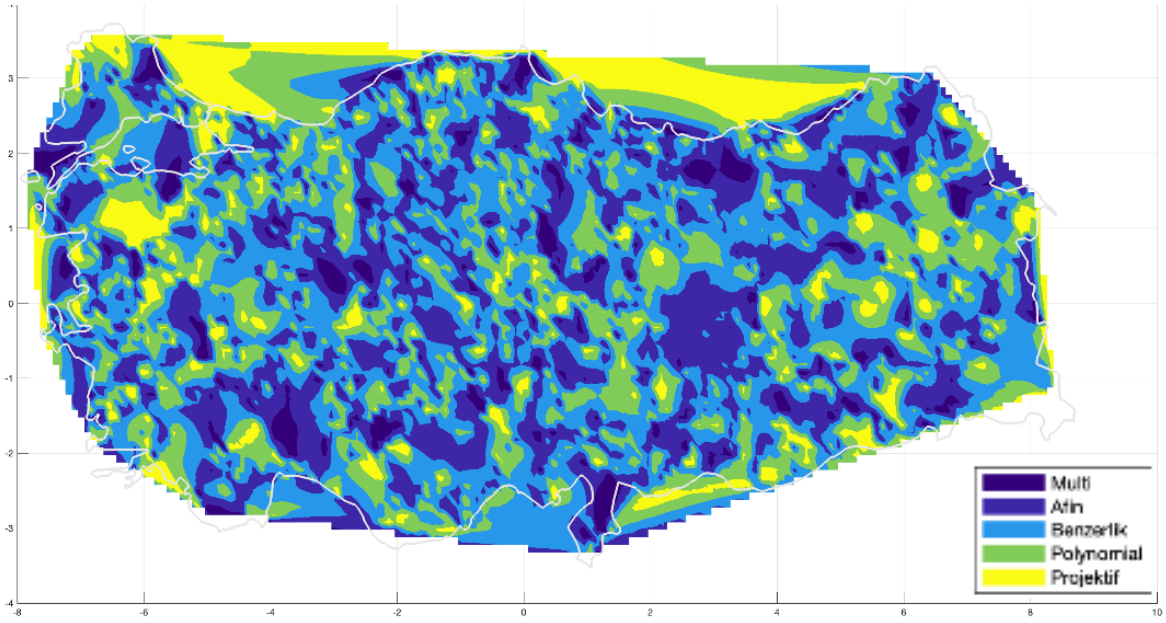
	CORS	ML	TUM	TUTGA
CORS	1.0	0.0	0.0	0.0
ML	0.0	1.0	0.0	0.0
TUM	0.0	0.0	1.0	0.0
TUTGA	0.0	0.0	0.0	1.0

Testlerin (Tablo 56 - Tablo 61 arası) sonucuna göre Modeller arasında anlamlı fark vardır. Bu fark irdelendiğinde (Şekil 100, Şekil 101) TUM Modeli> TUTGA Modeli> CORS Modeli> ML Modeli şeklinde model başarılarının sıralanabileceği sonucuna varılır.

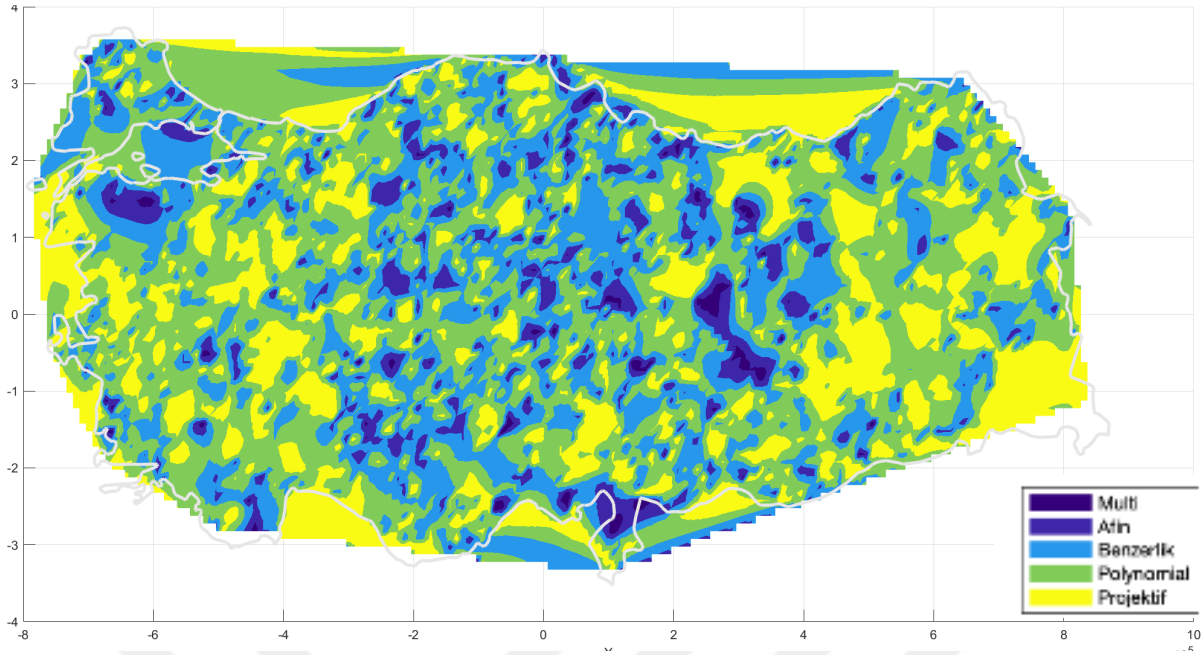
c) Konumsal Analiz



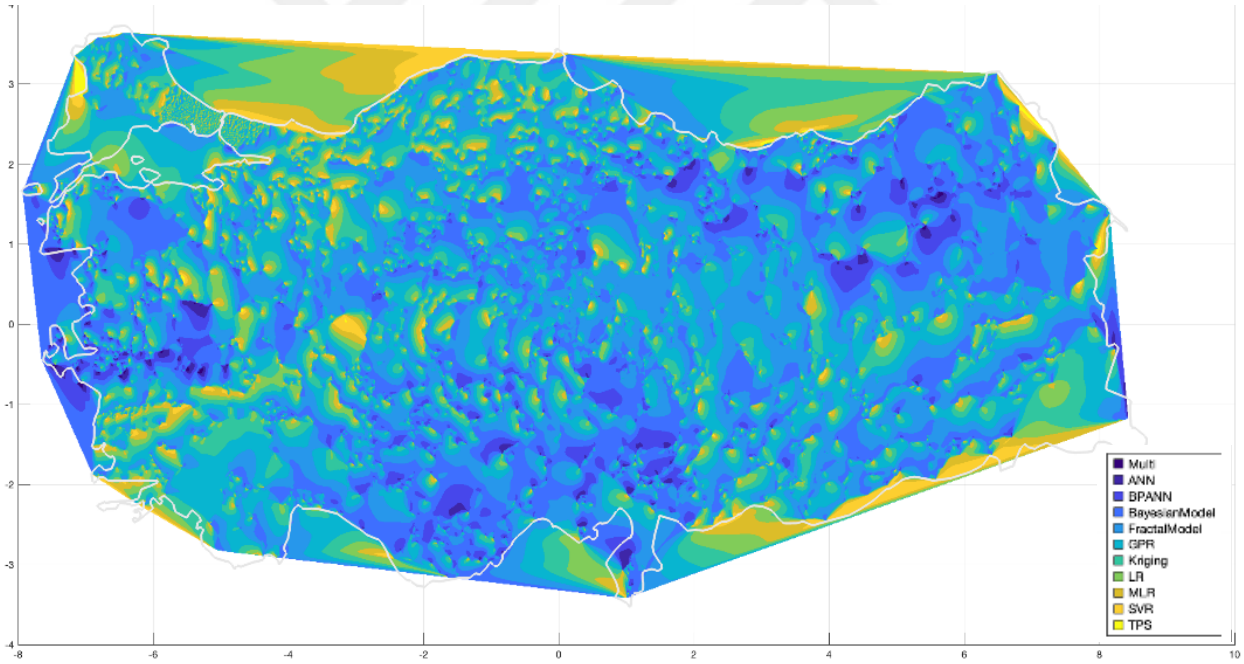
Şekil 102. CORS-TR en iyi DYA alansal gösterim



Şekil 103. TUTGA en iyi DYA alansal gösterim



Şekil 104. TUM en iyi DYA alansal gösterim



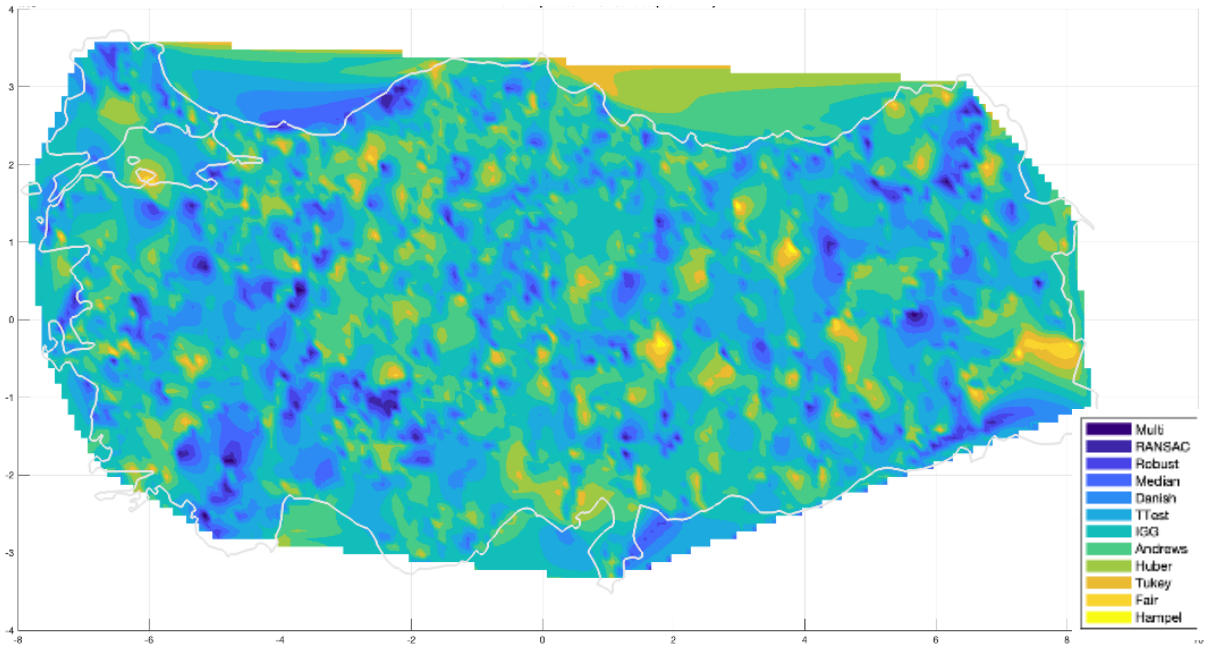
Şekil 105. ML en iyi algoritma alansal gösterim

Modellerin kullandıkları DYA'ların Türkiye üzerinde en iyi sonuçlar verdiği alanlar incelendiğinde CORS (Şekil 106) ve TUTGA (Şekil 107) Modelleri için daha az nokta kullanan afin ve benzerlik yöntemlerinin hâkim olduğu görülmektedir. Bu CORS ve

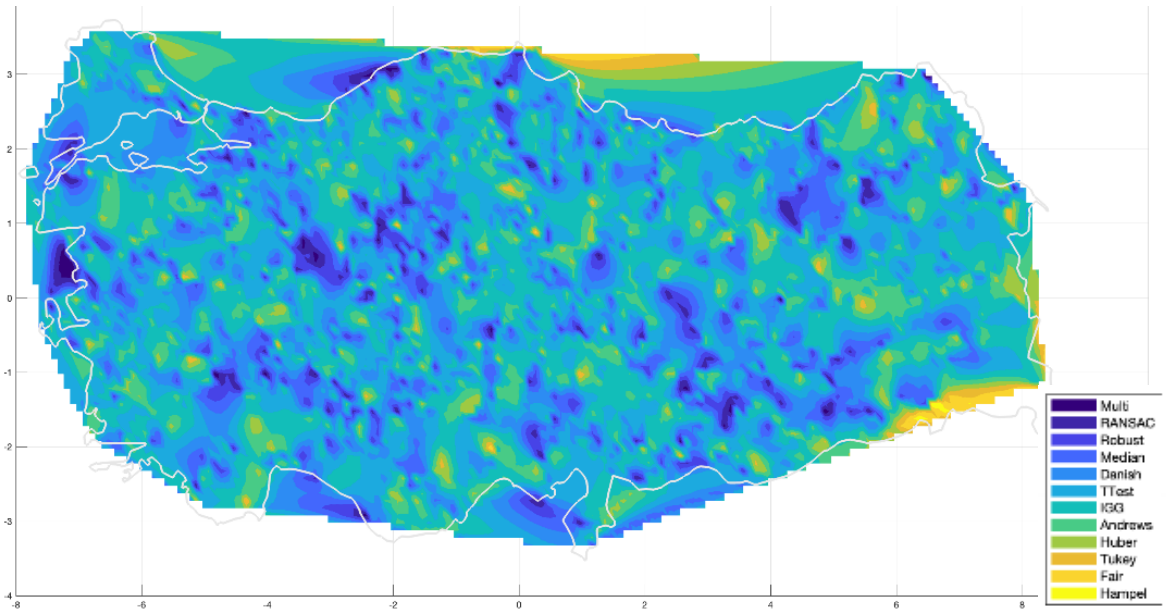
TUTGA Modellerinin dönüşüm için kullandığı ortak nokta kümesindeki nokta sayısının az olmasından kaynaklanmaktadır.

TUM Modeli (Şekil 108) incelendiğinde ise projektif dönüşümün en geniş kullanım alanına sahip olduğu ve onu polinomsal dönüşümün takip ettiği görülmektedir. Noktaların en yoğun olduğu İstanbul bölgesi için benzerlik yöntemi en başarılı sonuçları vermektedir.

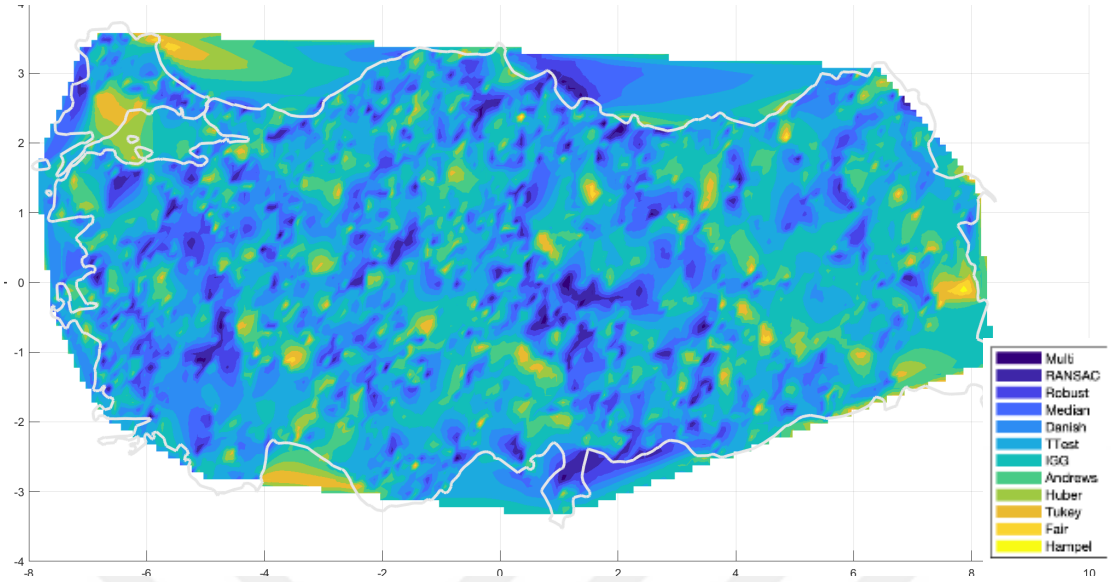
ML Modelleri (Şekil 105) için en geniş alana yayılan yöntemlerin TPS, GPR, Kriging ve Bayesyen modelleri olduğu görülmüştür.



Şekil 106. CORS-TR en iyi UOBA alansal gösterim



Şekil 107. TUTGA en iyi UOBA alansal gösterim



Şekil 108. TUM en iyi UOBA alansal gösterim

UOBA'larının Modellere göre Türkiye'ye yayılımları (Şekil 106, Şekil 107, Şekil 108) konumsal olarak incelendiğinde TUM, CORS ve TUTGA Modellerinin paralellik gösterdiği ve RANSAC, IGG, Danimarka ve t-testi yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir.

2.7.6. Modellerin İrdelenmesi

Çalışmada kullanılan TUM, TUTGA, CORS ve ML modelleri hem karesel ortalama hata hem de sapma değerleri açısından ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, TUM yönteminin genel performans açısından diğer tüm yöntemlerden üstün olduğunu göstermektedir. TUM modeli, tüm test noktalarında maksimum 3 cm RMSE ile dönüşüm işlemlerini gerçekleştirmiş ve %99 oranında 10 cm'den az sapma üretmiştir (Tablo 62). Bu başarı, modelin hem yüksek doğruluk hem de güvenilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 62. Modellerin en iyi RMSE değerlerine göre irdelenmesi

	TUTGA	CORS	ML	TUM
9 cm altı	%85	%71	–	%100 (3 cm altı)
9–20 cm	%10	%20	–	–
20–50 cm	%3	%7	–	–
Kalan nokta sayısı	160 (%2)	163 (%2)	–	–

Tablo 63. Modellerin en iyi Vx-Vy değerlerine göre irdelenmesi

	TUTGA	CORS	ML	TUM
10 cm altı	%55	%47	%87	%98 (3 cm altı)
10–20 cm	%23	%22	%8	%1 (3–10 cm)
20–50 cm	%16	%23	%3	–
Kalan nokta sayısı	438 (%6)	600 (%8)	160 (%2)	74 (%1)

Tablo 64. Modellerin 7313 noktadaki en iyi sonuçlarının ortalamaları

	TUM	TUTGA	CORS	ML
Ortalama RMSE	0.0065 m	0.0627 m	0.0997 m	–
Ortalama Y sapması	0.0082 m	0.15 m	0.22 m	0.018 m
Ortalama X sapması	0.0032 m	0.08 m	0.10 m	0.012 m

TUTGA ve CORS modelleri, talep edilen RMSE değerini büyük ölçüde sağlasa da özellikle sapma değerlerinde TUM ve ML modellerine kıyasla daha zayıf performans sergilemiştir. TUTGA modeli %85 oranında, CORS modeli ise %71 oranında 9 cm altı RMSE değerine ulaşmıştır (

Tablo 63). Ancak sapma analizinde, test noktalarının yaklaşık yarısında 10 cm'den büyük sapmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, bu modellerde kullanılan ortak noktaların dönüşüm noktalarına olan uzaklığından kaynaklanmaktadır.

Makine öğrenmesi tabanlı ML modeli, özellikle TPS, Kriging ve GPR gibi modellerde yüksek doğruluk sağlamış ve sapma yönünden TUM modelinden sonra en iyi performansı göstermiştir (

Tablo 63). ML modeli, %87 oranında 10 cm altı sapma ile sonuç üretmiş, bu yönüyle TUTGA ve CORS'tan daha başarılı olmuştur. Bununla birlikte, ML modelinin klasik yöntemlerle doğrulanarak kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, Fraktal tabanlı modeller genel olarak başarısız bulunmuş ve yüksek hatalı sonuçlar üretmiştir.

Modeller alt bileşenleri açısından incelendiğinde, dönüşüm yöntemi algoritmalarında polinomsal ve afin dönüşümler öncelikli olarak tercih edilmelidir. Uyuşumsuz ölçü belirleme algoritmaları arasında IGG, t-testi, RANSAC ve Tukey yöntemleri, diğerlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar vermiştir. Nokta seçiminde, en yakın nokta algoritması çoğu durumda etkili olurken, açı-alan algoritması sınır bölgelerde daha zayıf performans sergilemiş; ancak bazı nokta dağılımlarında daha iyi sonuçlar da elde edebilmiştir.

Sonuç olarak (

Tablo 64), TUM modeli tüm kriterler açısından en dengeli ve güvenilir sonuçları sunmakta, ML modelleri ise özellikle sapma değerlerinde TUM'a yakın sonuçlar üretmektedir. TUTGA ve CORS modelleri ise belirli koşullarda başarılı olsa da dönüşüm noktalarının dağılımına ve uzaklığına bağlı olarak performans dalgalanmaları göstermektedir. Bu bulgular, Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin farklı veri setleri ve model kombinasyonları ile optimize edilerek geniş bir uygulama yelpazesinde güvenle kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

2.8. Programda Kullanılacak Modelin Belirlenmesi

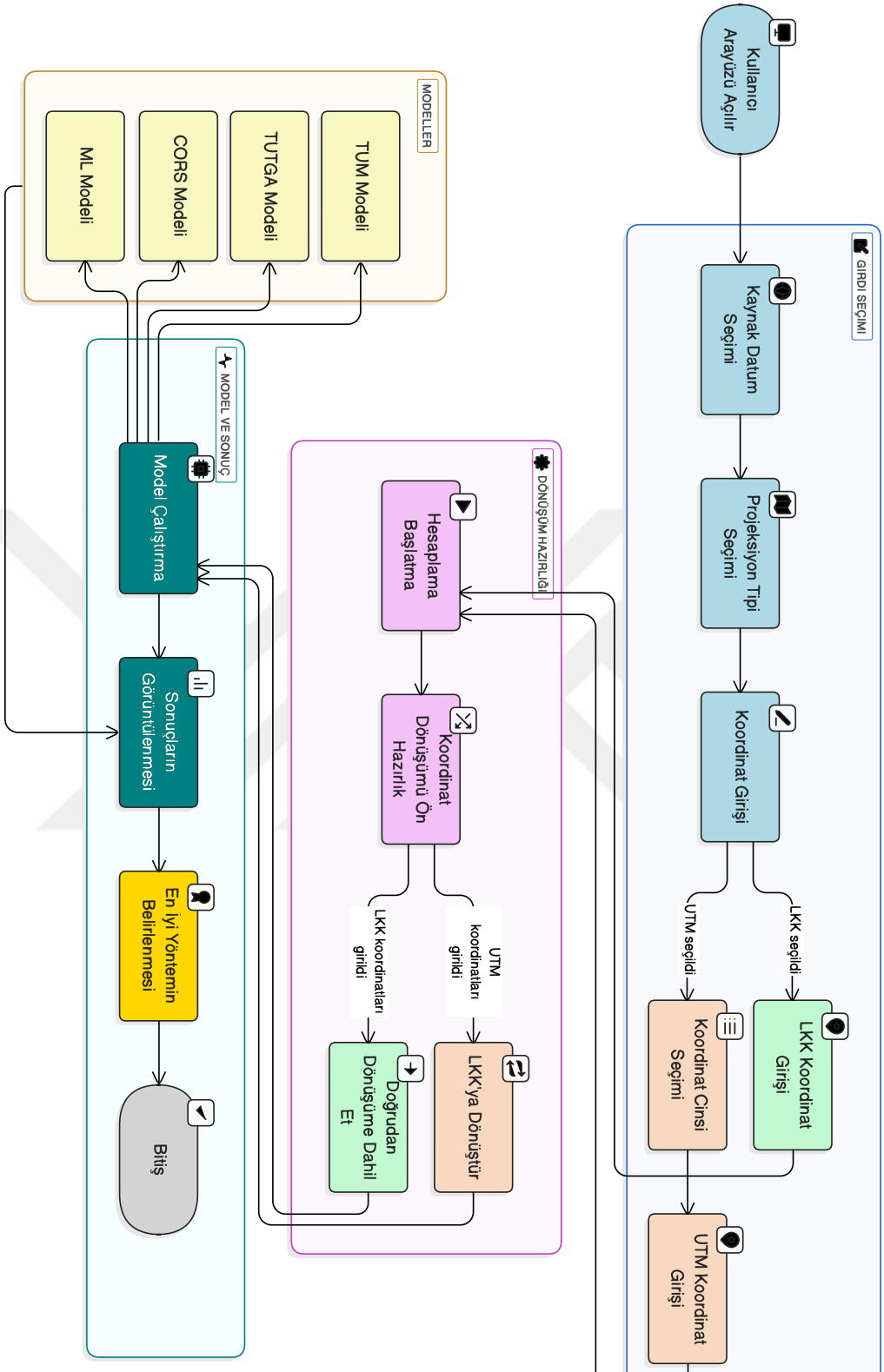
Program kapsamında, farklı datum dönüşüm yöntemleri arasından en uygun olanının seçilebilmesi için çok aşamalı bir değerlendirme süreci uygulanmıştır. Öncelikle, dönüşüm tipi (polinomsal, afin, projektif, benzerlik) ve uyuşumsuz ölçü belirleme algoritması (IGG, t-testi, RANSAC, Tukey, Danimarka vb.) seçenekleri belirlenmiş, ardından bu yöntemler TUM, TUTGA ve CORS Modelleri test edilmiştir. Her model için önceden tanımlı ağırlık katsayıları kullanılmış; TUM için 1.0, TUTGA için 0.5 ve CORS için 0.3 değeri atanmıştır. Dönüşüm yöntemleri arasında polinomsal için 1.0, afin için 0.9, projektif için 0.6 ve benzerlik için 0.5 katsayısı kullanılmıştır. Uyuşumsuz ölçü algoritmalarında IGG, t-testi, RANSAC ve Tukey 1.0 katsayısıyla, Danimarka 0.8 ile ve diğer algoritmalar ise 0.6 ile ağırlıklandırılmıştır.

ONBA'larda nokta sayısı aralığı 3–13 arasında uygun bulunduğundan ek bir ağırlıklandırma yapılmamış, yalnızca dönüşüm ve uyuşumsuz ölçü belirleme aşamalarına ait puanlama dikkate alınmıştır. Her yöntemin nihai puanı, ilgili ağırlık değerlerinin 1/RMSE ile çarpılması sonucu elde edilmiş ve bu puanların maksimum olduğu kombinasyon "en iyi yöntem" olarak kullanıcıya sunulmuştur.

Bu sistematik yaklaşım sayesinde, her veri kümesi ve dönüşüm tipi için en uygun algoritma kombinasyonu objektif olarak belirlenmiş; kullanıcıya hem jeodezik doğruluk hem de işlem güvenilirliği yüksek sonuçlar sağlayacak yöntem önerilmiştir. Böylece, program çıktıları sadece doğruluk açısından değil, aynı zamanda veri seti özelliklerine ve çalışma koşullarına uyum bakımından da optimize edilmiştir.

2.9. Programın Üretilmesi

Bu çalışmada geliştirilen program (Şekil 109), farklı coğrafi koordinat sistemleri ve projeksiyon yöntemleri arasında dönüşüm gerçekleştiren, hata analizine dayalı olarak en uygun dönüşüm modelini otomatik belirleyen, kullanıcı dostu bir arayüz ile MATLAB App Designer kullanılarak tasarlanmıştır.



Şekil 109. Program akış şeması

1. Kaynak Datum Seçimi

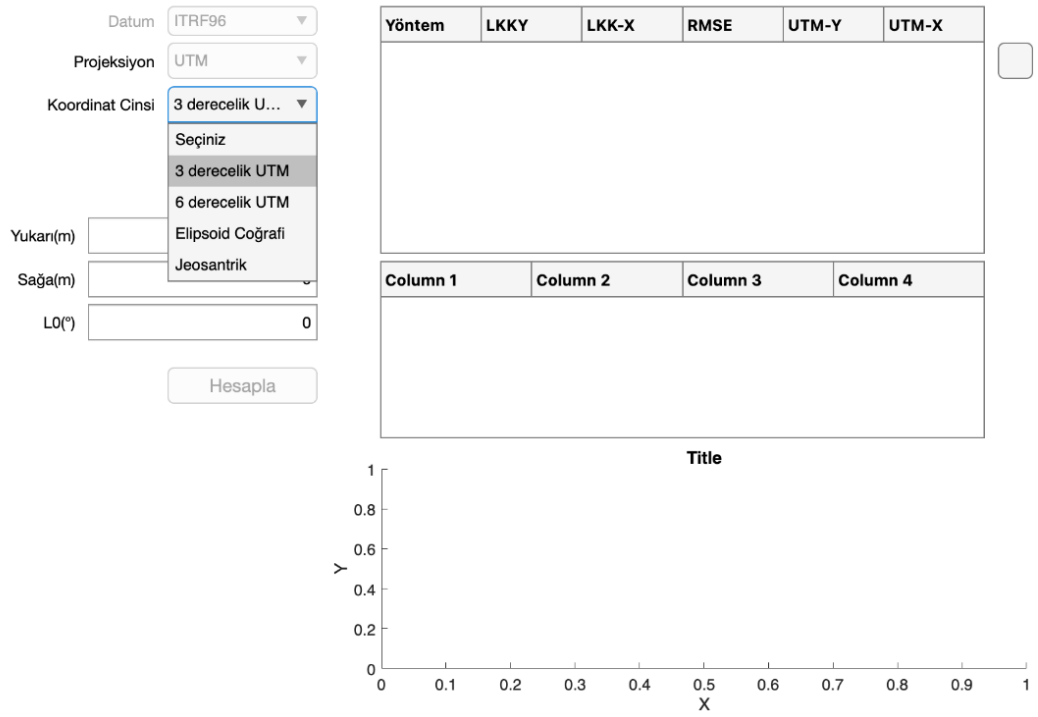
Kullanıcı, dönüşüm işlemi için kaynak datum olarak ITRF96 veya ED50'den birini seçer. Bu seçim, ilgili elipsoid parametrelerinin otomatik olarak ayarlanmasını sağlar.

2. Projeksiyon Tipi Seçimi

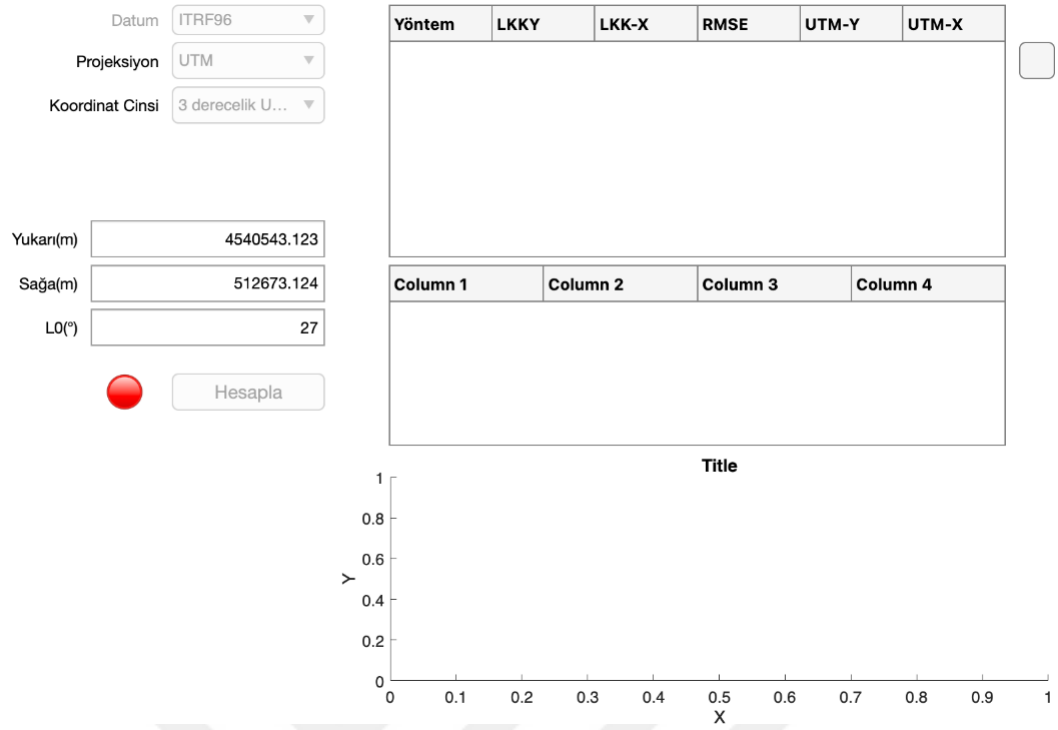
Kullanıcı, dönüşümde kullanılacak projeksiyon tipini UTM veya LKK olarak belirler.

3. Koordinat Girişi (Şekil 111)

- LKK seçilmişse, LKK koordinat değerleri doğrudan girilir.
- UTM seçilmişse, önce koordinat cinsi (3° UTM, 6° UTM, Coğrafi, Kartezyen) seçilir ve ardından UTM koordinat değerleri girilir (Şekil 110).



Şekil 110. Uygulama ekran görüntüsü -1



Şekil 111. Uygulama ekran görüntüsü -2

4. Hesaplama Başlatma

Kullanıcı “Hesapla” komutunu verir.

5. Koordinat Dönüşümü Ön Hazırlık

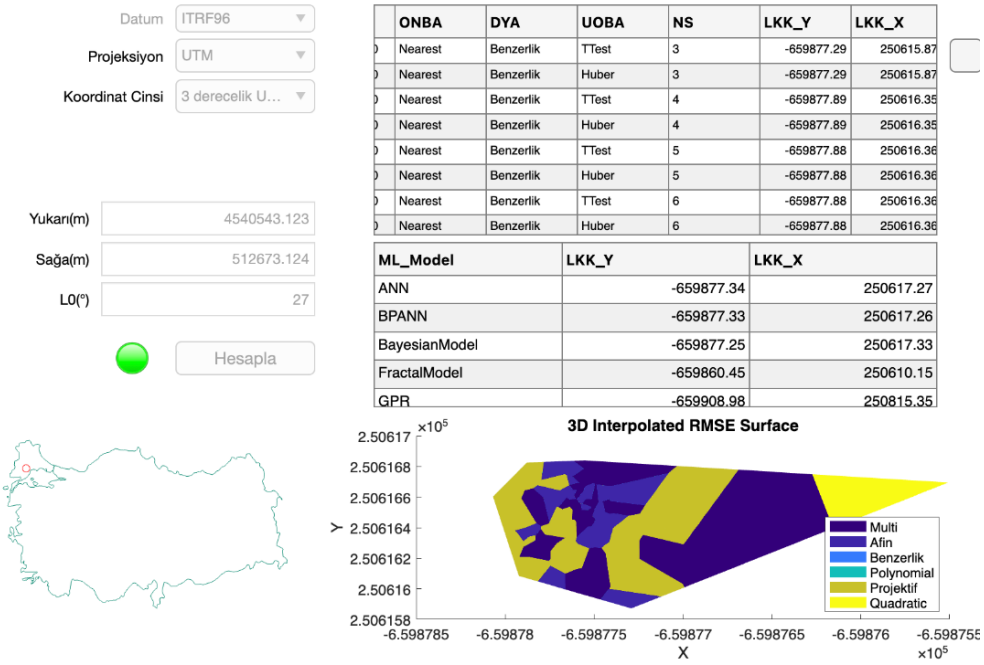
- UTM koordinatları girilmişse, bu değerler LKK tasvir koordinatlara dönüştürülür.
- LKK koordinatları girilmişse, doğrudan dönüşüm işlemine dahil edilir.

6. Model Çalıştırma

Seçilen veri, TUM, TUTGA, CORS ve ML modelleri üzerinden dönüşüm algoritmalarına tabi tutulur.

7. Sonuçların Görüntülenmesi

Her model için elde edilen dönüşüm sonuçları ekranda kullanıcıya sunulur (Şekil 112).



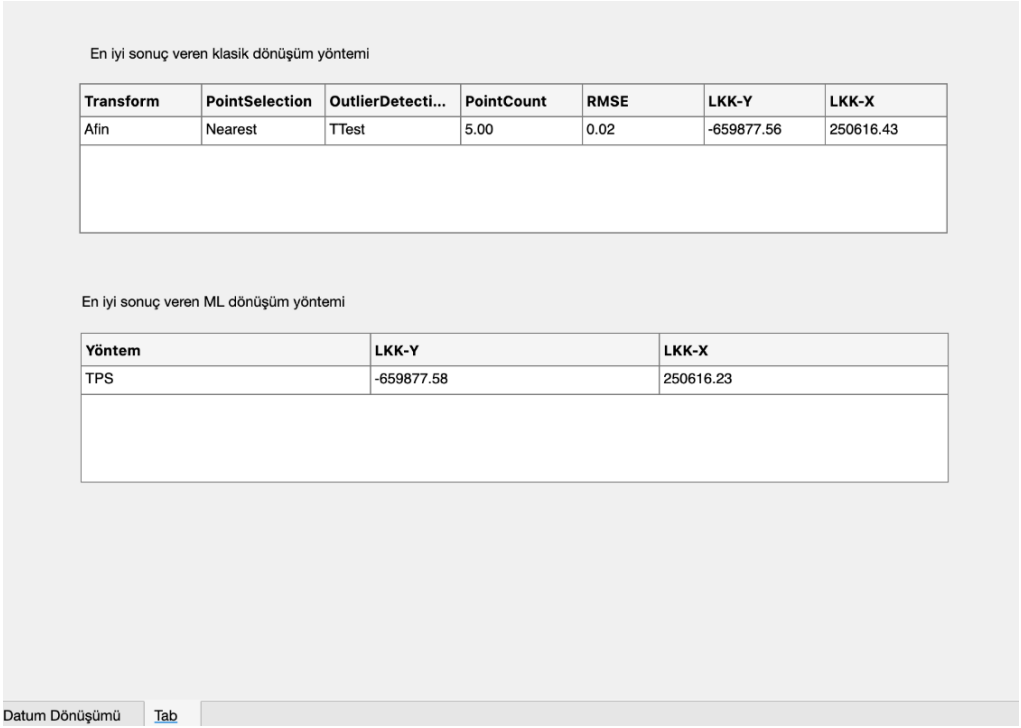
	ONBA	DYA	UOBA	NS	LKK_Y	LKK_X
)	Nearest	Benzerlik	TTest	3	-659877.29	250615.87
)	Nearest	Benzerlik	Huber	3	-659877.29	250615.87
)	Nearest	Benzerlik	TTest	4	-659877.89	250616.35
)	Nearest	Benzerlik	Huber	4	-659877.89	250616.35
)	Nearest	Benzerlik	TTest	5	-659877.88	250616.36
)	Nearest	Benzerlik	Huber	5	-659877.88	250616.36
)	Nearest	Benzerlik	TTest	6	-659877.88	250616.36
)	Nearest	Benzerlik	Huber	6	-659877.88	250616.36

ML_Model	LKK_Y	LKK_X
ANN	-659877.34	250617.27
BPANN	-659877.33	250617.26
BayesianModel	-659877.25	250617.33
FractalModel	-659860.45	250610.15
GPR	-659908.98	250815.35

Şekil 112. Uygulama ekran görüntüsü -3

8. En İyi Yöntemin Belirlenmesi

Tüm modellerin sonuçları karşılaştırılır, en düşük hata değerlerine sahip model “En İyi Sonuç” tablosunda gösterilir (Şekil 113).



En iyi sonuç veren klasik dönüşüm yöntemi

Transform	PointSelection	OutlierDetecti...	PointCount	RMSE	LKK-Y	LKK-X
Afin	Nearest	TTest	5.00	0.02	-659877.56	250616.43

En iyi sonuç veren ML dönüşüm yöntemi

Yöntem	LKK-Y	LKK-X
TPS	-659877.58	250616.23

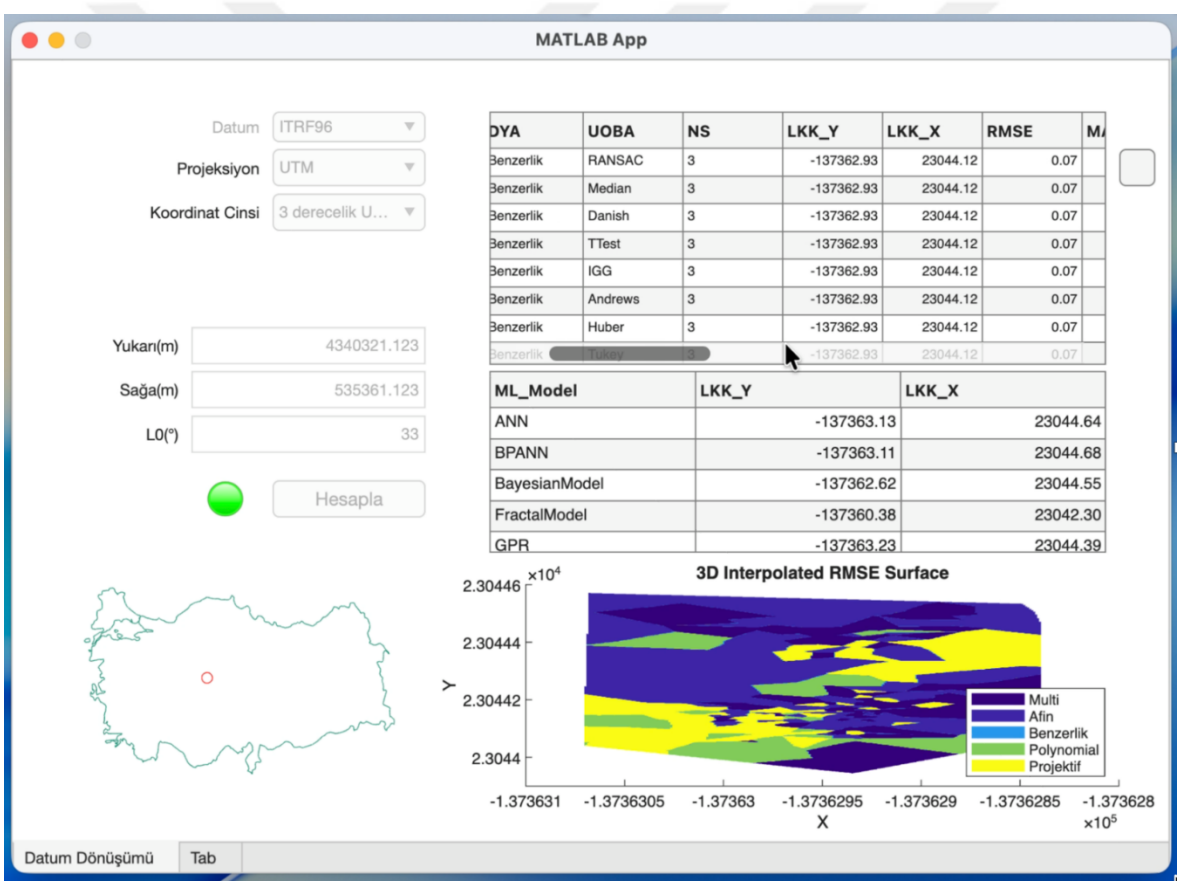
Datum Dönüşümü | Tab

Şekil 113. Uygulama ekran görüntüsü -4

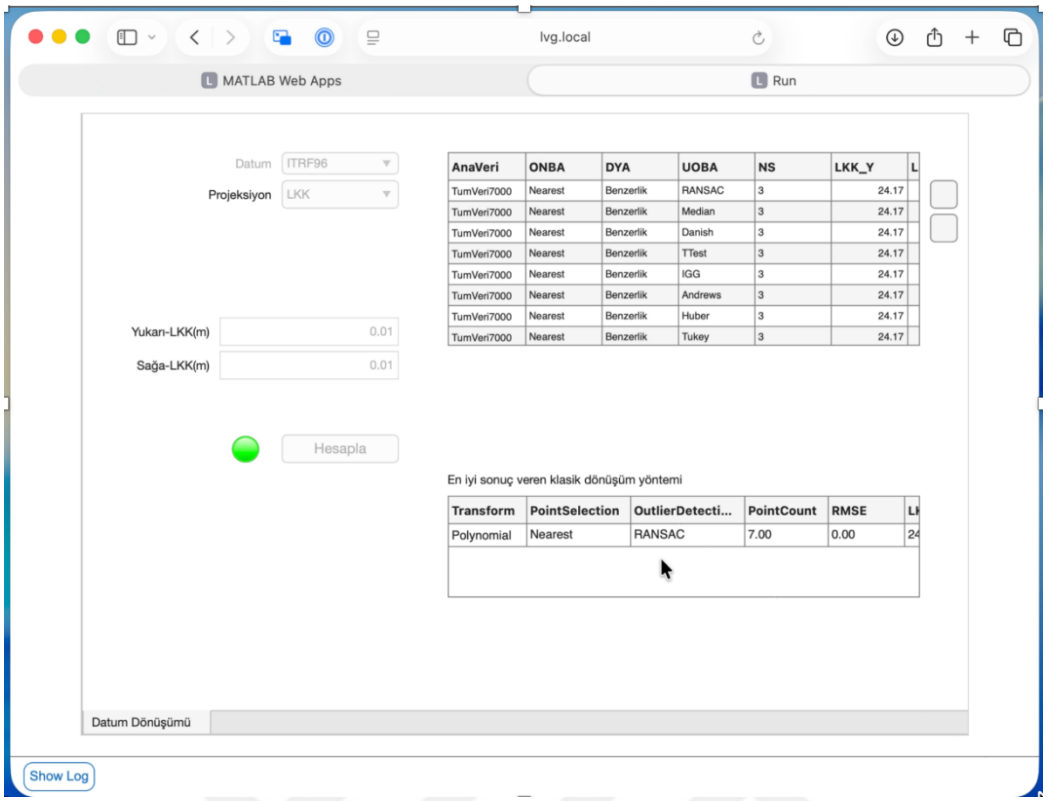
Tüm bu işlemler, kullanıcıdan minimum düzeyde teknik bilgi beklentisiyle, grafik tabanlı arayüz üzerinden sezgisel biçimde yürütülebilir. Bu sayede, koordinat dönüşüm işlemleri yalnızca uzman kişiler tarafından değil, farklı düzeylerdeki kullanıcılar tarafından da hızlı ve güvenilir biçimde gerçekleştirilebilir hale getirilmiştir.

2.9.1. Programın Farklı Platformlarda Sunulması

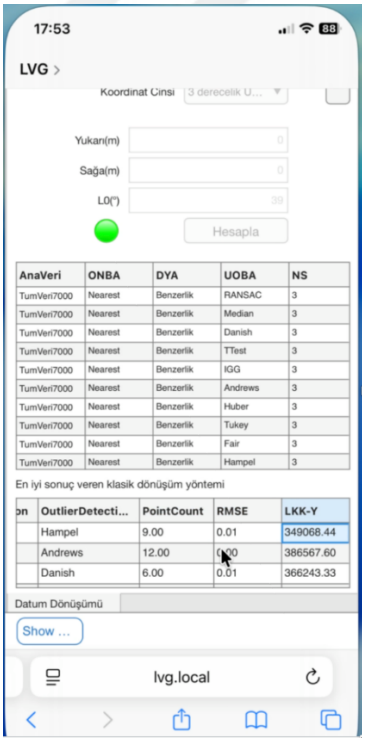
MATLAB ortamında üretilen İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Programı, masaüstü, web ve mobil web olmak üzere 3 farklı ortamda kullanıcılara sunulmaktadır. Farklı platformlardaki programlar, MATLAB Web App modülü ile üretilmiştir.



Şekil 114. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Masaüstü Uygulaması



Şekil 115. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Web Uygulaması

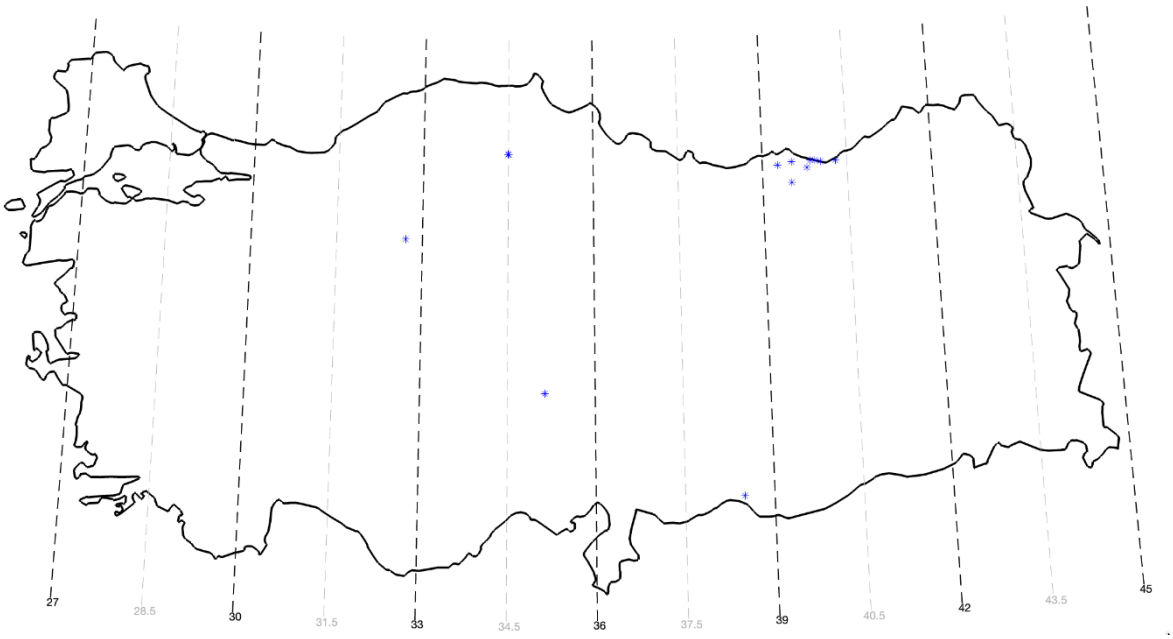


Şekil 116. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli Mobil Uygulaması

Böylece İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli hem masaüstü (Şekil 114), hem web (Şekil 115) hem de mobil (Şekil 116) olarak kullanılabilecektir. Kullanıcılar ihtiyaç duydukları yer ve zamana göre programın farklı versiyonlarını dönüşüm parametresine ihtiyaç duymadan kullanabileceklerdir.

3. BULGULAR

Program ve İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modelinin test edilmesi amacıyla eğitim kümelerinde kullanılmayan 16 adet nokta kullanılarak dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir.



Şekil 117. İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin Test Noktaları

Test noktalarının konumları Şekil 117 ile gösterilmektedir. Noktalara ait koordinat bilgileri ise Tablo 65 ile verilmiştir. Test noktaları, İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli'nin tasarlanması kısmında kullanılmayan noktalardan seçilmiştir. Test amaçlı olarak üretilmiş olan programa test noktaları dönüştürülmek istenen nokta olarak girilmiştir. İki Boyutlu UDDM'nin bileşenlerinden TUM Modeli (Tablo 66), TUTGA Modeli (Tablo 67), CORS Modeli (Tablo 68) ve ML Modellerine (Tablo 69) ait nokta bazlı en iyi sonuçlar tablo haline getirilmiştir.

Tablo 65. Test Noktalarının Koordinat Bilgileri

Nid	DN	UTM-ITRF-Y	UTM-ITRF-X	UTM-ED50-Y	UTM-ED50-X	LKK-ITRF-Y	LKK-ITRF-X	LKK-ED50-Y	LKK-ED50-X
1	39	522636,24	4531663,14	522649,41	4531847,61	359602,38	221564,10	359626,23	221676,62
2	39	566743,39	4526900,34	566757,86	4527085,19	403891,95	218731,80	403917,10	218844,74
3	39	609295,76	4534598,17	609311,30	4534783,71	446082,52	228274,49	446108,74	228388,17
4	39	572054,41	4535857,21	572068,94	4536042,36	408809,53	227914,69	408834,73	228027,94
5	39	542976,77	4507417,83	542990,81	4507601,87	380991,58	198224,30	381016,32	198336,40
6	39	586638,48	4533793,63	586653,42	4533978,95	423474,66	226486,91	423500,27	226600,34
7	39	514489,04	4542379,22	514501,91	4542563,87	350989,66	231917,37	351013,19	232030,06
8	39	578456,04	4535619,80	578470,74	4535805,04	415217,74	227956,09	415243,11	228069,44
9	33	475158,35	4438294,03	475186,58	4438478,24	-195417,67	122197,48	-195394,80	122308,33
10	33	475455,86	4438462,72	475484,09	4438646,93	-195116,53	122359,62	-195093,66	122470,47
11	36	373898,55	4555385,79	373918,45	4555570,01	-42144,10	235929,26	-42121,60	236040,95
12	36	374112,48	4555380,23	374132,37	4555564,46	-41930,05	235926,20	-41907,56	236037,91
13	39	455032,91	4092626,82	455047,72	4092807,37	311318,58	-220032,63	311344,25	-219923,95
14	39	455303,26	4092476,12	455318,07	4092656,68	311595,37	-220171,44	311621,04	-220062,76
15	36	424362,01	4234586,77	424383,58	4234768,51	11906,33	-84251,02	11930,61	-84141,85
16	36	424375,97	4234612,40	424397,54	4234794,14	11920,00	-84225,24	11944,29	-84116,08

Tablo 66. TUM Modelinin Dönüşüm Sonuçları

Model	ONBA	DYA	UOBA	NS	Dön-LKK-ED50-Y	Dön-LKK-ED50-X	RMSE	Vy	Vx	V	Nid
TUM	EnYakın	Projektif	IGG	6	359626,24	221676,61	0,01	0,01	-0,01	0,01	1
TUM	AçıAlan	Projektif	RANSAC	5	403917,11	218844,73	0,03	0,01	0,00	0,01	2
TUM	AçıAlan	Afin	Huber	8	446108,76	228388,21	0,02	0,02	0,04	0,05	3
TUM	EnYakın	Benzerlik	Hampel	7	408834,73	228027,94	0,02	0,00	0,00	0,00	4
TUM	AçıAlan	Afin	RANSAC	5	381016,32	198336,47	0,03	0,00	0,06	0,06	5
TUM	AçıAlan	Afin	IGG	8	423500,31	226600,35	0,01	0,03	0,01	0,04	6
TUM	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	8	351013,25	232030,10	0,02	0,05	0,04	0,07	7
TUM	EnYakın	Projektif	RANSAC	7	415243,10	228069,47	0,03	-0,02	0,04	0,04	8
TUM	AçıAlan	Afin	Hampel	7	-195394,80	122308,33	0,03	0,00	0,00	0,00	9
TUM	AçıAlan	Afin	Hampel	7	-195093,66	122470,47	0,03	0,00	0,00	0,00	10
TUM	EnYakın	Projektif	RANSAC	6	-42121,62	236040,89	0,01	-0,01	-0,06	0,06	11
TUM	AçıAlan	Projektif	TTest	8	-41907,54	236037,84	0,03	0,02	-0,06	0,07	12
TUM	AçıAlan	Projektif	RANSAC	5	311344,29	-219923,94	0,02	0,05	0,01	0,05	13
TUM	AçıAlan	Projektif	RANSAC	5	311621,09	-220062,75	0,02	0,04	0,01	0,04	14
TUM	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	11930,61	-84141,85	0,01	0,00	0,00	0,00	15
TUM	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	11944,29	-84116,07	0,02	0,00	0,00	0,00	16

Tablo 67. TUTGA Modelinin Dönüşüm Sonuçları

Model	ONBA	DYA	UOBA	NS	Dön-LKK-ED50-Y	Dön-LKK-ED50-X	RMSE	Vy	Vx	V	Nid
TUTGA	EnYakın	Projektif	RANSAC	5	359626,53	221676,65	0,18	0,30	0,03	0,30	1
TUTGA	EnYakın	Polinomsal	RANSAC	7	403917,11	218844,74	0,22	0,01	0,01	0,01	2
TUTGA	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	446108,75	228388,18	0,03	0,01	0,01	0,02	3
TUTGA	EnYakın	Projektif	TTest	5	408834,73	228027,93	0,07	0,00	-0,01	0,01	4
TUTGA	EnYakın	Projektif	IGG	5	381016,29	198336,40	0,10	-0,03	0,00	0,03	5
TUTGA	EnYakın	Benzerlik	Hampel	3	423500,26	226600,32	0,17	-0,01	-0,02	0,03	6
TUTGA	EnYakın	Projektif	RANSAC	5	351013,50	232030,20	0,18	0,31	0,14	0,33	7
TUTGA	EnYakın	Benzerlik	TTest	3	415243,12	228069,45	0,16	0,01	0,01	0,02	8
TUTGA	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	-195394,77	122308,30	0,03	0,02	-0,02	0,03	9
TUTGA	EnYakın	Afin	Danimarka	4	-195093,63	122470,46	0,07	0,03	0,00	0,03	10
TUTGA	EnYakın	Afin	RANSAC	4	-42121,60	236040,97	0,03	0,00	0,02	0,02	11
TUTGA	EnYakın	Benzerlik	Danimarka	3	-41907,57	236037,93	0,06	-0,01	0,02	0,02	12
TUTGA	EnYakın	Afin	RANSAC	4	311344,27	-219924,03	0,03	0,03	-0,08	0,09	13
TUTGA	EnYakın	Afin	RANSAC	4	311621,07	-220062,84	0,03	0,03	-0,08	0,09	14
TUTGA	EnYakın	Projektif	Tukey	5	11930,60	-84141,83	0,03	0,00	0,02	0,02	15
TUTGA	EnYakın	Projektif	Tukey	5	11944,28	-84116,05	0,03	0,00	0,02	0,02	16

Tablo 68. CORS Modelinin Dönüşüm Sonuçları

Model	ONBA	DYA	UOBA	NS	Dön-LKK-ED50-Y	Dön-LKK-ED50-X	RMSE	Vy	Vx	V	Nid
CORS	EnYakın	Projektif	Tukey	5	359626,54	221676,64	0,06	0,31	0,02	0,31	1
CORS	EnYakın	Projektif	RANSAC	5	403917,08	218844,71	0,17	-0,02	-0,02	0,03	2
CORS	EnYakın	Projektif	Huber	5	446108,63	228388,22	0,13	-0,10	0,05	0,12	3
CORS	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	408834,75	228027,93	0,39	0,02	0,00	0,02	4
CORS	EnYakın	Afin	RANSAC	4	381016,29	198336,47	0,03	-0,02	0,06	0,07	5
CORS	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	423500,33	226600,22	0,12	0,06	-0,12	0,13	6
CORS	EnYakın	Benzerlik	Andrews	3	351013,57	232030,39	0,12	0,38	0,33	0,50	7
CORS	EnYakın	Projektif	RANSAC	5	415243,17	228069,41	0,28	0,06	-0,03	0,06	8
CORS	EnYakın	Benzerlik	IGG	3	-195394,74	122308,34	0,35	0,06	0,01	0,06	9
CORS	EnYakın	Benzerlik	IGG	3	-195093,60	122470,47	0,35	0,06	0,01	0,06	10
CORS	EnYakın	Polinomsal	RANSAC	7	-42121,60	236040,95	0,26	0,01	0,00	0,01	11
CORS	EnYakın	Polinomsal	RANSAC	7	-41907,54	236037,90	0,26	0,02	-0,01	0,02	12
CORS	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	311344,25	-219923,94	0,53	0,00	0,01	0,01	13
CORS	EnYakın	Benzerlik	RANSAC	3	311621,05	-220062,74	0,53	0,00	0,01	0,01	14
CORS	EnYakın	Benzerlik	Andrews	3	11930,57	-84141,83	0,22	-0,03	0,03	0,04	15
CORS	EnYakın	Benzerlik	Andrews	3	11944,25	-84116,05	0,22	-0,03	0,03	0,04	16

Tablo 69. ML Modellerinin Dönüşüm Sonuçları

ML Modeli	Dön-LKK-ED50-Y	Dön-LKK-ED50-X	Vy	Vx	V	Nid
TPS	359626,27	221676,60	0,04	-0,02	0,05	1
TPS	403917,16	218844,71	0,06	-0,03	0,07	2
TPS	446108,85	228388,27	0,11	0,10	0,15	3
TPS	408834,74	228027,95	0,01	0,01	0,02	4
TPS	381016,36	198336,52	0,04	0,12	0,12	5
TPS	423500,35	226600,35	0,08	0,01	0,08	6
TPS	351013,33	232030,13	0,14	0,07	0,15	7
TPS	415243,15	228069,47	0,04	0,03	0,05	8
TPS	-195394,82	122308,31	-0,03	-0,02	0,03	9
TPS	-195093,68	122470,45	-0,02	-0,01	0,03	10
Kriging	-42121,58	236041,03	0,03	0,08	0,08	11
Kriging	-41907,52	236037,97	0,04	0,06	0,07	12
BPANN	311344,24	-219923,95	-0,01	0,00	0,01	13
BPANN	311621,04	-220062,76	0,00	0,00	0,00	14
TPS	11930,58	-84141,91	-0,02	-0,06	0,06	15
TPS	11944,26	-84116,13	-0,02	-0,06	0,06	16

Tablo 70. Modellerin Dönüşüm Sonuçlarının Karşılaştırması

Nid	TUM_V	TUTGA_V	CORS_V	ML_V
1	0,01	0,30	0,31	0,05
2	0,01	0,01	0,03	0,07
3	0,05	0,02	0,12	0,15
4	0,00	0,01	0,02	0,02
5	0,06	0,03	0,07	0,12
6	0,04	0,03	0,13	0,08
7	0,07	0,33	0,50	0,15
8	0,04	0,02	0,06	0,05
9	0,00	0,03	0,06	0,03
10	0,00	0,03	0,06	0,03
11	0,06	0,02	0,01	0,08
12	0,07	0,02	0,02	0,07
13	0,05	0,09	0,01	0,01
14	0,04	0,09	0,01	0,00
15	0,00	0,02	0,04	0,06
16	0,00	0,02	0,04	0,06

Tablolardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dört farklı dönüşüm modelinin hata dağılımları ve performans istikrarları açısından belirgin farklılıklar sergilediği görülmektedir. V ile RMSE değerleri bir arada değerlendirildiğinde (Tablo 70), TUM modelinin tüm performans kriterlerinde öne çıktığı açıktır. Bu model, ortalama hata açısından en düşük değere (0,03125) sahip olup maksimum hata (0,07) açısından da en

istikrarlı sonucu vermektedir. Bu durum, TUM modelinin hem doğruluk hem de güvenilirlik bakımından üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

TUTGA modeli (Tablo 67), RMSE açısından ML modeline (Tablo 69) yakın bir başarı sergilese de (0,0556), görece yüksek oluşu, bazı noktalarda hataların artmasına neden olmaktadır. Bu model özellikle belirli bölgelerde iyi sonuçlar üretse de performansının homojen olmadığı anlaşılmaktadır. ML modelleri ise (özellikle TPS, Kriging ve BPANN) klasik yöntemlere kıyasla belirli noktalarda yüksek doğruluk sağlasa da ortalama hata (0,0575) değeri, modelin tutarlılık açısından TUM'a göre daha zayıf olduğunu göstermektedir.

CORS modeli (Tablo 68) ise hata seviyeleri bakımından en yüksek değerlere sahip olup, RMSE (0,0931) ve V (0,50) sonuçlarıyla diğer modellere kıyasla en düşük güvenilirlik düzeyini sergilemektedir. Özellikle bazı test noktalarında (örneğin Nid 7) hataların çok yüksek çıkması, modelin bölgesel hassasiyetinin düşük olabileceğini ve homojen bir performans sergileyemediğini göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, TUM modeli (Tablo 66) hem doğruluk hem de hata dağılımındaki homojenlik açısından en uygun dönüşüm yöntemi olarak öne çıkmaktadır. TUTGA ve ML modelleri belirli koşullarda tatmin edici sonuçlar üretse de performanslarının TUM'a kıyasla daha değişken olduğu görülmektedir. CORS modeli ise mevcut sonuçlara göre en düşük doğruluk ve güvenilirlik seviyesini sunmakta, bu nedenle kritik hassasiyet gerektiren uygulamalarda öncelikli tercih edilmemelidir.

Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde, Türkiye genelinde iki boyutlu datum dönüşüm işlemlerinin çalışmamız sonucunda üretilen ve TUM, TUTGA, CORS ve ML Modellerinin birleşiminden oluşan İki Boyutlu UDDM ile dışarıdan ek parametre teminine ihtiyaç duymadan BÖHHBÜY kapsamında gerekli jeodezik doğrulukları sağlayarak masaüstü, web veya mobil platformlarda gerçekleştirilebileceği ortaya konmuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, ED50–ITRF96 (2005.0) datumları arasındaki iki boyutlu dönüşüm işlemlerini, klasik koordinat dönüşüm algoritmaları ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler bir arada kullanarak Türkiye genelinde ve nokta bazlı olarak optimize etmeyi amaçlamıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen Türkiye Ulusal Datum Dönüşüm Modeli (UDDM), dört ana bileşenden oluşmaktadır:

- TUM Modeli: 7.313 adet nokta kullanılarak oluşturulmuş hem klasik hem robust yöntemlerle dönüşüm parametrelerini hesaplayıp, tüm kombinasyonları karşılaştırarak en düşük RMSE ve maksimum düzeltme kriterine göre en iyi sonucu sunan modeldir.
- TUTGA Modeli: 611 adet TUTGA noktasının ED50 koordinatlarının hesaplanmasıyla oluşturulmuş, küçük ortak nokta kümeleri (3–5 nokta) ile optimum dönüşüm parametrelerini üreten modeldir.
- CORS Modeli: 181 adet CORS noktasının ED50 koordinatlarının hesaplanmasıyla oluşturulmuş küçük ortak nokta kümeleri (3–5 nokta) ile optimum dönüşüm parametrelerini üreten modeldir.
- ML Modeli: ANN, LR, SVR, GPR, TPS, Kriging, Bayesyen ve Fraktal tabanlı yöntemlerden oluşan, TUM Modelinin ortak nokta kümesi ile eğitilmiş ve ek ortak nokta gerektirmeden dönüşüm yapabilen makine öğrenmesi modelleridir.

Çalışma süresince LKK projeksiyonu kullanılarak, UTM projeksiyonunun 3° dilim probleminden kaynaklanan dilim numarası ve geçiş hataları ortadan kaldırılmıştır. LKK, ülke geneli uygulamalar için UTM'e güçlü bir alternatif olarak güvenilir biçimde kullanılmıştır.

Nokta seçiminde en yakın nokta algoritması, çoğu durumda açı alan algoritmasına göre %7–25 daha düşük hata üretmiş, ancak bu sınır bölgelerde açı alan algoritmasının doğru bir şekilde çalışamamasından kaynaklanmaktadır. Uyuşumsuz ölçü belirlemede RANSAC, IGG, t-testi ve Tukey yöntemleri en başarılı performansı göstermiştir.

Klasik iki boyutlu dönüşüm modelleri karşılaştırıldığında, polinomsal dönüşüm en yüksek doğruluğu sağlamış, afin ve dönüşümler onu takip etmiş ve benzerlik dönüşümü ise en düşük doğruluğu üretmiştir.

İki Boyutlu Ulusal Datum Dönüşüm Modeli, tüm modellerin sonuçlarını inceleyerek en başarılı sonucu kullanıcıya sunar.

Noktaların öncül ağırlıkları tüm analizlerde 1 (bir) olarak alınmıştır. ED50–ITRF96 dönüşümlerinde zamana bağlı yer değiştirme (jeodinamik stabilite) etkisi göz ardı edilmiş olup, farklı epoklar arası dönüşümler için hız bileşenlerinin dikkate alınması bundan sonraki çalışmalar için gerekli olmalıdır. Bu hız parametrelerinin de Türkiye'deki tektonik hareketlerin farklı olduğu bölgeler için ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir.

Sonuçlar:

• TUM modeli hem RMSE (%100 oranında ±3 cm den küçük) hem sapma analizinde (%99 oranında V <10 cm) en dengeli ve güvenilir sonuçları vermiştir.

• ML modeli, özellikle TPS, Kriging ve GPR yöntemleriyle TUM'a yakın performans göstermiştir (%87 V <10 cm).

• TUTGA (RMSE, %85 oranında ±9 cm den küçük) ve CORS (RMSE, %71 oranında ±9 cm den küçük) modelleri, talep edilen RMSE değerini çoğu durumda sağlasa da V (±50 cm den küçük) değerlerinde TUM ve ML'ye kıyasla daha düşük performans sergilemiştir.

• ML modellerinden Fraktal tabanlı yöntem, yüksek hata üretmiş ve önerilmemektedir.

• UDDM'nde ortak nokta sayısı için 3–13 aralığı en uygun değer aralığıdır.

• Polinomsal ve afin dönüşümler, robust yöntemlerle desteklendiğinde optimum sonuç vermektedir.

• RANSAC yöntemi hem TUTGA hem CORS dönüşümlerinde en düşük RMSE'yi sağlamıştır.

• LKK projeksiyonu, UTM'in dilim numarası ve geçiş sorunlarını ortadan kaldırmış, Türkiye geneli için güvenilir sonuçlar sağlamıştır.

• Programın masaüstü, web ve mobil versiyonları tasarlanarak farklı platformlarda erişilebilirliği sağlanmıştır.

Öneriler:

• Ulusal ölçekte tek bir model yerine nokta bazlı model yaklaşımı kullanılmalıdır. Bu yöntem, bölgesel bozulmaların üzerini örten genel model hatalarını minimize eder ve yerel uyum–ulusal genelleme dengesini korur.

• Ortak nokta kümesi, programın kullanıcılara sunulmasından sonra gelecek geri bildirimlere göre güncellenebilir, ML modelleri her güncelleme sonrası yeniden eğitilmelidir.

• ED50–ITRF96 dışındaki farklı datum ve epok dönüşümleri için de model kolayca uyarlanabilir; kullanıcı tarafından oluşturulan yeni ortak nokta kümesinin modele girilmesiyle dönüşüm yapılabilir.

• Kritik hassasiyet gerektiren uygulamalarda TUM modeli birincil tercih olmalı, ML yöntemleri ise klasik yöntemlerle doğrulanarak kullanılmalıdır.

• TUTGA ve CORS Modelleri Yönetmelik kapsamında istenilen jeodezik hassasiyetin dışındaki, özellikle CBS, Fotogrametri ve Uzaktan Algılama uygulamalarında ±50cm altında hassasiyetle kullanılabilir.

• Oluşturulan modeller farklı datumlar ve epoklar için de kullanılabilir. Uygulamanın kullandığı ortak nokta kümesinin, ED50-ITRF96 (2005.0 epoğu), değiştirilmesi durumunda farklı datumlar içinde dönüşüm yapılabilir.

• Epok dönüşümleri için hız değerleri dikkate alınmalı, farklı tarihlerdeki koordinatlar için jeodinamik etkiler hesaba katılmalıdır.

5. KAYNAKLAR

Aksoy, A. (1987). Türkiye'de kadastro faaliyetlerinde nirengi sistemi sorunu.

Aktug, B., Seymen, S., Kurt, M., Parmaksiz, E., Lenk, O., Sezer, S. & Özdemir, S. (2011). "ED-50 (european datum-1950) ile TUREF (türkiye ulusal referans çerçevesi) arasinda datum dönücsümü (datum transformation between ED-50 (european datum-1950) and TUREF (turkish national reference frame)", 146.

Akyürek, S. & Akkol, S. (2018). "Yumurta iç kalite özelliklerinin kısmi en küçük kareler regresyonu kullanılarak tahmin edilmesi", Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi, 28(4), 473-481.

Algan, H. (1963). Memleketin ilk haritaları ve 1: 200 000 ölçekli istikşaf haritamız.

Algül, E. (1985). "Türkiye hidrografi tarihçesi", Harita Dergisi, 61-67.

Altamimi, Z. (2009). "The international terrestrial reference frame (ITRF2005)", International Association of Geodesy Symposia, 27, 81-82.

Altamimi, Z., Collilieux, X. & Boucher, C. (2008). "Accuracy assessment of the ITRF datum definition", International Association of Geodesy Symposia, 101-110.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L. & Collilieux, X. (2016). "ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(8), 6109-6131.

Altamimi, Z., Sillard, P. & Boucher, C. (2002). "ITRF2000: a new release of the international terrestrial reference frame for earth science applications", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B10), 2-1-2-19.

Amans, C., Beiping, W. & Yevenyo Ziggah, Y. (2013). "Testing simple regression model for coordinate transformation by comparing its predictive result for two regions", Academic Research International, Volume 4, 540.

Ansari, K., Corumluoglu, O. & Yetkin, M. (2017). "Projectivity, affine, similarity and euclidean coordinates transformation parameters from ITRF to EUREF in turkey", Journal of Applied Geodesy, 11(1), 53-61.

Aryana, N. (2021). "Proficiency testing for determination of pesticides residues in black tea: Comparison of three robust statistical approaches based on ISO 13528 to estimate the consensus values for small number of participants", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1011(1), 012029.

Aygün, A. (1980a). Haritacı mehmet şevki paşa ve türk haritacılığı tarihi.

Aygün, A. (1980b). Türk haritacılık tarihi, cilt 1.

Aygün, A. (1980c). Türk haritacılık tarihi, cilt 2.

Ayhan, E. & Demir, C. (1992). "Türkiye ulusal düşey kontrol (nivelman) ağı-1992 (TUDKA-92)", Harita Dergisi, 31.

Ayhan, E. M. & Barut, V. (2000). "Türkiye'de kullanılan datumlar arasındaki ilişkinin incelenmesi", Harita Dergisi, 27-40.

Baiocchi, V., Deligios, M., Giannone, F. & Timar, G. (2019). "Reconstruction of historical geodetic systems for their implementation in reprojection algorithms", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W11, 127-131.

Bakici, S., Erkek, B., İlbey, A. & Kulaksiz, E. (2017). "Businnes model of cors-tr (tusaga-aktif)", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-4/W4, 109-116.

Bar-Gera, H. (2017). "The target parameter of adjusted r-squared in fixed-design experiments", American Statistician, 71(2), 112-119.

Barnard, H. (2014). "Surveying in ancient egypt", Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures, 1-5.

BEAZLEY, C. R. (1904). "The first true maps", Nature, 71(1833), 159-161.

Bengio, Y., Courville, A. & Vincent, P. (2013). "Representation learning: a review and new perspectives", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 35(8), 1798-1828.

Berk, S. & Komadina, Ž. (2013). "Local to ETRS89 datum transformation for slovenia: triangle-based transformation using virtual tie points", Survey Review, 45(328), 25-34.

Bettinger, P., Merry, K. & Boston, K. (2020). "Map reference systems", Mapping Human and Natural Systems, 131-187.

Biesheuvel, H. (1956). "Maps and land use", Empire Survey Review, 13(102), 342-353.

Bloßfeld, M., Zeitlhöfler, J., Rudenko, S. & Seitz, M. (2025). "Application of ITRS 2020 realizations for the SLR-based POD of selected geodetic and earth-observing satellites".

Bookstein, F. L. (1989). "Thin-plate splines and decomposition of deformation".

Cavieres, J., Moraga, P. & Monnahan, C. C. (2024). "Why not a thin plate spline for spatial models? A comparative study using Bayesian inference".

Chilès, J. P. & Delfiner, P. (2012). "Geostatistics : Modeling Spatial Uncertainty Ed. 2".

Chui, H. & Rangarajan, A. (2003). “A New Point Matching Algorithm for Non-Rigid Registration”, Computer Vision and Image Understanding, 89, 114-141.

Çelik, R. N. & Marangoz, R. M. (2005). “Turkish national fundamental GPS network (TUTGA) and its applications”.

Çinar, S. & Bünyan Ünel, F. (2022). “2/B orman vasfını yitirmiş araziden tarım arazisine dönüşen taşınmazların toplu değerlemesi”, Geomatik, 7(2), 112-127.

Dawson, J. & Woods, A. (2010). “ITRF to GDA94 coordinate transformations”, Journal of Applied Geodesy, 4(4).

Demircan, M. (1982). “İstanbul’da harita hizmetleri”.

Dennis, M. L. (2022). “Map projections and local coordinate systems”, Surveying and Geomatics Engineering, 29-83.

Dilmaç, H. & Şişman, Y. (2023). “New approaches for outlier detection: the least trimmed squares adjustment”, International Journal of Engineering and Geosciences, 8(1), 26-31.

Donato, G. & Belongie, S. (2001). Approximate Thin Plate Spline Mappings, Lecture Notes in Computer Science.

Draper, N. R. (1998). “Applied regression analysis bibliography update 1994-97”, Communications in Statistics-theory and Methods, 27, 2581-2623.

Drewes, H. (2009). “Geodetic reference frames”, International Association of Geodesy Symposia, 17, 39-44.

Duchon, J. (1976). “Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces”, Constructive Theory of Functions of Several Variables.

Elshambaky, H. T., Kaloop, M. R. & Hu, J. W. (2018). “A novel three-direction datum transformation of geodetic coordinates for egypt using artificial neural network approach”, Arabian Journal of Geosciences, 11(6), 1-14.

Ercan, O. (2023). “Evolution of the cadastre renewal understanding in türkiye: a fit-for-purpose renewal model proposal”, Land Use Policy, 131, 106755.

Erdoğan, B., Durdağ, U., Doğan, A. & Öcalan, T. (2018). “İki boyutlu koordinat dönüşümünde en küçük kareler ve toplam en küçük kareler yöntemlerinin performansı”, Geomatik, 3(3), 254-261.

Erokan (1966). “Türkiye Ana Nirengi Şebekesi”, Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi.

Falconer, K. J. (2003). Fractal geometry: mathematical foundations and applications. Chichester Hoboken (N.J.).

Faruk Yıldırım (2004). Examining alternative methods for zone based UTM system. Karadeniz Teknik Üniversitesi.

Ferry, J., Aïvodji, U., Gambs, S., Huguet, M.-J. & Siala, M. (2023). "Improving fairness generalization through a sample-robust optimization method", Machine Learning, 112(6), 2131-2192.

Fischler, M. A. & Bolles, R. C. (1981). "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", Commun. ACM, 24, 381-395.

Fuat Başçiftçi & Cevat Inal (2008). "Jeodezide kullanilan bazi koordinat dönüşümlerinin programlanmasi".

Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A. & Rubin, D. B. (2013). Bayesian Data Analysis.

Ghilani, C. D. (2006). "Adjustment Computations: Spatial Data Analysis".

Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A. & Bengio, Y. (2020). "Generative adversarial networks", Communications of the ACM, 63(11), 139-144.

Goshtasby, A. (1988). "Image registration by local approximation methods", Image Vis. Comput., 6, 255-261.

Grafarend, E. & Okeke, F. (2007). "Transformation of lambert conic conformal coordinates from a global datum to a local datum", Marine Geodesy, 30(4), 297-313.

Grafarend, E. W., You, R. J. & Syffus, R. (2006). "Map Projections: Cartographic Information Systems", Map Projections.

Gullu, M., Yilmaz, M. & Baybura, T. (2017). "Comparative analysis of least-squares approaches for 3D datum transformation in western turkey", Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering, 17(3), 1019-1029.

Hacıömeroğlu, A. (2009). "Transformation between ED50 and ITRF96 datum in Turkey", Journal of Surveying Engineering, (135(3)), 117-124.

Hampel, F. R. (1974). "The influence curve and its role in robust estimation", Journal of the American Statistical Association, 69(346), 383-393.

Haras, S. J. P., Marwan, M. & B, S. (2024). "The position of land ownership certificates in settlement of inheritance disputes", Jihad : Jurnal Ilmu Hukum Dan Administrasi, 6(3).

Harita Genel Komutanlığı (1988c "Türkiye I. Derece yatay kontrol ağının 1954 yılı dengelemesine göre konum hataları", Harita Dergisi.

Harrell, J. A. (2008). "Maps and mapmaking in egypt: turin papyrus map", Selin, H. (ed.) Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-western Cultures. Dordrecht, 1-14.

Hartmann, J. (1990). “Fractals everywhere. Von MICHAEL BARNSLEY. ISBN 0-12-079062. Boston/San Diego/New York/et al.: Academic Press Inc. 1988. XII, 394 S., geb., US $39.95”, Acta Polymerica, 41, 362-362.

Hayford, J. F. (1909). “The figure of the earth and isostasy from measurements in the united states”.

Haykin, S. S. (2010). “Neural Networks and Learning Machines”.

Heaton, J. (2017). “Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville: Deep learning: The MIT Press, 2016, 800 pp, ISBN: 0262035618”, Genetic Programming and Evolvable Machines, 19.

Hekimoğlu, Ş. (1997). “Finite sample breakdown points of outlier detection procedures”, Journal of Surveying Engineering, 123(1), 15-31.

Hinton, G. E., Osindero, S. & Teh, Y.-W. (2006). “A fast learning algorithm for deep belief nets”, Neural Computation, 18(7), 1527-1554.

HKMO (1975). “III. Genel kurul toplantı bülteni”.

Hoerl, A. E., Kannard, R. W. & Baldwin, K. F. (1975). “Ridge regression:some simulations”, Communications in Statistics, 4(2), 105-123.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2007). “GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more”.

Hohn, M. E. (1991). “An Introduction to Applied Geostatistics: by Edward H. Isaaks and R. Mohan Srivastava, 1989, Oxford University Press, New York, 561 p., ISBN 0-19-505012-6, ISBN 0-19-505013-4 (paperback), \55.00 cloth, \35.00 paper (US)”, Computers & Geosciences, 17, 471-473.

Hornik, K., Stinchcombe, M. & White, H. (1989). “Multilayer feedforward networks are universal approximators”, Neural Networks, 2(5), 359-366.

Howarth, R. J. (1979). “(A. G.) Journel and (Ch. J.) Huijbregts. Mining Geostatistics. London & New York (Academic Press), 1978. x + 600 pp., 267 figs. Price £32·00.”, Mineralogical Magazine, 43, 563-564.

Huber, P. J. & Ronchetti, E. M. (2009). “Robust statistics”, Wiley Series in Probability and Statistics.

J. D. Dodo, T. A. Yakubu, E. S. Usifoh & A. Bojude (2011). “ITRF 2008 realization of the nigerian geocentric datum (GDN2012) : preliminary results”, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences.

Jauregui, J. C. (2014). “Parameter identification”, Parameter Identification and Monitoring of Mechanical Systems Under Nonlinear Vibration, 87-105.

Jenny, B. & Šavrič, B. (2017). "Enhancing adaptive composite map projections: wagner transformation between the lambert azimuthal and the transverse cylindrical equal-area projections", Cartography and Geographic Information Science, 45(5), 456-463.

Kalu, I., Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O. & Eyoh, A. E. (2022). "Estimating the seven transformational parameters between two geodetic datums using the steepest descent algorithm of machine learning", Applied Computing and Geosciences, 14, 100086.

Schaffrin B. (2008)., "Kapitel 10 transformationen", Ausgleichungsrechnung, 342-378.

Kayra, C. (1990). "Ortaçağdan günümüze istanbul haritaları".

Kısa, A., Erkek, B. & Ekin, L. (2012). "Datum transformation of spatial data and application in cadastre", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B4, 13-17.

Kiliçoğlu, A. (2004). "Türkiye ulusal temel GPS ağı (TUTGA) ve GPS sistemleri", Harita Dergisi, 2-12.

Kinbay, C. (1938). "Türkiye cumhuriyetinde fotogrametri işleri ve 1937 senesi nihayetinde fotogrametri vaziyeti", Harita Dergisi, 83-85.

Kirici Yildirim, U., Günaydin, N. & Şişman, Y. (2022). "Koordinat dönüşüm parametrelerinin uygulama alanı dışında uygunluğunun araştırılması", Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 7(4), 523-527.

Kitchenham, B., Madeyski, L., Budgen, D., Keung, J., Brereton, P., Charters, S., Gibbs, S. & Pohthong, A. (2017). "Robust Statistical Methods for Empirical Software Engineering", Empirical Software Engineering, 22(2), 579-630.

Knoche, W. & Zentrum für Interdisziplinäre Forschung (eds) (1989). Reactions in compartmentalized liquids: proceedings of a symposium held at the Zentrum für interdisziplinäre Forschung, Bielefeld/FRG, September 11 - 14, 1988; with 13 tables. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo.

Koch, K.-R. (1999). "Hypothesis testing, interval estimation and test for outliers".

Konakoglu, B. (2020a). "Çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı ile jeodezik elipsoidal koordinatların (φ, λ, h) 3 boyutlu global kartezyen koordinatlara (X, Y, Z) dönüşümü", Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10.

Konakoglu, B. (2021). "Prediction of geodetic point velocity using MLPNN, GRNN, and RBFNN models: a comparative study", Acta Geodaetica et Geophysica, 56(2), 271-291.

Konakoglu, B., Cakır, L. & Gökalp, E. (2016). "2d coordinate transformation using artificial neural networks", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W1, 183-186.

Koyuncu, F. (1982). "Fotogrametri alanında türkçe yayınlar-2".

Küreç Nehbit, P., Heinkelmann, R., Schuh, H., Glaser, S., Lunz, S., Mammadaliyev, N., Balidakis, K., Konak, H. & Tanır Kayıkçı, E. (2020). "Evaluation of VLBI observations with sensitivity and robustness analyses", Mathematics, 8(6), 939.

Lambrinos, J. (1984). "Applied linear regression models", Technometrics, 26(4), 415-416.

Lapaine, M. & Frančula, N. (2022). "Map projections classification", Geographies, 2(2), 274-285.

Liu, J., Chen, J., Liu, P., Tan, W., Dong, D. & Qu, W. (2021). "Comparison and assessment of three ITRS realizations", Remote Sensing, 13(12), 2304.

Lopes, R. & Betrouni, N. (2009). "Fractal and multifractal analysis: A review", Medical Image Analysis, 13(4), 634-649.

M. T. Hagan & M. B. Menhaj (1994). "Training feedforward networks with the Marquardt algorithm", IEEE Transactions on Neural Networks, 5(6), 989-993.

Maity, R. & Kumar, D. N. (2008). "Basin-scale stream-flow forecasting using the information of large-scale atmospheric circulation phenomena", Hydrological Processes, 22.

Matheron, G. (1963). "Principles of geostatistics", Economic Geology, 58, 1246-1266.

McCarthy, D. D. & Petit, G. (2004). "IERS conventions", Finkelstein, A. & Capitaine, N. (eds) Proceedings of the Journées 2003 "systèmes Deréférence Spatio-temporels": Astrometry, 11-17.

Moore, T. (2009). "Datums and map projections: for remote sensing, GIS and surveying", Photogrammetric Record, 24(128), 390-391.

Moritz, H. (1984). "Geodetic reference system 1980", Bulletin Géodésique, 58(3), 388-398.

Murphy, K. P. (2012). Machine learning: a probabilistic perspective.

Ng, A. Y. (2004). "Feature selection, L1 vs. L2 regularization, and rotational invariance", Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning. New York, NY, USA (ICML '04), 78.

Nihat Ersoy (2019). "Historical duration of base triangulation network of turkey", International Journal of Scientific and Technological Research.

Onur Lenk, Ali Türkezer & Semih Ergintav (2003) "Monitoring the kinematics of anatolia using permanent GPS network stations", Turkish Journal of Earth Sciences.

Ott, E. (2002). "Chaos in Dynamical Systems - 2nd Edition".

Öcalan, T. (2019). “Investigation on the effects of number of common points in 2D transformation problem”, International Journal of Engineering and Geosciences, 4(2), 58-62.

Öğütcü, S. (2018). “Deformation of static datum: turkish CORS network (TUSAGA-aktif) is considered”, Acta Geodaetica et Geophysica, 53(3), 543-553.

Özlüdemir, M. T. & Akçın, H. (2005). “Türkiye’de datum dönüşüm parametrelerinin belirlenmesi ve analizi”, Harita Dergisi, 34-45.

Petr Vaníček (2019). “On the correct determination of transformation parameters of a horizontal geodetic datum”, Geoinformatica.

Portnoy, S. & He, X. (2000). “A robust journey in the new millennium”, Journal of the American Statistical Association, 95(452), 1331-1335.

Powell, S. & Mühr, H. (2020). “Capturing the complex histories of german world war II captured maps”, Journal of Map & Geography Libraries, 16(2), 166-193.

Qihe Yang, John P. Snyder & Waldo R. Tobler (1999). “Map projection transformation”.

Qin, Y., Fang, X., Zeng, W. & Wang, B. (2020). “General total least squares theory for geodetic coordinate transformations”, Applied Sciences, 10(7), 2598.

Rapp, R. H. (1963). “A consideration of hayford’s best fitting ellipsoid data using the differential change equations of vening meinesz”, Geofisica pura e applicata, 54(1), 1-5.

Rapp, R. H. (1991). Geometric geodesy.

Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I. (2005). “Gaussian Processes for Machine Learning”, Adaptive computation and machine learning.

Rawlings, J. O., Pantula, S. G. & Dickey, D. A. (1988). “Applied Regression Analysis: A Research Tool”.

Rawlins, D. (1982). “The eratosthenes-strabo nile map. Is it the earliest surviving instance of spherical cartography? Did it supply the 5000 stades arc for eratosthenes’ experiment?”, Archive for History of Exact Sciences, 26(3), 211-219.

Rees, M. & Cressie, N. (1993). “5. Statistics for Spatial Data”, Journal of The Royal Statistical Society Series A-statistics in Society, 156, 126-127.

Reith Ulrich & Szabo Tomas (2020). “Method and system for providing transformation parameters”.

Resmi Gazete, (2005). Büyük ölçekli harita ve harita bilgileri üretim yönetmeliği.

Resmi Gazete. (2014). Orman kadastrosu ve 2/B uygulama yönetmeliği.

Rousseeuw, P. J. (1984). “Least median of squares regression”, Journal of the American Statistical Association, 79(388), 871-880.

Rummel, R., Rothacher, M. & Beutler, G. (2005). “Integrated global geodetic observing system (IGGOS)—science rationale”, Journal of Geodynamics, 40(4-5), 357-362.

Sambridge, M. & Mosegaard, K. (2002). “MONTE CARLO METHODS IN GEOPHYSICAL INVERSE PROBLEMS”, Reviews of Geophysics, 40(3), 3-1.

Samsonov, T. E. (2020). “Automated Conflation of Digital Elevation Model with Reference Hydrographic Lines”, ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(5), 334.

Samui, P. (2008). “Support vector machine applied to settlement of shallow foundations on cohesionless soils”, Computers and Geotechnics, 35, 419-427.

Schölkopf, B. & Smola, A. J. (2002). Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond.

Schuh, H., Ulrich, M., Egger, D., Müller, J. & Schwegmann, W. (2002). “Prediction of earth orientation parameters by artificial neural networks”, Journal of Geodesy, 76(5), 247-258.

Seeber, G. (2003). Satellite geodesy.

Seeger, M. W. (2004). “Gaussian Processes For Machine Learning”, International journal of neural systems, 14 2, 69-106.

Seitz, M., Angermann, D. & Drewes, H. (2012). “Accuracy assessment of the ITRS 2008 realization of DGFI: DTRF2008”, International Association of Geodesy Symposia, 87-93.

Seyyarer, E., Karci, A. & Ateş, A. (2022). “Stokastik ve deterministik hareketlerin optimizasyon süreçlerindeki etkileri”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37(2), 949-966.

Simon Kettle (2016). The central european net (CEN), The European Datum: a History.

Sisman, Y. (2005). “Uyuşumsuz ölçü gruplarının belirlenmesi yöntemleri (The methods used for determınıng outliers)”.

Sisman, Y. (2013). “A full-factorial design approach for coordinate transformation”, Arabian Journal for Science and Engineering, 39(1), 227-235.

Sisman, Y. (2014). “Coordinate transformation of cadastral maps using different adjustment methods”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 37(7), 869-882.

Snyder, J. P. & Voxland, P. M. (1989). “An album of map projections”, Professional Paper.

Solé, J. L. (2007). “Book review: Pattern recognition and machine learning. Cristopher M. Bishop. Information Science and Statistics. Springer 2006, 738 pages.”, Sort-statistics and Operations Research Transactions, 31.

Soler, T. & Han, J.-Y. (2020). “Determination of the parameters of the triaxial earth ellipsoid as derived from present-day geospatial techniques”, GPS Solutions, 24(4).

Soycan, M. & Soycan, A. (2008). “Transformation of 3D GPS cartesian coordinates to ED50 using polynomial fitting by robust re-weighting technique”, Survey Review, 40(308), 142-155.

Soycan, M., Soycan, A. & Tunalıoğlu, N. (2017). “Transformation of distorted geodetic networks to new coordinate reference systems: a case study for ED50-ITRFXX transformation in turkey”, Geodetski vestnik, 61(01), 58-75.

Şahin, M. (1994). “Türkiye’de kullanılan harita projeksiyon sistemleri”, Harita Dergisi, 12(109), 15-27.

Tierra, A., Dalazoana, R. & De Freitas, S. (2008). “Using an artificial neural network to improve the transformation of coordinates between classical geodetic reference frames”, Computers & Geosciences, 34(3), 181-189.

Tkgm, H. (2009). “Türkiye ulusal sabit GNSS istasyonları ağı-aktif projesi(TUSAGA-aktif)”.

Třasák, P. & Štroner, M. (2014). “Outlier detection efficiency in the high precision geodetic network adjustment”, Acta Geodaetica et Geophysica, 49(2), 161-175.

URL-1. (2025). Yatay Kontrol Ağı poligon zincirleri ve Meşedağ noktası: https://www.harita.gov.tr/jeo/nirengiAgi.php adresinden alındı

URL-2 (2025). Projektif dönüşüm: https://medium.com/@unifyßai/part-ii-projective-transformations-in-2d-2e99ac9c7e9f adresinden alındı

URL-3 (2025). Polinomsal dönüşüm:https://www.esri.com/ about/newsroom/arcuser/understanding -raster-georeferencing adresinden alındı

URL-4 (2025). TUTGA Noktaları:https://www.osmaniye.edu.tr/uploads/arsiv/dosyalar /harita/Resimler/jeodezi3.PNG alresinden alındı.

Vaníček, P. K. & J, E. (1986). Geodesy: the concepts.

Vapnik, V. N. (1998). Statistical learning theory.

Wahba, G. (1990). “Spline Models for Observational Data”.

Wang, K., Ye, S., Gao, P., Yao, X. & Zhao, Z. (2022). “Optimization of Numerical Methods for Transforming UTM Plane Coordinates to Lambert Plane Coordinates”, Remote Sensing, 14(9), 2056.

Watson, G. A. (2006). “Computing helmert transformations”, Journal of Computational and Applied Mathematics, 197(2), 387-394.

Willoughby, R. A. (1979). “Solutions of Ill-Posed Problems (A. N. Tikhonov and V. Y. Arsenin)”, SIAM Review, 21(2), 266-267.

Xue, A., Kong, H., Lao, Y., Xu, Q., Lin, Y., Wang, L., Xu, F., Leng, S., Yuan, Z. ve Wei, G. (2020). “A New Robust Identification Method for Transmission Line Parameters Based on ADALINE and IGG Method”, IEEE Access, 8, 132960-132969.

Yang, Y. (1999). “Robust estimation of geodetic datum transformation”, Journal of Geodesy, 73(5), 268-274.

Yildirim, F. & Kadi, F. (2021). “Proposed single-zone map projection system for turkey”, Reports on Geodesy and Geoinformatics, 112(1), 35-45.

Yilmaz, N. (2023). “2d helmert and affine coordinate transformation using the least squares method: trabzon province in turkey”.

Yurdakul, Ö. & Kalaycı, İ. (2022). “The effect of GLONASS on position accuracy in CORS-TR measurements at different baseline distances”, International Journal of Engineering and Geosciences, 7(3), 229-246.

Zeng, H. E. (2014). “Geodetic datum transformation and inverse transformation”, Applied Mechanics and Materials, 501-504, 2154-2157.

Zeng, H., Fang, X., Chang, G. & Yang, R. (2018). “A dual quaternion algorithm of the helmert transformation problem”, Earth, Planets and Space, 70(1).

Ziggah, Y. Y., Youjian, H., Laari, P. B. & Hui, Z. (2017). “Novel approach to improve geocentric translation model performance using artificial neural network technology”, Boletim De Ciências Geodésicas, 23(1), 213-233.

Ziggah, Y. Y., Youjian, H., Tierra, A., Konaté, A. A. & Hui, Z. (2016). “Performance evaluation of artificial neural networks for planimetric coordinate transformation—a case study, ghana”, Arabian Journal of Geosciences, 9(17), 698.

勝也本田 (1994). “H.-O. Peitgen, H. Jurgen and D. Saupe, Chaos and Fractals-New Frontiers of Science, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1992, xvi+984p., 18.5×24cm, 12,250円”.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini, Harzemşahlar İlköğretim Okulu, Kentkoop İlköğretim Okulu, Sofuoğlu İlköğretim Okulu, Hamdullah Suphi İlköğretim Okulu ve Hasan Ali Yücel İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimine 2010 yılında Çankaya Tapu Kadastro Anadolu Meslek Lisesi'nde başlayıp 2012 yılından itibaren Trabzon Endüstri, Meslek, Anadolu Teknik ve Denizcilik Anadolu Teknik Listesi'nde Haritacılık Bölümüne devam ederek 2014 yılında bölüm birinciliği ile mezun olmuştur. 2014-2015 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018 yılında bölüm birinciliği ile mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim dalında bütünleşik doktora programına başladı. 2015 yılında Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğünde Harita Teknisyeni unvanı ile göreve başlamış, aynı yıl TEİAŞ 14.Bölge Müdürlüğünde Harita Teknisyeni olarak hizmetine devam etmiş ve 2022 yılından bu yana TEİAŞ Genel Müdürlüğüne bağlı olarak Harita Mühendisli unvanı ile görevine devam etmektedir. İyi derece İngilizce, başlangıç düzeyinde Rusça ve Fransızca bilmektedir.