

The Harvest of Algorithms: A New Path from Data to Efficiency

Algoritmaların Hasadı: Veriden Verimliliğe Yeni Bir Yol

Ahmet Mermer^{1,*} 

1 Erkunt Traktör Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

Correspondence to:

Ahmet Mermer –
ahmetmrmr@gmail.com
+90 507 040 2434

How to Cite:

Actual Citation as taken
from website

RECEIVED: 21/04/2026

ACCEPTED: 29/04/2026

PUBLISHED: 30/06/2026

ABSTRACT

In the modern agricultural landscape, digital transformation has evolved into a high-precision engineering discipline. This study analyzes advanced automated guidance systems as a decisive bridge between conventional mechanics and the era of autonomous farming. By integrating high-torque actuation with intelligent positioning logic, these systems utilize multi-constellation satellite networks and real-time correction streams to achieve a precision level where operational deviations are confined to the centimeter scale. This technological framework, synchronized via high-speed CAN-Bus communication and real-time data fusion, optimizes complex field trajectories for critical tasks such as seeding and precision fertilization. The synergy between advanced control units and intuitive human-machine interfaces minimizes the margin of human-induced error, leading to a significant reduction in fuel consumption and mechanical fatigue. Beyond basic navigation, features such as dynamic terrain compensation and automated headland path planning ensure consistent accuracy across diverse topographies. This research posits that the true "harvest" of these algorithms lies in the transition from manual control to data-driven operational intelligence. As a critical milestone toward fully unmanned agricultural ecosystems, these advanced positioning solutions provide a robust foundation for economic optimization and environmental stewardship, defining the next frontier of smart mechanization.

KEYWORDS

Automated Guidance, Data-Driven Agriculture, High-Precision Positioning, Operational Efficiency, Smart Mechanization

ÖZET

Modern tarım ekosisteminde dijital dönüşüm, artık basit bir otomasyon sürecinin ötesine geçerek yüksek hassasiyetli bir mühendislik disiplini hâline gelmiştir. Bu çalışma, gelişmiş otomatik yönlendirme sistemlerini, geleneksel mekanik yaklaşımlar ile otonom tarım çağı arasında belirleyici bir köprü olarak ele almakta ve analiz etmektedir. Yüksek torklu aktüasyon yapıları ile akıllı konumlandırma algoritmalarının entegrasyonu sayesinde bu sistemler; çoklu uydu takımyıldızları ve gerçek zamanlı düzeltme sinyallerinden faydalanarak, operasyonel sapmaların santimetre mertebesinde sınırlandığı bir hassasiyet düzeyine ulaşmaktadır. Yüksek hızlı CAN-Bus iletişimi ve gerçek zamanlı veri füzyonu ile senkronize edilen bu teknolojik altyapı, ekim ve hassas gübreleme gibi kritik tarla operasyonları için karmaşık hareket yollarını optimize etmektedir. Gelişmiş kontrol üniteleri ile sezgisel insan-makine arayüzleri arasındaki sinerji, operatör kaynaklı hata payını minimuma indirirken; yakıt tüketimi ve mekanik yorgunlukta kayda değer bir azalma sağlamaktadır. Temel yönlendirme işlevlerinin ötesinde, dinamik arazi tafisi ve otomatik başak (headland) dönüş planlaması gibi özellikler, farklı topografik koşullar altında dahi tutarlı konumsal hassasiyet sunmaktadır. Bu araştırma, algoritmaların gerçek "hasadının"; manuel kontrolden veriye dayalı operasyonel zekâya geçişte ortaya çıktığını ileri sürmektedir. Tam otonom tarımsal ekosistemlere geçiş yolunda kritik bir kilometre taşı niteliği taşıyan bu gelişmiş konumlandırma çözümleri, ekonomik optimizasyon ve çevresel sürdürülebilirlik için sağlam bir temel sunarak akıllı mekanizasyonun bir sonraki sınırını tanımlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Mekanizasyon, Operasyonel Verimlilik, Otomatik Yönlendirme, Veriye Dayalı Tarım, Yüksek Hassasiyetli Konumlandırma

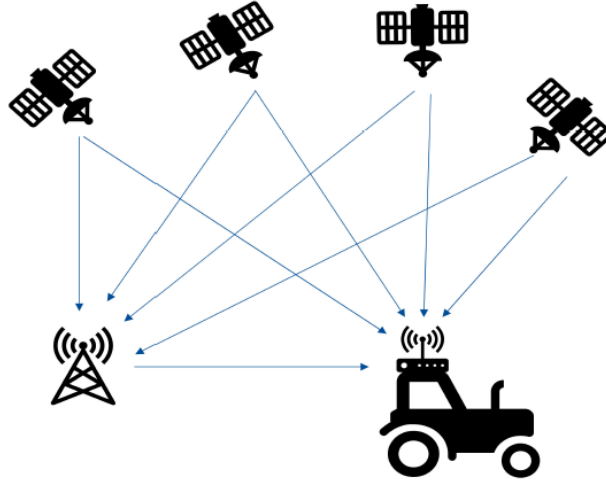


© 2026 The Author(s).
Published by BAUDER
Press.

This is an open access article published by Aintelia Science Notes (ASNJ), a journal of BAUDER (Bilimsel Araştırmalar ve Uygulamalar Derneği / BAUDER Press), under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (CC BY-NC 4.0 Deed) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

1. GİRİŞ

Artan üretim gereksinimleri ve sürdürülebilirlik beklentileri doğrultusunda tarım sektörü dijitalleşmeyi hızla benimsemektedir. Geleneksel manuel direksiyon çözümleri; operatör kaynaklı hatalara, yakıt israfına ve düşük doğruluk seviyelerine yol açarken, teknoloji odaklı çözümler bu zorlukları önemli ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Bu yenilikler arasında otomatik dümenleme sistemleri, modern tarımın en kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Traktörlerdeki konumlandırma ve yönlendirme süreçlerini dijitalleştiren bu sistemler; GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) tabanlı konumlama ve RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) düzeltme sinyallerinden faydalanarak yaklaşık ± 2.5 cm hassasiyet seviyesine ulaşmakta ve ekim, gübreleme ve ilaçlama gibi operasyonlarda yüksek doğruluk sağlamaktadır (Şekil 1).

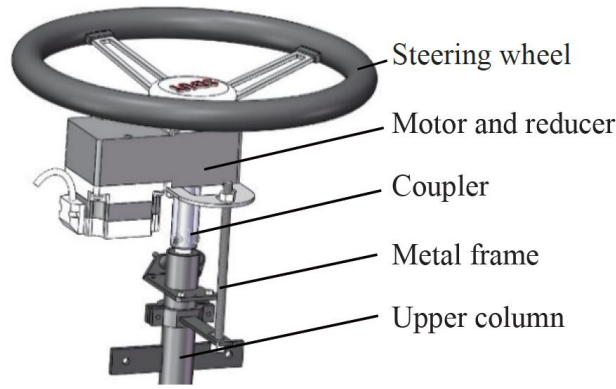


Şekil 1: Sinyalin Çalışma Prensibi

Otomatik dümenleme sistemleri; bir elektrik motoru, elektronik kontrol ünitesi (ECU), GNSS alıcısı ve sezgisel bir tablet arayüzünden oluşmaktadır. Bu bileşenler, CAN-Bus (Controller Area Network) protokolleri üzerinden haberleşerek gerçek zamanlı veri alışverişi ve sistemler arası sorunsuz entegrasyon sağlamaktadır. Direksiyon koluna monte edilen elektrik motoru, operatör müdahalesine gerek kalmadan otomatik yönlendirme görevini yerine getirirken; kullanıcı, tablet arayüzü üzerinden yol planlama, başak (headland) dönüş otomasyonu ve arazi telafisi gibi işlevleri kolaylıkla yönetebilmektedir.

Bu teknoloji, yalnızca yönlendirme hassasiyetini artırmakla kalmayıp; aynı zamanda iş gücü verimliliğini yükseltmekte, yakıt tüketimini optimize etmekte ve tarımsal operasyonlarda sürekliliği güvence altına almaktadır. Bununla birlikte, veriye dayalı yönetim anlayışı ve bağlantılı sistemler ile bütünleşmiş bir yapı sunarak, yakın gelecekte tam otonom tarım makinelerinin temel altyapısını oluşturması beklenmektedir. Özetle, otomatik dümenleme sistemleri; modern tarımda dijitalleşme ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasında stratejik bir rol üstlenmektedir.

Elektrik motoru tahrikli otomatik dümenleme sistemleri; mekanik olarak entegre edilmiş direksiyon kolunu yapıları ve optimize edilmiş tork iletimi sayesinde tarım araçlarında yüksek hassasiyetli yönlendirme performansı sunmaktadır [5] (Şekil 2).

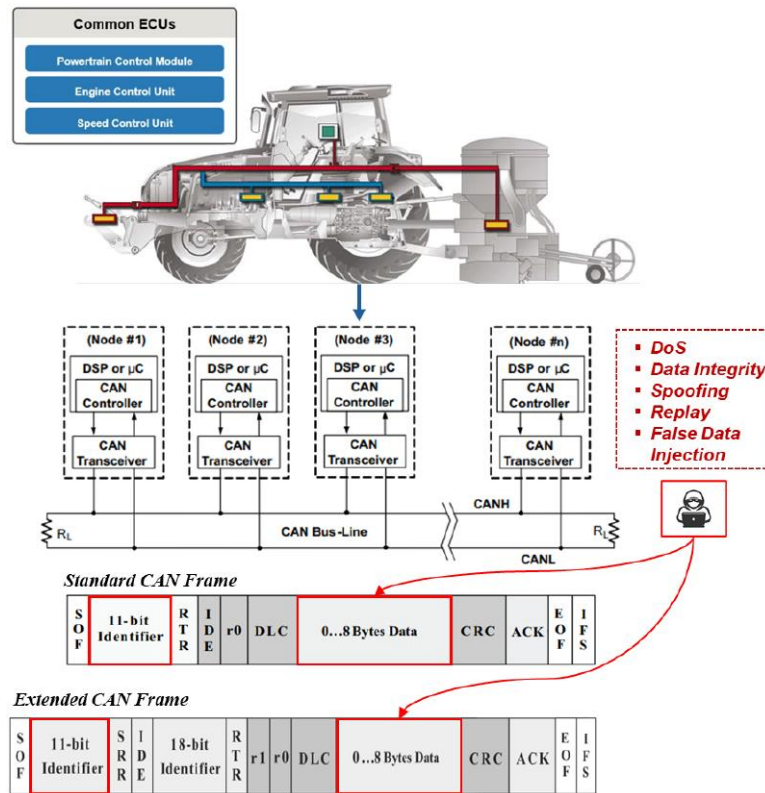


Şekil 2: Direksiyon Mekanizmasının Montajı

CAN-Bus tabanlı haberleşme mimarileri üzerinde çalışan gelişmiş kontrol algoritmaları; değişken yük koşulları altında dahi gerçek zamanlı tepki kabiliyeti ve sistem kararlılığı sağlamaktadır [5].

GNSS ağlarının RTK düzeltme sinyalleri ile desteklenmesi, farklı tarla koşulları altında santimetre seviyesinde konumlandırma hassasiyetinin korunmasını sağlarken; otomatik yönlendirme sistemlerinde sinyal sapmasını azaltmakta ve geçişten geçişe tekrarlanabilirliği önemli ölçüde iyileştirmektedir [6].

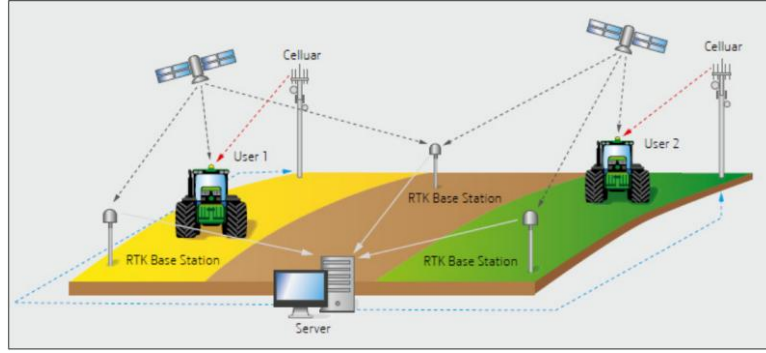
Tarım makinelerinde kullanılan CAN-Bus ağlarının güvenilirliği ve siber güvenliği, otomatik dümenleme sistemlerinin kesintisiz ve kararlı bir şekilde çalışmasının sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı anomali tespit yaklaşımları, olağandışı haberleşme desenlerini belirleyerek operasyonel güvenliği artırmakta ve sistem kaynaklı duruş sürelerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [4] (Şekil 3).



Şekil 3: Modern Tarım Makinelerinde CAN Uygulaması ve Örnek Saldırı Vektörleri

Otomatik dümenleme sistemleri, otonom tarım teknolojilerine geçiş sürecinde temel bir yapı taşı olarak değerlendirilmektedir. IoT platformları ve sensör füzyonu yaklaşımları ile entegrasyonun;

insansız tarla operasyonlarının yaygın biçimde benimsenmesi açısından önemli bir potansiyel sunduğu öngörülmektedir [2] (Şekil 4).



Şekil 4: İnsansız Saha Operasyonları için IoT Platform Entegrasyonları

GNSS tabanlı konumlandırma sistemlerinin RTK düzeltme sinyalleri ile entegrasyonu, otomatik dümenleme uygulamalarında santimetre seviyesinde konumsal hassasiyetin korunmasını mümkün kılmaktadır. Bu yaklaşım; sinyal sapmasını azaltmakta, geçişten geçişe tekrarlanabilirliği artırmakta ve özellikle hassas tarım uygulamalarında yönlendirme performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir [3], [1].

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Bu çalışmada, traktörlerde kullanılan otomatik dümenleme sistemlerinin yapısı, temel bileşenleri ve performans parametreleri incelenmiştir. Sistem, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) tabanlı konumlandırmanın RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) düzeltme sinyalleri ile entegrasyonu sayesinde hassas tarım uygulamalarında yüksek doğruluk sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. GNSS alıcısı traktörün gerçek zamanlı konumunu belirlerken, RTK modülü santimetre seviyesinde konumsal düzeltmeler sunmaktadır. Geliştirilen otomatik dümenleme sistemi, saha değerlendirmeleri kapsamında Erkunt Nimet 75Lux Deutz-V traktör modeli üzerine başarıyla uygulanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Otomatik Direksiyon Sistemi

Saha testleri süresince, navigasyon kontrolcüsü tarafından oluşturulan operasyonel komutlar otomatik aktüasyon mekanizmalarına iletilmiştir. Direksiyon kolonuna entegre edilen elektrik

motoru, elektronik kontrol ünitesi (ECU) tarafından üretilen komutlar doğrultusunda yönlendirme hareketlerini gerçekleştirmiştir. Operatör ise yol planlama, başak (headland) dönüş otomasyonu ve arazi telafisi gibi fonksiyonları tablet tabanlı bir kullanıcı arayüzü üzerinden yönetmiştir.

Konum Belirleme ve Hassasiyet (R70 GNSS Alıcısı)

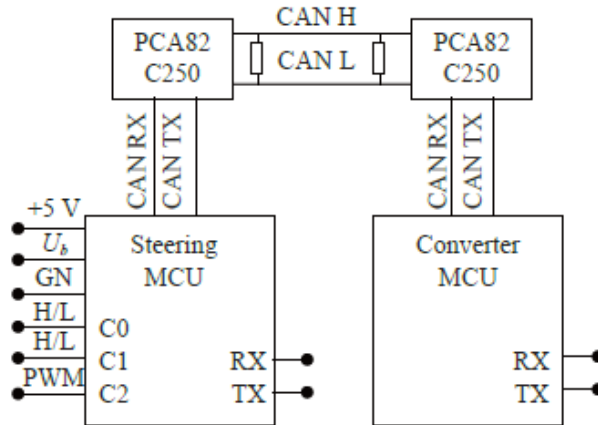
Traktörün konumunun yüksek hassasiyetle belirlenebilmesi amacıyla sistem, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) alıcıları aracılığıyla uydu sinyallerini toplamaktadır (Şekil 6). Elde edilen bu sinyaller, RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) düzeltme teknolojisi kullanılarak işlenmekte ve ± 2.5 cm doğruluk seviyesine ulaşılmaktadır. RTK düzeltmeleri, GNSS sinyallerini bir referans istasyonundan alınan verilerle senkronize ederek, hatasız yol planlaması ve sıra takibini güvence altına almaktadır.



Şekil 6: R70 GNSS Alıcısının Traktör Üzerindeki Konumu

Veri İşleme ve Kontrol (Direksiyon ECU)

Konumlandırma verilerinin işlenmesi ve yönlendirme komutlarının üretilmesi amacıyla Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU), GNSS ve RTK verilerini almakta; gelişmiş algoritmalar kullanarak traktörün mevcut konumunu ve hedef güzergâhını hesaplamakta ve buna bağlı olarak direksiyon açısı komutlarını oluşturmaktadır (Şekil 7). Sistem bileşenleri arasındaki haberleşme ise CAN-Bus (Controller Area Network) protokolü üzerinden yönetilmektedir.



Şekil 7: Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) Blok Şeması

Direksiyon Otomasyonu (EMS2 Motoru)

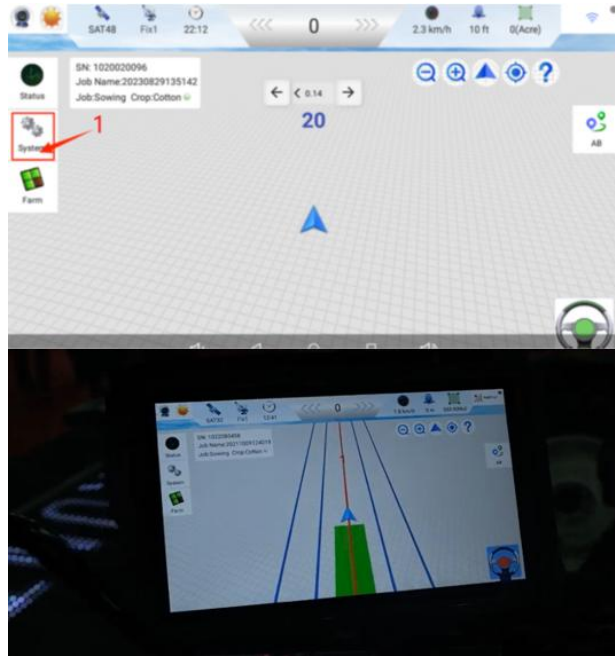
Operatör müdahalesi olmaksızın yönlendirme işlemini gerçekleştirmek amacıyla, direksiyon kolonuna entegre edilen yüksek torklu bir elektrik motoru, ECU tarafından üretilen komutlara bağlı olarak direksiyon açısını ayarlamakta ve bu sayede traktörün önceden tanımlanmış güzergâhları otomatik takip etmesini sağlamaktadır (Şekil 8).



Şekil 8: Direksiyon Mekanizmasının Montajı

Kullanıcı Arayüzü ve İşlev Yönetimi (T100 Monitör)

Operatöre sezgisel kontrol ve izleme imkânı sağlamak amacıyla, tablet tabanlı arayüz üzerinden yol planlama, başak (headland) dönüş otomasyonu, arazi telafisi ve hız ayarı gibi fonksiyonlar yönetilmektedir (Şekil 9). Kullanıcı arayüzü; gerçek zamanlı konum bilgilerini, sistem durumunu ve performans metriklerini görsel olarak sunmaktadır.



Şekil 9: Sezgisel Kontrol Mekanizması (T100 Monitör Arayüzü)

2.2. Yöntem

Bu aşamada, otomatik dümenleme sisteminin performansı ISO 12188-2 standartlarına uygun olarak saha koşulları altında değerlendirilmiştir. Deney süresince, lastik ölçüleri ve lastik basınç değerleri, ETRTO 2018 standartları doğrultusunda sabit tutulmuş ve test koşullarının tekrarlanabilirliği sağlanmıştır (Tablo 1).

Tablo 1: Lastik Bilgileri

	Lastik Boyutu	Lastik Basıncı (bar)
Ön Lastikler	280/85R24	1.6
Arka Lastikler	420/85R30	1.6

Deneyler, sert asfalt zemin üzerinde gerçekleştirilmiş ve üç farklı zaman aralığında tekrarlanmıştır. İlk test, sistemin montajı ve kalibrasyonunun hemen ardından uygulanmıştır. İkinci test, ilk testten bir saat sonra, üçüncü test ise yirmi dört saat sonra gerçekleştirilmiştir. Her bir test oturumu sırasında çevresel koşullar izlenmiş ve kayıt altına alınmıştır (Tablo 2).

Tablo 2: Deney Esnasında Hava Koşulları

Deneyler	Hava Sıcaklığı °C	Nem (%)	Hava Durumu
I. Başlangıç	30°C	31%	Açık
II. 1 Saat	28°C	40%	Parçalı Bulutlu
III. 24 Saat	20°C	65%	Şiddetli Yağmur

Testlere başlamadan önce, tüm yazılım ayarları ve kullanıcı tarafından yapılandırılabilen parametreler varsayılan değerlerine sıfırlanmıştır. Araç parametreleri hassas şekilde ölçülerek sisteme girilmiş ve seçilen çalışma moduna uygun olarak kalibrasyon prosedürleri uygulanmıştır. Kalibrasyonun ardından, A-B referans hattı boyunca yapılan gidiş ve dönüş geçişleri arasındaki mesafe farkı ölçülerek ince ayarlamalar gerçekleştirilmiş ve bu fark ofset değeri olarak tanımlanmıştır. Söz konusu ayarlar, tüm test süreci boyunca değiştirilmeden korunmuştur (Şekil 10).

**Şekil 10: Araç Ayarları Ekranı**

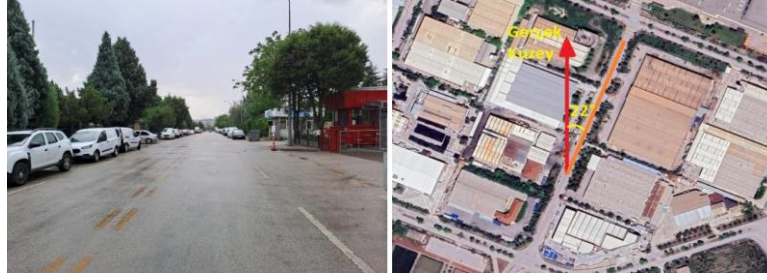
Veri boşluklarının, test sonuçlarının geçerliliğini etkilemeyecek düzeyde (<%25) olduğu belirlenmiştir. Konum Hassasiyeti Zayıflama Faktörü (Position Dilution of Precision – PDOP) değerlendirmesi kapsamında, aktif uydu sayısı 31, potansiyel uydu sayısı ise 32 olarak kaydedilmiştir. Saha çalışmalarında kullanılan uydu konumlandırma cihazı tarafından gözlemlenebilen maksimum uydu sayısı 34 olarak belirlenmiştir. Tüm deneyler süresince seyir hızı ve motor devri sabit tutulmuştur. Traktör, tüm test senaryolarında 2.5 m/s seyir hızı ve 1400 d/d (rpm) motor devrinde çalıştırılmıştır (Tablo 3).

Tablo 3: Test Parametreleri

Deneyler	Seyir Hızı (m/s)	Motor Devri (dev/dk)
I. Başlangıç	2.5 m/s	1400 rpm
II. 1 Saat	2.5 m/s	1400 rpm
III. 24 Saat	2.5 m/s	1400 rpm

3. Bulgular

Bu kapsamda, otomatik dümenleme sistemi (ODS) testleri 2.5 m/s sabit seyir hızı altında ve tüm operasyon süresince operatör müdahalesi olmaksızın gerçekleştirilmiştir. Seçilen hız ayarı için her bir test, farklı GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) uydu takımıyla konfigürasyonları altında, iki ardışık gün boyunca ve üçer tekrar şeklinde uygulanmıştır (Şekil 11).

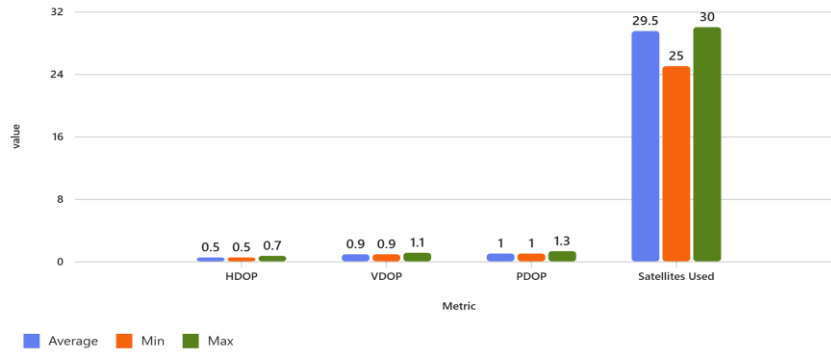


Şekil 11: Test Rotası

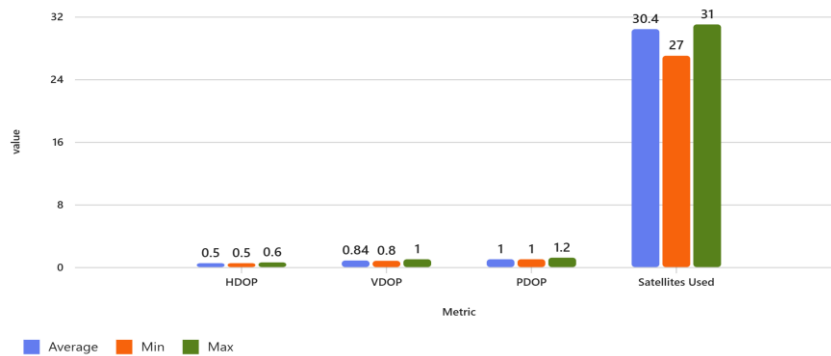
Bu yaklaşım, farklı uydu geometrileri altında sistem performansının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

3.1. İlk Test Sonuçları

Birinci test kapsamında, otomatik dümenleme sisteminin (ODS) ileri ve geri geçişler sırasında elde edilen GNSS istatistikleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, her bir geçiş için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 12 ve Şekil 13).

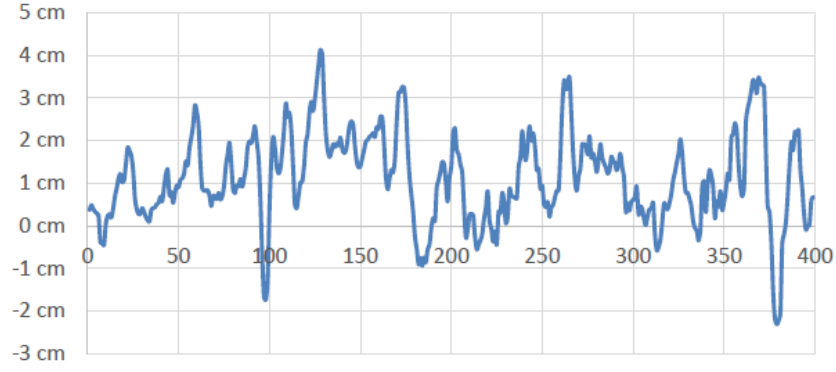


Şekil 12: Birinci Test Gidiş Yönü GNSS Değerleri

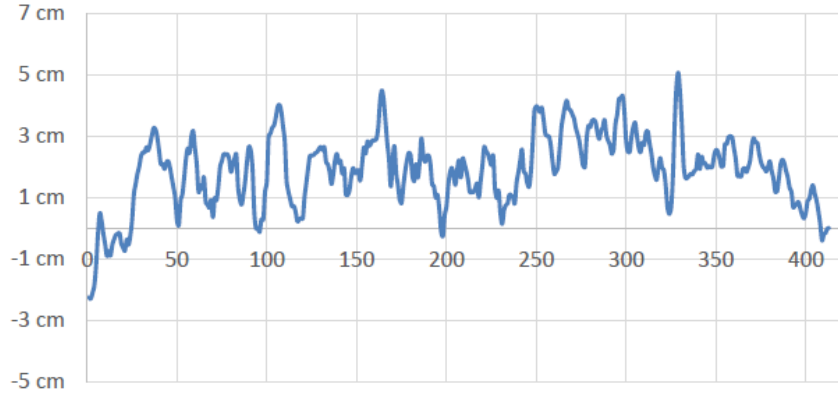


Şekil 13: Birinci Test Dönüş Yönü GNSS Değerleri

Birinci deney kapsamında, A-B referans hattına göre yanal geçiş hata dağılımları analiz edilmiştir. İleri ve geri geçişler sırasında elde edilen sapma değerlerinin zamansal değişimi, çizgi grafikleri kullanılarak sunulmuştur (Şekil 14 ve Şekil 15).



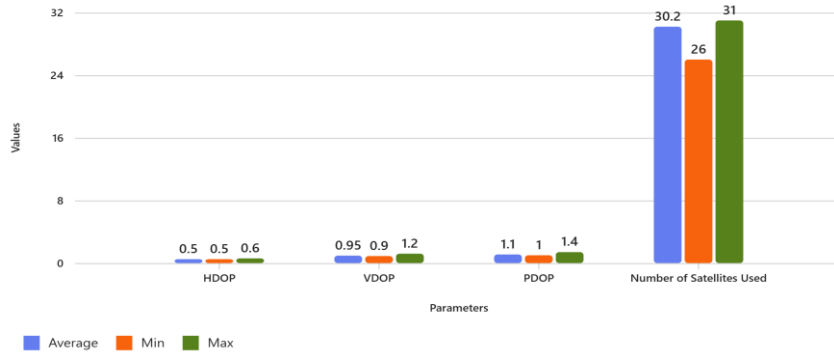
Şekil 14: Gidiş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma



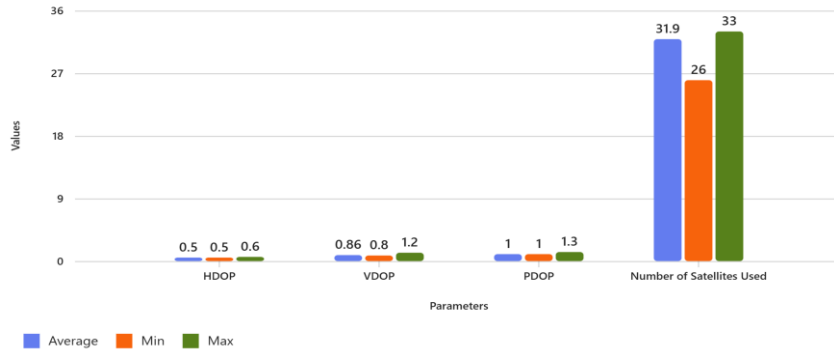
Şekil 15: Dönüş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma

3.2. İlk Deneyden Bir Saat Sonra Gerçekleştirilen: İkinci Test Sonuçları

İkinci test kapsamında, ilk deneyden bir saat sonra otomatik dümenleme sisteminin (ODS) ileri ve geri geçişler sırasında elde edilen GNSS istatistikleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, her bir geçiş için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 16 ve Şekil 17).

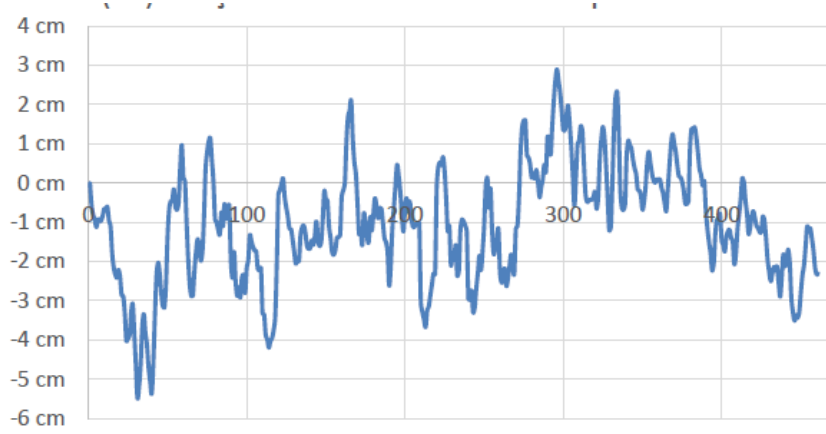


Şekil 16: İkinci Test Gidiş Yönü GNSS Değerleri (1 Saat)

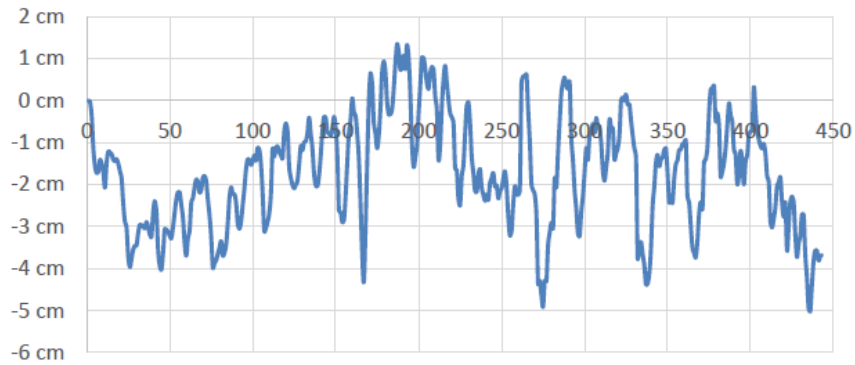


Şekil 17: İkinci Test Dönüş Yönü GNSS Değerleri (1 Saat)

İkinci deney kapsamında, ilk testten bir saat sonra A-B referans hattına göre yanal geçiş hata dağılımları analiz edilmiştir. İleri ve geri geçişler sırasında elde edilen sapma değerlerinin zamansal değişimi, çizgi grafikleri kullanılarak sunulmuştur (Şekil 18 ve Şekil 19).



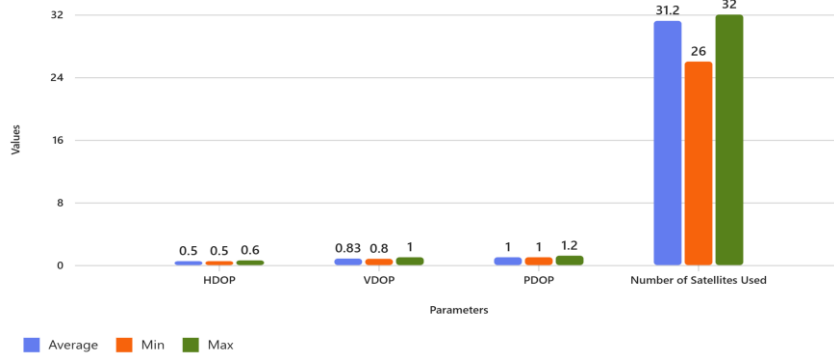
Şekil 18: Gidiş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma (1 Saat)



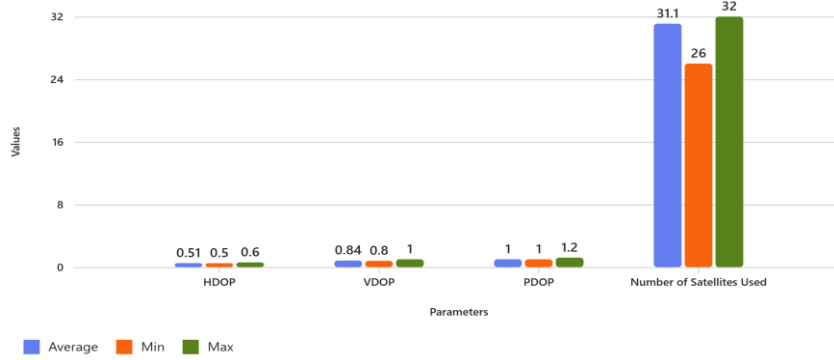
Şekil 19: Dönüş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma (1 Saat)

3.3. İlk Deneyden 24 Saat Sonra Gerçekleştirilen: Üçüncü Test Sonuçları

Üçüncü test kapsamında, ilk deneyden yirmi dört saat sonra otomatik dümenleme sisteminin (ODS) ileri ve geri geçişler sırasında elde edilen GNSS istatistikleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, her bir geçiş için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 20 ve Şekil 21).

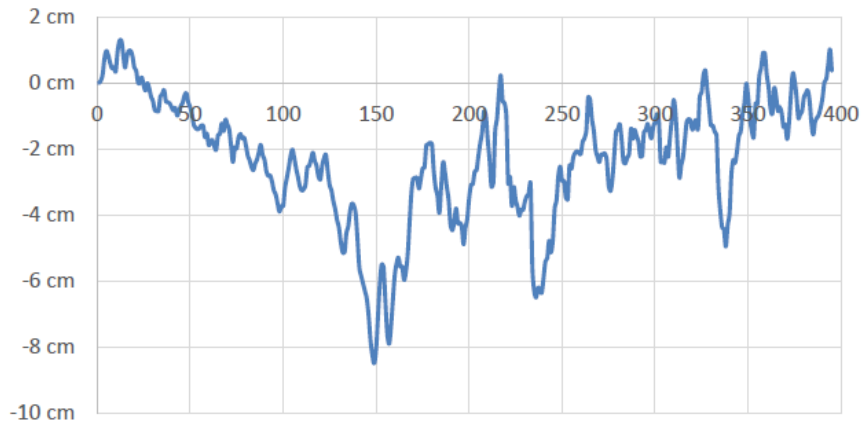


Şekil 20: Üçüncü Test Gidiş Yönü GNSS Değerleri (24 Saat)

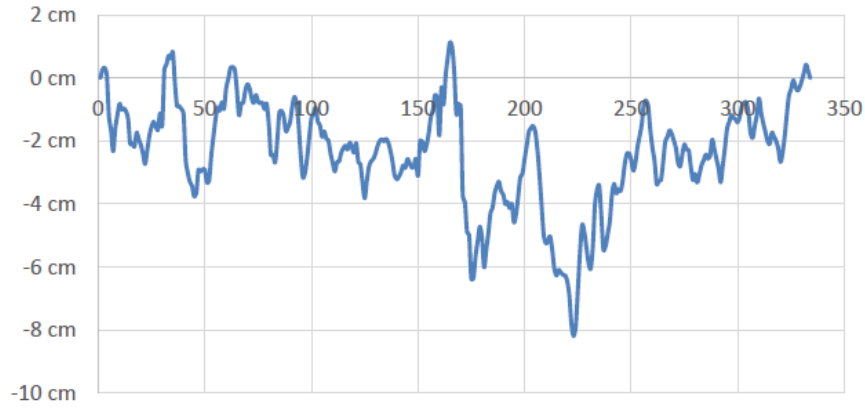


Şekil 21: Üçüncü Test Dönüş Yönü GNSS Değerleri (24 Saat)

Üçüncü deney kapsamında, ilk testten yirmi dört saat sonra A-B referans hattına göre yanal geçiş hata dağılımları analiz edilmiştir. İleri ve geri geçişler sırasında elde edilen sapma değerlerinin zamansal değişimi, çizgi grafikleri kullanılarak sunulmuştur (Şekil 22 ve Şekil 23).



Şekil 22: Gidiş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma (24 Saat)



Şekil 23: Dönüş Yönü – "A-B" Referans Hattından Sapma (24 Saat)

4. Tartışma

Tarımda yönlendirme ve konumlandırma süreçleri, geleneksel olarak operatör deneyimine ve mekanik sistemlerin sınırlı hassasiyetine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, uzun süreli operasyonlar sırasında doğrulukta azalmaya, tekrarlanabilirlik sorunlarına ve insan faktöründen kaynaklanan performans değişkenliğine yol açmaktadır. Dijitalleşmenin gelişmesiyle birlikte, bu sınırlamaları azaltmayı hedefleyen otomatik dümenleme sistemleri, tarımda önemli bir dönüşüm unsuru olarak ortaya çıkmıştır.

Otomatik dümenleme sistemlerinin gelişimi, yalnızca bir aracın önceden tanımlanmış bir güzergâh üzerinde tutulmasıyla sınırlı değildir. Bu tür sistemlerin, zamana bağlı kararlılık, geçişten geçişe tutarlılık ve değişken çevresel koşullar altında sürdürülebilir performans gibi kriterler açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. GNSS tabanlı konumlandırma teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde, tarımsal operasyonlardaki hassasiyet günümüzde hiç olmadığı kadar ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hâle gelmiştir.

Bu bağlamda, elektrikli yönlendirme aktüasyon mekanizmaları ve sayısal kontrol mimarileri; geleneksel hidrolik ve manuel çözümlere kıyasla daha öngörülebilir ve tekrarlanabilir yönlendirme davranışı sunma potansiyeline sahiptir. Bu sistemlerin gelişimiyle birlikte etki alanı yalnızca operasyonel doğrulukla sınırlı kalmamakta; aynı zamanda operatör iş yükünün azaltılması, operasyonel sürekliliğin artırılması ve kullanıcı bağımlılığının minimize edilmesi gibi önemli kazanımları da beraberinde getirmektedir.

Bu nedenle, otomatik dümenleme sistemleri yalnızca mevcut tarımsal uygulamaların iyileştirilmesine yönelik araçlar olarak değil, aynı zamanda veri odaklı karar alma süreçleri ve geleceğin otonom tarım teknolojileri için temel bileşenler olarak değerlendirilmelidir. Bu çerçevede sunulan bulgular, sistemin mevcut durumunu yansıtmakla birlikte, ilerideki geliştirme potansiyelini ve tarımsal uygulamalar üzerindeki daha geniş etkisini de ortaya koymaktadır.

5. Sonuçlar

Yapılan testler, Otomatik Dümenleme Sisteminin, ISO 12188-2 standartlarına uygun olarak Erkunt Nimet 75Lux Deutz-V traktör modeli üzerinde başarıyla çalıştığını ortaya koymuştur. Sistem, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ve RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) düzeltme sinyallerinin entegrasyonu sayesinde hedeflenen ± 2.5 cm konumlandırma hassasiyetini sağlamıştır.

Her bir test dizisi, aynı noktadan geçen RVP konum çiftlerinin zamansal olarak dengeli bir dağılımını sağlayacak şekilde kurgulanmış olup, bu yapı hata değerlerinin doğru bir biçimde hesaplanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Testler kapsamında, A-B referans hattı boyunca gidiş ve dönüş yönünde 7.5 dakika olmak üzere belirlenen zaman sınırlarına uyulmuştur. Gidiş ve

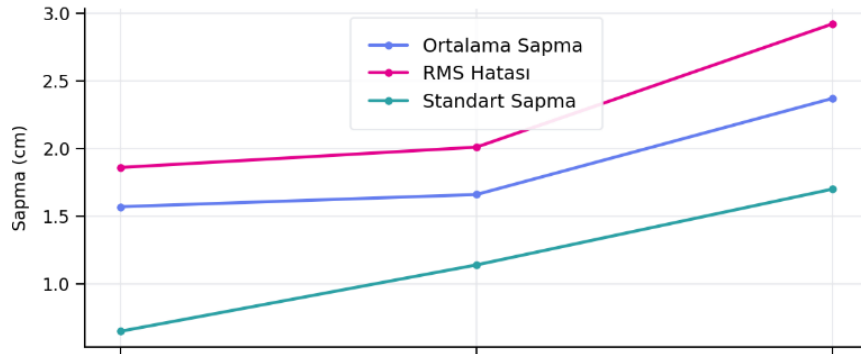
dönüş hareketleri sırasında kaydedilen RVP konumları arasındaki yatay mesafe farkı, test hattının göreceli enine iz hatası (Cross-Track Error – XTE) olarak tanımlanmıştır. Değerlendirmeye yalnızca, her iki yönde aynı noktadan geçişler arasındaki zaman farkı 15 dakikayı aşmayan veriler dâhil edilmiştir (Tablo 4) (Şekil 24 ve Şekil 25).

Tablo 4: Deneylerin Genel Sonuçları

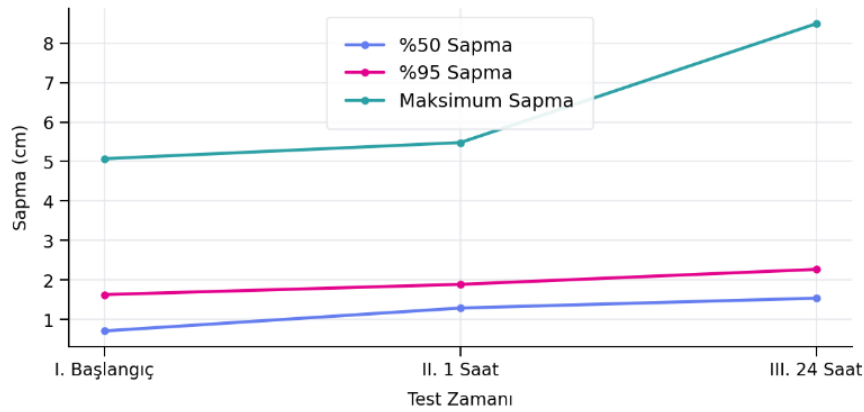
Test	Ortalama Sapma (cm)	%50 Sapma (cm)	%95 Sapma (cm)	Maksimum Sapma (cm)	RMS Hatası (cm)	Standart Sapma (cm)	Veri Sayısı
I. Başlangıç	1.57	0.71	1.63	5.07	1.86	0.65	881
II. 1 Saat	1.66	1.29	1.89	5.48	2.01	1.14	948
III. 24 Saat	2.37	1.54	2.27	8.49	2.92	1.70	730
Ortalama	1.87	1.18	1.93	6.34	2.26	1.16	853
RMS	1.90	1.23	1.95	6.53	2.31	1.24	858
Standart Sapma	0.441	0.426	0.322	1.869	0.571	0.526	112

* Tüm test süresince seyir hızı 2,5 m/s olarak uygulanmıştır.

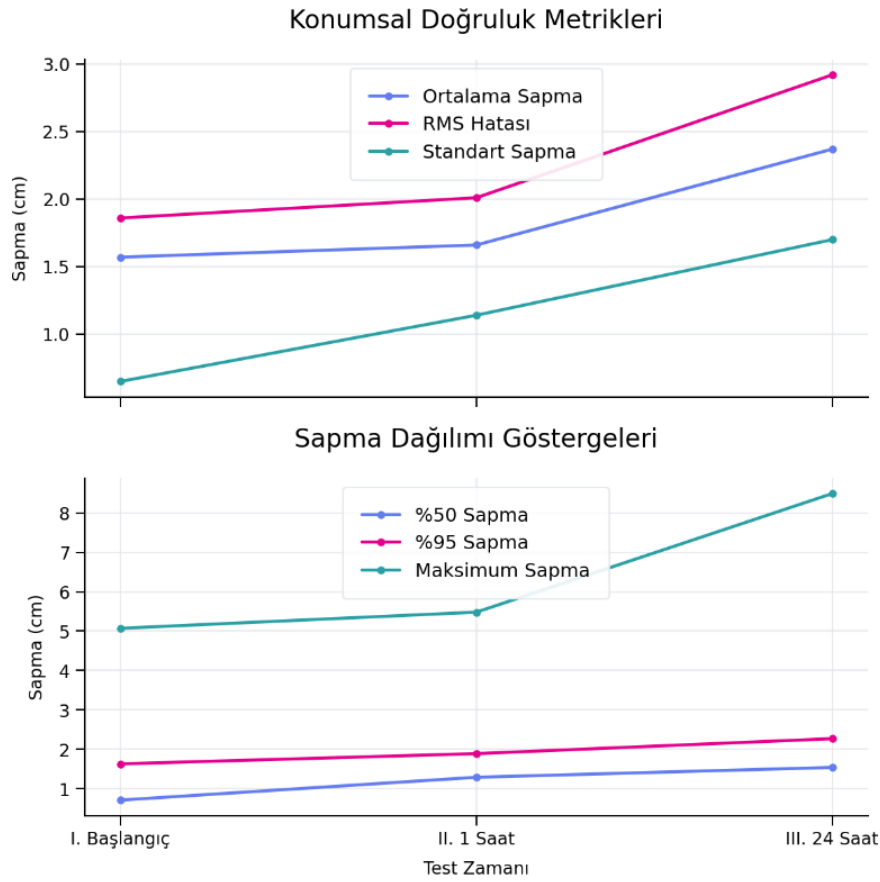
Konumsal Doğruluk Metrikleri



Sapma Dağılımı Göstergeleri



Şekil 24: Konumsal Doğruluk Metrikleri



Şekil 25: Sapma Dağılımı Göstergeleri

Test edilen otomatik dümenleme sisteminin (ODS) performansını temsil eden %95 kümülatif sapma değeri 1,93 cm olarak belirlenmiştir.

STATEMENTS AND DECLARATIONS

Supplementary Material

No supplementary material accompanies this article.

Acknowledgements

Bu çalışmanın yürütülmesi sürecinde; saha testlerinin gerçekleştirilmesine, teknik altyapının sağlanmasına ve kurumsal imkânların kullanımına verdiği desteklerden dolayı Erkunt Traktör Sanayii A.Ş.'ye teşekkür ederim. Çalışma kapsamında elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve akademik olarak sunulması süreci, tamamen yazarın sorumluluğunda olup, kurumun katkıları altyapı ve organizasyonel destek ile sınırlıdır.

Author Contributions

A. Mermer: Conceptualization, Methodology, Investigation, Field Testing, Formal Analysis, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing.

Conflicts of Interest

The author declares that there is no conflict of interest. The author is affiliated with Erkunt Traktör Sanayii A.Ş., whose equipment was used for field testing; the evaluation and academic presentation of the findings remain the sole responsibility of the author.

Data, Code & Protocol Availability

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Funding Received

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

ORCID IDs

Ahmet Mermer <https://orcid.org/0009-0002-5949-8926>

REFERENCES

1. Y. Huang, J. Fu, S. Xu, T. Han, and Y. Liu, "Research on Integrated Navigation System of Agricultural Machinery Based on RTK-BDS/INS," *Agriculture*, vol. 12, no. 8, p. 1169, Aug. 2022, doi: 10.3390/agriculture12081169.
2. J. A. Thomasson, C. P. Baillie, D. L. Antille, C. R. Lobsey, and C. L. McCarthy, "Autonomous Technologies in Agricultural Equipment: A Review of the State of the Art," *ASABE Distinguished Lecture Series, Tractor Design No. 40*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019.
3. Z. Zhigang, H. Haixiang, L. Xiwen, et al., "Steering control system for a tractor using electric steering wheel," *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 48–57, 2024, doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309075.
4. S. Bhattacharya, R. G. Gallolukankanamalage, B. L. Steward, and M. Govindarasu, "ML-based Anomaly Detection for CAN Bus Network in Agriculture Machinery," *Proceedings of the AAAI Symposium Series*, vol. 4, no. 1, pp. 416–423, Nov. 2024, doi: 10.1609/aaaiss.v4i1.31826.
5. G. An, C. Yu, J. Du, X. Yin, Y. Ni, and C. Jin, "Development of the electric automatic steering system for agricultural vehicles," *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 209–214, 2024, doi: 10.25165/j.ijabe.20241701.8493.
6. F. Radicioni, A. Stoppini, R. Brigante, A. Brozzi, and G. Tosi, "GNSS Network RTK for Automatic Guidance in Agriculture: Testing and Performance Evaluation," in *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2020, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 12253, Springer, pp. 19–35, Oct. 2020, doi: 10.1007/978-3-030-58814-4_2.