



Konferans Bildirisi

Tarımda Dijital Denge

Ahmet MERMER¹

¹ Erkunt Traktör Sanayii A.Ş., Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0002-5949-8926>, ahmetmr@gmail.com

Received: 19 August 2025

Revised: 25 October 2025

2nd Revised: 12 November 2025

Accepted: 17 November 2025

Published: 31 December 2025

This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Reference: Mermer, A. (2025). Digital Balance in Agriculture. Orclever Proceedings of Research and Development, 7(1), 158–176.

Özet

Tarım makinelerinin eğimli arazilerde güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla geliştirilen bu sistem, ağırlık merkezindeki değişimleri dengeleyen entegre bir kuvvet mekanizması sunmaktadır. Traktör ve iş makinelerine bağlanan ekipmanlar, özellikle eğimin çok olduğu yokuş alanlarda ön aks üzerindeki yük dağılımını bozarak devrilme riskini artırmaktadır. Bu çalışma, söz konusu riski minimize etmek için elektronik kontrol ünitesi (ECU) ile yönetilen, sensör destekli bir dengeleme sistemini tanımlamaktadır.

Mekanizma; ön aksa yerleştirilen ağırlık sensörleri ve ivmeölçer aracılığıyla aracın yük durumunu sürekli olarak izlemekte, belirlenen eşik değerlerinin altına düştüğünde otomatik olarak devreye girerek tank hacmini dinamik biçimde ayarlamaktadır. Bu işlem aracın ağırlık merkezini yeniden dengeleyerek stabiliteyi artırmakta ve operasyonel güvenliği sağlamaktadır. Sistem hem otomatik hem de manuel kontrol imkânı sunmakta; modüler yapısı sayesinde farklı araç modelleriyle tam uyumlu çalışabilmektedir. Ayrıca, çok işlevli tank tasarımı sayesinde saha koşullarında hem ağırlık dengeleme hem de yardımcı depolama (yağ, mazot, takım sandığı) görevlerini yerine getirebilmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, dijital tarım teknolojileri kapsamında mekanik denge sorunlarına yönelik etkili, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar: Traktör, tarım ekipmanları, ağırlık merkezi, çevresel faktörler, zemin stabilizasyonu, güvenlik.



Digital Balance in Agriculture

Abstract

This study introduces an electronically and mechanically controlled force balancing system designed to ensure safe and stable operation of agricultural machinery on sloped terrain. Equipment attached to the rear of tractors and construction vehicles often disrupts the load distribution, particularly on inclines, increasing the risk of front-end lift and rollover. The proposed mechanism continuously monitors the dynamic load distribution via weight sensors and accelerometers integrated into the front axle, enabling real-time analysis and response.

When the measured load falls below predefined thresholds, the system automatically adjusts the hydraulic tank volume to restore the vehicles center of gravity. This process is managed by an electronic control unit (ECU) and can be operated either automatically or manually, significantly enhancing vehicle stability and operational safety. The modular and vehicle-independent design allows seamless integration with various tractor and machinery models, while the multifunctional tank structure-serving as a tool compartment, auxiliary oil reservoir and fuel tank offers practical advantages under field conditions.

This innovative approach provides a scalable, sustainable and high-safety solution to mechanical balance challenges in digitalized agricultural operations.

Keywords: Tractor, agriculture equipment, center of gravity, environmental factors, soil stabilization, safety.



1. Giriş

Tarımda temel güç kaynağı traktördür. Termik motorunda üretilen mekanik enerji, dönü hareketine çevrilerek toplamda üç ana sisteme iletilir: tekerler, kuyruk mili (PTO) ve hidrolik pompa. Tarımsal mekanizasyonun temelini oluşturan, tüm tarımsal iş ve işlemlerde kullanılabilen, kendi yürür bir kuvvet makinesi olarak tanımlanmaktadır [7]. Tarım ve inşaat sektörlerinde kullanılan makineler, zorlu arazi ve iklim koşullarında yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren görevleri başarıyla yerine getirmektedir. Bu makinelerin etkin ve verimli çalışabilmesi, yalnızca güçlü motor sistemlerine değil, aynı zamanda bu gücün çevresel ve operasyonel koşullara uygun biçimde yönetilmesine de bağlıdır. İnsan gücüne olan bağımlılığın azalması ve verimlilik beklentisinin artması, dijital kontrol sistemlerinin tarım sektöründeki önemini artırmış; bu durum sektörde teknolojik bir dönüşüm sürecini tetiklemiştir.

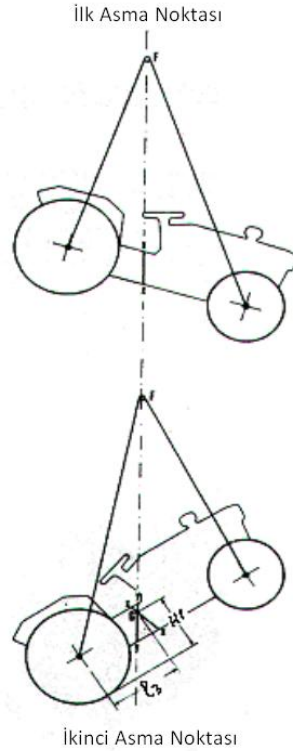
Tarım makinelerinin eğimli arazilerde güvenli ve dengeli çalışması, modern tarımın sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle traktör ve iş makinelerine bağlanan ekipmanlar, yük dağılımını bozarak devrilme riskini artırmakta ve operatör güvenliğini tehdit etmektedir. Bu durum, hem iş sağlığı ve güvenliği açısından hem de operasyonel verimlilik bakımından ciddi sonuçlara sebebiyet verebilmektedir.

Literatürde tarım makinelerinin ağırlık merkezi değişimleri üzerine çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte mevcut sistemler ağırlık dengesizliğini gerçek zamanlı izleyip müdahale edebilecek çözümler sunmaktan uzaktır. Bu bağlamda, elektromekanik kontrollü ve sensör destekli bir kuvvet dengeleme mekanizmasının geliştirilmesi hem güvenlik hem de performans açısından önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Geliştirilen sistem, traktörlerde başarıyla test edilmiş olup; operatör güvenliği, performans artışı ve yakıt verimliliği açısından kullanıcı dostu, olumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın temel amacı, eğimli arazilerde çalışan traktör ve iş makinelerinde oluşan ağırlık dengesizliklerini önlemek amacıyla sensör verilerine dayalı çalışan, modüler yapıya sahip hem otomatik hem de manuel kontrol imkânı sunan bir kuvvet dengeleme sisteminin tasarımı ve işlevselliğini ortaya koymaktır. Geliştirilen kuvvet dengeleme mekanizması, eğimli arazilerde çalışan traktör ve iş makinelerinde ağırlık merkezini optimize ederek devrilme riskini azaltacak ve operasyonel güvenliği anlamlı düzeyde artıracaktır.

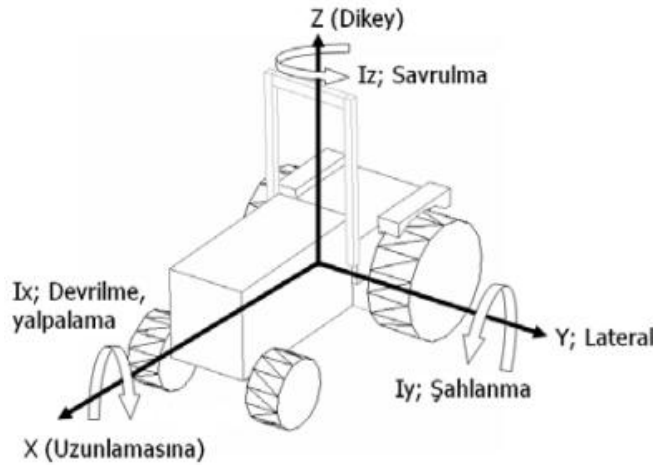
Tarım makinelerinin eğimli arazilerdeki davranışlarını anlamak ve devrilme riskini azaltmak için ağırlık merkezinin konumunun doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle dar izli traktörlerde, yük dağılımının değişkenliği ve ekipmanların ön aks üzerindeki etkisi, ağırlık merkezinin yerden yüksekliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu parametre; aracın devrilme, savrulma ve yalpalama gibi dinamik

tepkilerini belirleyen temel unsurlardan biridir. Traktör ön ve arka dingiline yakın iki farklı noktadan asılır, ağırlık merkezinin yeri bu koşulda oluşan doğruların ara kesitidir (Şekil 1) [1].



Şekil 1. Asma Yöntemiyle Ağırlık Merkezinin Belirlenmesi [1]

Bir eksen etrafında dönme hareketi yapan bir cisim atalet mukavemetinin bir ölçüsüdür. Traktörlerde atalet momenti ağırlık merkezinden geçen hacimsel koordinat sistemindeki eksenlere göre belirtilebilir. Toplamda üç eksen de olan atalet momentleri birbirinden farklı olabileceği gibi etkileri de değişiklik göstermektedir. I_x sürüş yoluna dik akslara paralel eksen etrafında yana devrilme ve yalpalama hareketleri, I_y doğrusal ilerlemede kafa sallamayla ve öne/arkaya takla hareketleri, I_z eğrisel hareket esnasında düşey eksen etrafında dümenleme ve savrulma hareketleri açısından önem taşımaktadır (Şekil 2) [4] [6].



Şekil 2. Hareketlerdeki Değişkenlerin İncelenmesi [4] [6]

Kütlesel atalet momentinin (I ; kgm^2) geometrik tanımı 1 numaralı eşitlikteki gibi hesaplanır;

$$I = \int dm \cdot r^2 \quad (1)$$

Bu formül elementer kütlelerin (dm ; kg) toplamının gövde üzerinde toplanacağını ve her bir elementer kütlenin dönme ekseninden uzaklıklarının (r ; m) karesi ile çarpılacağını belirtir. Bu sayede traktörü oluşturan bütün parçaların atalet momentleri saptanabilir [8]. Parçaların ağırlıkları tartılır, ağırlık merkezine olan uzaklıkları ölçülür, geometrik şekillere benzetilerek veya bilinen geometrik şekillerdeki parçalara ayırarak kendi eksenindeki atalet momentleri saptanır. Sonrasında Steiner formülü ile ağırlık merkezine indirgenerek atalet momentleri hesaplanır. Ancak, bu işlemlerin zorluğu ve zaman zaman parçalardan kaynaklı ölçüm imkansızlıklardan dolayı çok doğru sonuç alınamayacağından, doğru değerleri elde etmek ancak deneysel çalışmalarla olasıdır. Bu durumda atalet momenti saptanacak traktörü, parçaları ya da her ikisini sabit tek bir cisim olarak değerlendirmek yeterlidir [6].

Çalışmada, traktörlerin uzunlamasına eksenindeki kütlesel atalet momenti ve ağırlık merkezi, salınım yöntemiyle ölçülerek değerlendirilmiştir. Bu yöntem, traktörün fiziksel davranışlarını daha hassas biçimde analiz etmeye olanak tanımakta; özellikle eğimli arazilerdeki devrilme senaryoları için kritik eşiklerin belirlenmesini sağlamaktadır. Araç stabilitesinin yalnızca statik değil, dinamik koşullar altında da ele alınması gerektiği bu tür çalışmalarla net biçimde ortaya konmaktadır (Şekil 3) [3].

Traktörün toplam kütlesi (m_t ; kg) ve ön akslara gelen kütlesi (m_A ; kg) tartım yöntemiyle belirlendikten sonra dingiller arası mesafe (L ; m) ölçülür. Arka dingilden ağırlık merkezine (S) olan yatay mesafe (L_3 ; m) 2 numaralı eşitlikteki gibi hesaplanır;

$$L_3 = \frac{m_A}{m_t} \cdot L \quad (2)$$

Arka tekerin statik yarı çapı r_{stat} ölçülür. Traktör ön ve arkasından boyuna eksene paralel olarak sallanmalıdır. Sistemde traktörü dengede tutacak bağlantı noktası bulmak zor olacağından olası devrilmelere karşı dikkat edilmesinde fayda vardır. Denge durumunda dört tekerin yerden yüksekliği (b) eşit olmalı ve traktör ağırlık merkezinden daha yukarıda salınma bırakılmalıdır. Arka teker eksen (S_1) ve asma merkezinden (S_2) olan ölçümler referans düzeleme göre alınmalıdır. Ağırlık merkezi (S) ve birinci asma noktası (M_1) arasındaki mesafe r bilinmemekle beraber ağırlık merkezinin yerden yüksekliğinin belirlenmesi için birtakım testler yapılır. Önce T_1 ; (s) salınım periyodunun belirlenmesi için 7° ile 4° arasında salınma bırakılmalı ardından a mesafesi (birinci ve ikinci asma yükseklikleri arasındaki fark; m) kadar yükseltilerek ikinci bir asma noktasında (M_2) T_2 (s) periyodunun belirlenebilmesi için tekrar salınma bırakılmalıdır. Böylece, elde edilen periyot değerleri 3 numaralı eşitlikte yerine konularak ağırlık merkezinden olan r mesafesi belirlenebilir;

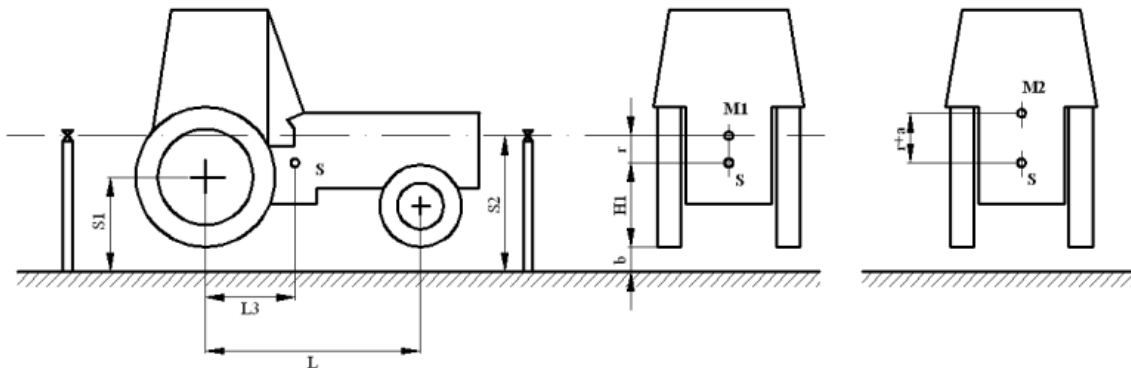
$$r = \frac{T_2^2 \cdot \alpha - \frac{4\pi^2}{g}}{T_1^2 - T_2^2 + \frac{8\pi^2}{g} \alpha} \quad (3)$$

Seçilen mesafenin ağırlık merkezinden uzaklığı birinci ölçümde, ikinci ölçümden daha büyükse a mesafesi eksi işaretlenmelidir. Eğer hesaplama $r < 0.15m$ ya da $2000kg$ 'den ağır traktörler için $r < 0.3$ çıkarsa asma noktası değiştirilmeli ve yeni ölçümler alınmalıdır. Sonuçlar uygunsa ağırlık merkezinin yerden yüksekliği ($H1$) 4 numaralı eşitlikteki gibi hesaplanır;

$$H1 = S_2 - S_1 - r + r_{stat} \quad (4)$$

Uzunlamasına eksenindeki kütle atalet momenti (I_x ; kgm^2) 5 numaralı eşitlikten bulunabilir;

$$I_x = m_t \cdot r \cdot \left(\frac{g}{4\pi^2} \cdot T_1^2 - r \right) \quad (5)$$



Şekil 3. Asma Noktası Belirlenerek Gerçekleştirilen Salınım Testi [3]

Traktörlerde ağırlık merkezinin yerden yüksekliği ile kütle atalet momentinin belirlenmesi amacıyla, platform üzerinde dinamik bir işlem uygulanmaktadır (Şekil 4)



[2]. Bu işlem, traktör-platform kombinasyonunun ve yalnızca platformun salınım periyotlarının karşılaştırılmasına dayanan bir prosedürle gerçekleştirilir. Prosedür kapsamında, traktör farklı yüksekliklerdeki iki ayrı dönme ekseninden asılarak doğal salınıma bırakılır. Elde edilen veriler, aşağıda belirtilen bir dizi eşitlik kullanılarak analiz edilir ve sonuçlara ulaşılır. Traktör-platform kombinasyonunun ağırlık merkezinin dönme eksenine olan mesafesi R_{tp} değeri, 6 numaralı eşitlikten bulunur;

$$R_{tp} = \frac{\alpha T_2^2 - (4\pi^2 \alpha^2) g^{-1}}{(T_1^2 - T_2^2) + 8\pi^2 \alpha g^{-1}} \quad (6)$$

Burada;

R_{tp} : Traktör-platform kombinasyonunun ağırlık merkezine olan dönme eksen mesafesi (m)

a : Düşük ve yüksek eksen arasındaki fark (m)

T_1 : Düşük eksen de traktör-platform kombinasyonu için periyot (s)

T_2 : Yüksek eksen de traktör-platform kombinasyonu için periyot (s)

g : Yerçekimi ivmesi (m/s²)

Traktör-platform kombinasyonunun kütle sel atalet momenti I_{TP} değeri, 7 numaralı eşitlikten bulunur;

$$I_{tp} = R_{tp} (M_t + M_p) (g (t_2 / 2\pi)^2 - R_{tp}) \quad (7)$$

Burada;

I_{tp} : Traktör-platform kombinasyonunun kütle sel atalet momenti (kgm²)

M_t : Traktörün kütlesi (kg)

M_p : Platformun kütlesi (kg)

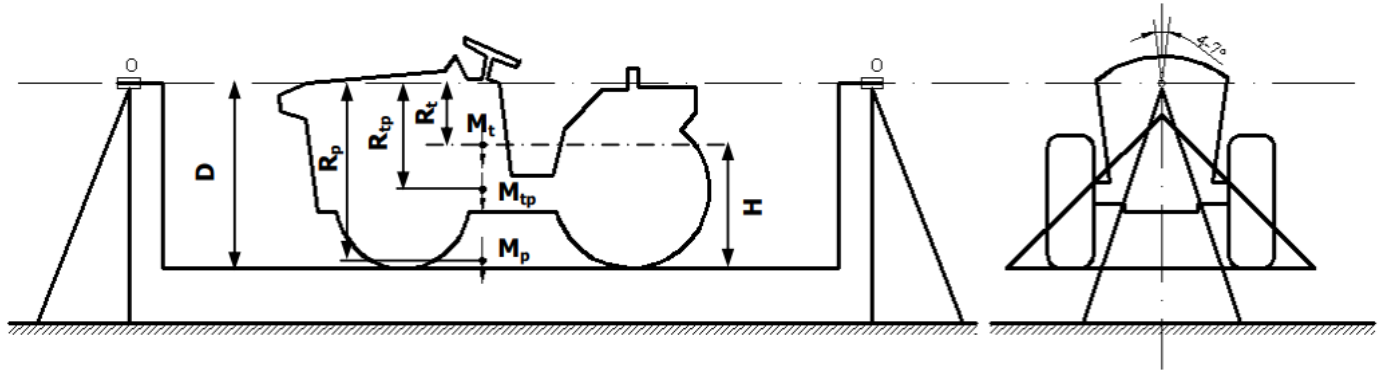
Platformun ağırlık merkezinin dönme eksenine olan mesafesi R_p değeri, 8 numaralı eşitlikten bulunur;

$$R_p = \frac{\alpha T_{2p}^2 - (4\pi^2 \alpha^2) g^{-1}}{(T_{1p}^2 - T_{2p}^2) + 8\pi^2 \alpha g^{-1}} \quad (8)$$

Burada;

T_{1p} : Düşük eksen de platform için periyot (s)

T_{2p} : Yüksek eksen de platform için periyot (s)



Şekil 4. Traktör-Platform Uzunlamasına Eksende Ağırlık Merkezinin Yerden Yüksekliği ve Kütleli Atalet Momentinin Belirlenmesi [2]

Platformun kütleli atalet momenti (I_p ; kgm^2) 9 numaralı eşitlikten bulunabilir;

$$I_p = (R_p M_p) \left(g \left(\frac{T_{2p}}{2\pi} \right)^2 - R_p \right) \quad (9)$$

Traktör ağırlık merkezinin düşük dönme eksenine olan uzaklığı R_t değeri, 10 numaralı eşitlikten bulunabilir;

$$R_t = \frac{((M_t + M_p)R_{tp}) - (M_p R_p)}{M_t} \quad (10)$$

Elde edilen değer platform tabanına olan mesafe $O_{\text{düşük}}$ 'den (D) çıkartıldığında traktörün ağırlık merkezinin yerden yüksekliği $H1$ değeri, 11 numaralı eşitlikle belirlenir;

$$H1 = O_{\text{düşük}} - R_t \quad (11)$$

Traktörün boyuna eksandeki kütleli atalet momenti ise daha önceden hesaplanan traktör-platform kombinasyonunun kütleli atalet momentinden platformun kütleli atalet momentinin çıkarılmasıyla yani 12 numaralı eşitlik ile ulaşılabilir;

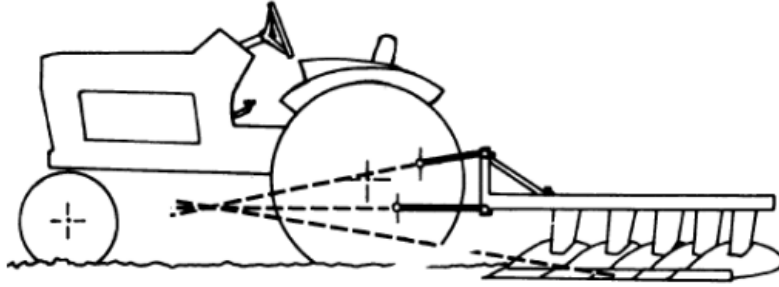
$$I_x = I_{TP} - I_p \quad (12)$$

Burada;

I_x : Traktörün boyuna eksandeki atalet momenti (kgm^2)

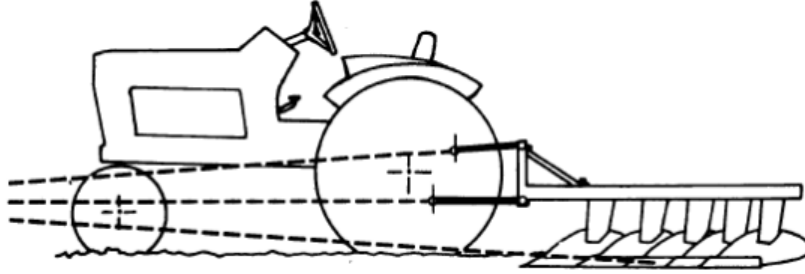
Yüksek güçlü traktörlere bağlanan ekipmanların ağırlık merkezine etkisi incelenmiştir. Pulluğun toprağa temas ettiği konumda yanal ve dikey denge üzerinde belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ancak, ekipman taşıma modunda yukarı kaldırıldığında traktörde şahlanma riski olduğu tespit edilmiştir [10].

Tüm arazi koşulları için ideal bir traktör-ekipman bağlantı geometrisi bulunmamaktadır. Bağlantı şekli, ekipmanın türüne ve toprak yapısına göre ayarlanmalıdır. Farklı ekipman konumlarının traktör dengesine etkisi incelendiğinde, ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ağırlık merkezine yakınsa (Şekil 5), pulluk düze ve engebeli arazilerde verimli çalışır. Eğimli arazilerde ise denge bozulacağından ağırlık dengesi kayacak ve verimli çalışmaya müsaade etmeyecektir [9].



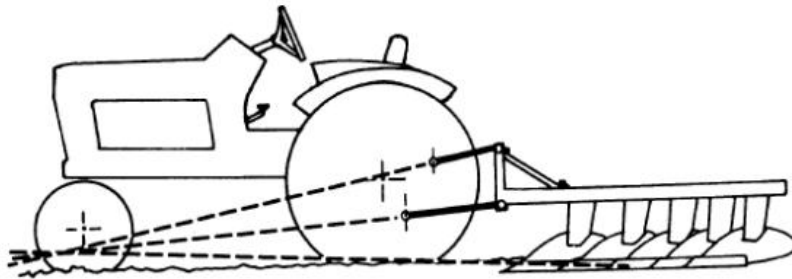
Şekil 5. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Merkez [9]

Ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ön ucuna yakın ve orta konumda yer alıyorsa, ekipman farklı çalışma derinliklerinde zorlanmadan çalışabilir (Şekil 6). Bu durum, traktörün hidrolik güç kapasitesinin verimli şekilde kullanıldığını gösterir. Engbeli arazi koşullarında ise aynı düzeyde verimlilikten söz etmek mümkün değildir [9].



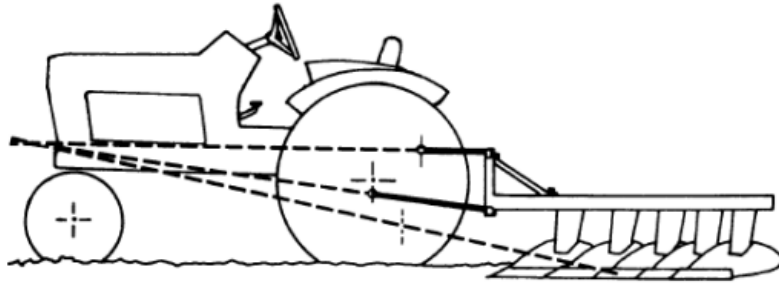
Şekil 6. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Ön Uç, Merkez [9]

Ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ön ucunda ve alçak konumda yer alıyorsa, sert ve aşınmış toprak koşullarında etkili pulluk penetrasyonu sağlanabilir (Şekil 7). Bu konumlandırma, ekipmanın toprağa daha kararlı ve verimli şekilde nüfuz etmesini destekler [9].



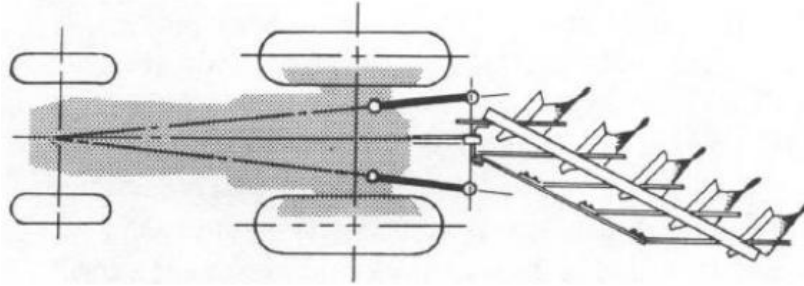
Şekil 7. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Ön Uç, Alçak [9]

Ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ön ucunda ve yüksek konumda yer aldığı zaman, daha fazla hidrolik güç gereksinimi ortaya çıkar. Bu durum aynı zamanda patinajın artmasına neden olur (Şekil 8). Bu tür bir yük dağılımı, ekipmanın verimli çalışmasını zorlaştırır ve daha fazla enerjiye ihtiyaç duyacağından enerji sarfiyatını artıracaktır [9].



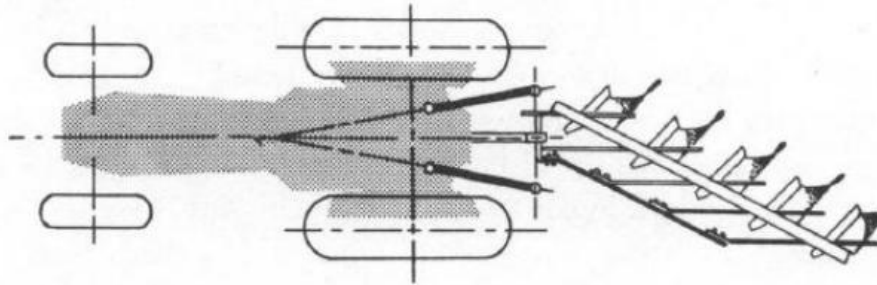
Şekil 8. Düşey Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Ön Uç, Yüksek [9]

Yatay düzlemde ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün ön ucunda konumlandığında, traktör keskin dönüşlerde daha dengeli bir davranış sergiler. Bu durum, işlem sırasında daha hassas bir çalışma genişliği elde edilmesini sağlar (Şekil 9). Özellikle sıra arası işlemlerde ve dar alan manevralarında bu avantaj belirgin şekilde hissedilir [9].



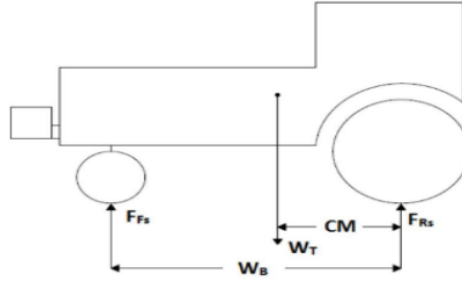
Şekil 9. Yatay Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Ön Uç [9]

Yatay düzlemde ekipman yüklerinin kesişim noktası traktörün merkezine yakın konumlandığında, ekipmanın yönlendirilmesi daha kolay hale gelir (Şekil 10). Bu durum, özellikle hassas tarım uygulamalarında kontrol kabiliyetini artırarak çalışma verimliliğini destekler [9].



Şekil 10. Yatay Düzlemde Ekipman Yüklerinin Kesişim Noktası – Merkez Yakını [9]

Kaldırma kuvveti arttıkça, traktör arka dingili üzerindeki aşağı yönlü kuvvet artar; buna karşılık, ön dingildeki yukarı yönlü destek kuvveti azalır. Bu durum, traktör ağırlık merkezinin geriye kaymasına neden olur. Statik tartım sırasında toplam traktör ağırlığı, Şekil 11 'de gösterildiği üzere, ön dingilde ölçülen ağırlık (FFs) ile arka dingilde ölçülen ağırlığın (FRs) toplamına eşittir [9].



Şekil 11. Traktör Ağırlık Dağılımı [9]

Bu çalışmada, kaldırma işlemi sırasında ön dingile düşen yükün etkisi analiz edilerek dümenleme hakimiyeti değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ön dingile gelen yükün toplam traktör ağırlığının %20 seviyesinde olması, mevcuda kıyasla daha iyi dümenleme kontrolü sağlamaktadır. Bu sonuç, operatör güvenliği ve sürüş kararlılığı açısından kritik eşik değer sunmaktadır.

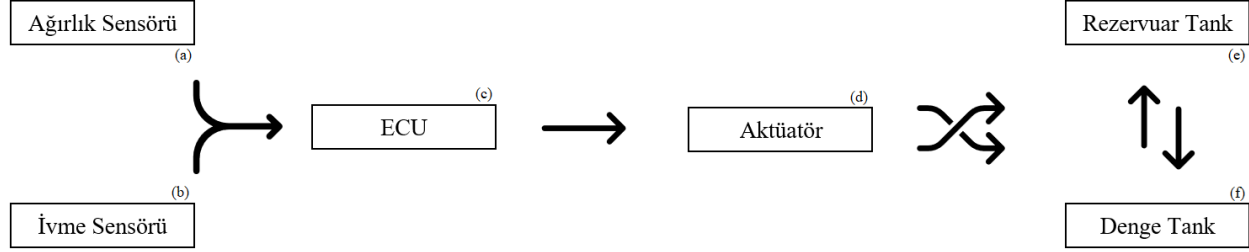
Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, traktör kazalarına ilişkin uluslararası verilerle desteklenmiştir. Güney Kore, İspanya ve Türkiye gibi ülkelerde yapılan araştırmalar, traktörle ilgili ölümlerin yarısından fazlasının devrilme kazalarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır [5]. Güney Kore 'de 2020 yılında traktör kazaları, tarım makinesi kazalarının %12,3 'ünü oluştururken, binilebilir tarım makinelerinde yan ve geriye doğru devrilme sonucu meydana gelen çiftçi yaralanmaları %34,1 ile en büyük paya sahip olmuştur. Traktörler Güney Kore başta olmak üzere birçok gelişmiş ülkede tarımsal kazaların başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. İspanya 'da 2004-2013 yılları arasında analiz edilen yaklaşık 200 tarım kazasının %69 'u traktör kaynaklı olup bunların %30 'luk kısmı devrilme sonucu gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, Türkiye 'de 2000-2007 yılları arasında traktör devrilmeleri sonucu yaşanan 85 ölümün %61,6 'sı tarla, arazi ve sırtlarda meydana gelmiştir.

Bu veriler ışığında, traktörlerin yana ve geriye doğru devrilme nedenleri arasında aşırı uç açısı (statik güvenlik sınırının ötesinde), dengesiz ve engebeli zemin koşulları, uygunsuz yükleme biçimleri ve aşırı yüksek sürüş hızı gibi faktörlerin öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca ekipman kullanımına bağlı olarak ağırlık merkezinin değiştiği, zemin eğiminin ve engebelerin yüksekliği arttıkça güvenliğin azaldığı da devrilme riskini etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır [9].

2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırmada; eğimli arazilerde çalışan traktörlerin ağırlık merkezini dinamik olarak optimize etmeye yönelik geliştirilen, elektromekanik kuvvet dengeleme mekanizmasının performansı değerlendirilmiştir. Sistem, yük hücresi (a) ve ivmeölçerden (b) elde edilen verileri işleyen ECU (c) aracılığıyla çalışmaktadır. ECU (c), bu verileri analiz ederek

elektromekanik aktüatörü (d) kontrol eder. Aktüatör yardımıyla rezervuar tankından (e) alınan sıvı, dengeleme tankına (f) yönlendirilerek sistemin dengeli ve verimli bir şekilde çalışması sağlanır. İhtiyaca bağlı olarak, sistem çift yönlü sıvı transferi gerçekleştirir; rezervuar tankındaki sıvının dengeleme tankına aktarılabilirdiği gibi dengeleme tankındaki sıvının da rezervuar tankına geri gönderilmesi durumu söz konusudur (Şekil 12). Bu sayede sistem, operasyonel gereksinimlere göre dinamik sıvı yönetimi sağlayarak ihtiyaçlar dahilinde oluşabilecek ağırlık ihtiyacına anlık olarak cevap verecektir.



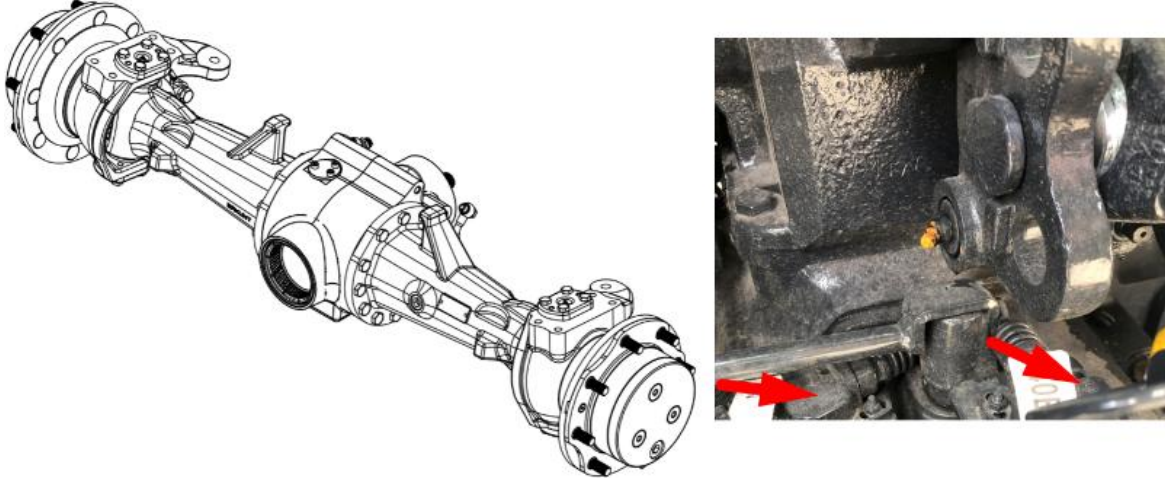
Şekil 12. Sistem Hiyerarşisi

Deneysel çalışmalar, farklı şanzımanlara sahip traktörler üzerinde gerçekleştirilmiş olup motorların kararlı veri üretme kapasitesine sahip olmaları temel seçim kriteri olarak belirlenmiştir. Deneyler, dış çevresel etkilerin minimuma indirildiği, düşük sürtünmeli bir test odasında yürütülmüştür. Test ortamı sıcaklık, nem ve zemin koşulları açısından sabit tutulmuş; ağırlığı etkileyebilecek olan yakıt ve diğer sıvı tüketim kaynakları test süresince aynı koşullar altında sağlanmıştır (Şekil 13).



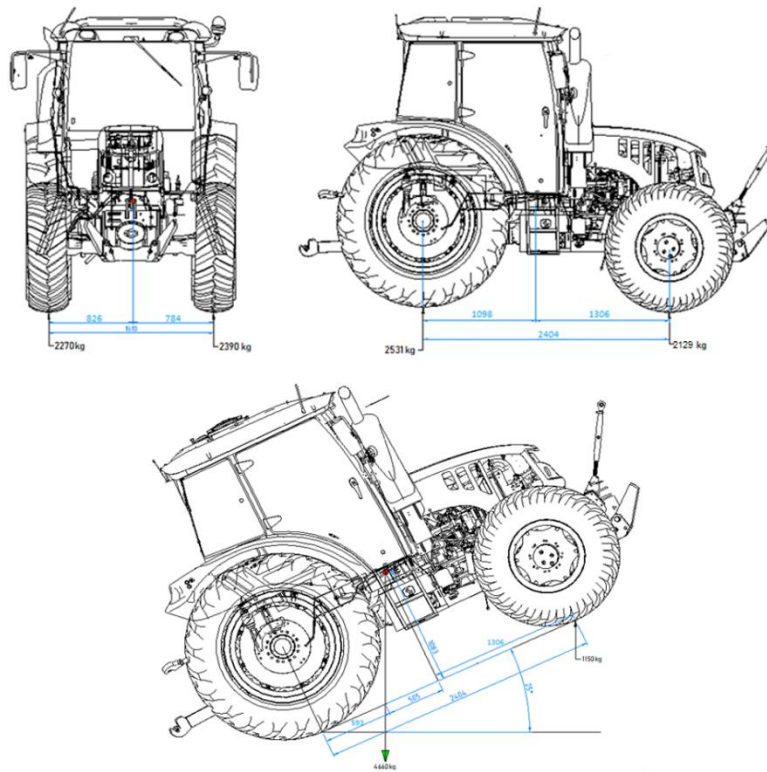
Şekil 13. Ar-Ge Test-1 Odası – Sabit Sıcaklık, Sabit Zemin, Standart Sıvı İkmal. Traktöre entegre edilen ağırlık sensörleri aracılığıyla ön aks üzerindeki ağırlık dağılımı sürekli olarak izlenmiştir. Ayrıca, ivmeölçer sensörü ile eğim ve ivme verileri gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir (Şekil 14). Bu veriler doğrultusunda, davranışlara göre

sistemi harekete geçirebilmek için hesaplamalar yapılarak kontrol ünitesi programlanmıştır. ECU, bu verileri analiz ederek sistemin devreye girip girmeyeceğine karar vermiştir. Sistem, belirlenen eşik değerlerinin altına düştüğünde otomatik olarak aktif hale gelmiş ve dengeleme tankının sıvı hacmini dinamik bir şekilde ayarlayarak, ağırlık ihtiyacına cevap verebilecek duruma getirmiştir.



Şekil 14. Ön Aks Üzerine Yerleştirilen Ağırlık ve İvme Sensörleri

Testler 15° ila 25° eğim arasında değişen senaryolar ile gerçekleştirilmiştir. Her senaryo, belirli bir yükleme ve eğim kombinasyonuna göre yapılandırılmıştır. Traktörün farklı şanzıman yapılarından süregelen farklı ağırlıklara göre verdikleri tepkiler karşılaştırılmıştır. Her testte, sistemin devreye girme süresi, ağırlık merkezi değişimi, devrilme açısı ve stabilite kazancı gibi performans göstergeleri gözlemlenmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Ağırlık Merkezindeki Değişim

Toplanan veriler hesaplama yoluyla elde edilen teknik parametreler üzerinden analiz edilmiştir. Özellikle ağırlık merkezi konumundaki değişim, ECU 'nun tepki süresi, sistemin dengeleme başarımı ve devrilme açısı gibi metrikler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Performans göstergeleri, sistematik bir şekilde tablo şeklinde izlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Test Verileri

Motor Tipi	Şanzıman Tipi	Ön-Arka Aks Arası Mesafe	Ön Teker İz Genişliği	Arka Teker İz Genişliği	G Yüksekliği	Traktör Yüksekliği
E-Capra	557	2404mm	1512-1808mm	1470-2010mm	1083mm	2876-2926mm
	537	2327mm	1536-1835mm	1500-1900mm	630mm	2650-2725mm
	506	2310mm	1536-1835mm	1500-1900mm	630mm	2620-2700mm

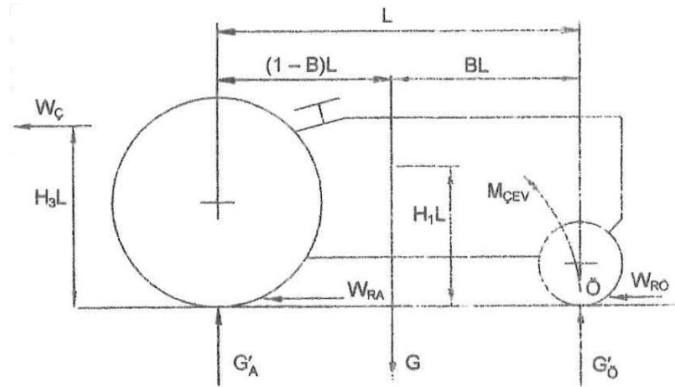
2.1. İstatistik ve Analizler

Traktörler; çekme, itme ve frenleme gibi çeşitli dinamik yükler altında çalışan tarım makineleri olarak tanımlanır. Bu makinelerin eğimli arazilerdeki performansını doğru şekilde değerlendirebilmek için traktöre etki eden kuvvetlerin analiz edilmesi gerekmektedir (Şekil 16).



Şekil 16. Ar-Ge Test-2 Odası – Çekme, İtme, Frenleme

Söz konusu dinamik yükler, traktörün hem yapısal stabilitesini hem de araziyle olan etkileşimini doğrudan etkileyerek operasyonel güvenlik ve çalışma verimliliği açısından kritik bir rol üstlenir (Şekil 17).



Şekil 17. Traktöre Etkiyen Kuvvetler

$G'_A = G'_0$ durumunda şahlanma eşliğindedir.

$G'_A > G'_0$ durumunda şahlanma başlamıştır.

$G'_A < G'_0$ durumunda yatay dengededir.

Ö noktasına göre moment alınması durumunda;

$$G'_A L - BLG - H_3 L W_C = 0$$

$$G'_A = BG + H_3 W_C$$

Maksimum itme kuvveti;

$$\begin{aligned} P_{maks} &\leq \mu h(BG + H_3 W_C) = W_C + W_R \\ W_C(1 - \mu hH) &= \mu hBG - fG \\ W_C &= \frac{(\mu hB - f)G}{1 - \mu hH_3} \end{aligned}$$

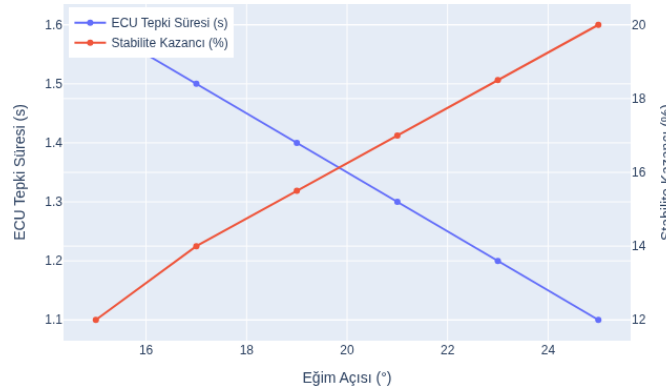
W_C konumuna bağlı olarak ortaya çıkan M_{CEV} momenti, taşıtın dinamik dengesini doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu momentin büyüklüğü ve yönü özellikle eğimli arazilerde veya ani yük transferi durumlarında taşıtın stabilitesini bozabilecek etkiler oluşturmaktadır. Dolayısıyla taşıtın güvenli ve kontrollü bir şekilde çalışabilmesi için M_{CEV} momentinin sınırlandırılması ve yük merkezinin uygun konumda tutulması büyük önem taşır.

W_C nedeniyle ortaya çıkan M_{CEV} momentinin taşıt dengesi için ön tekerleri havaya kaldırmaması gerekmektedir. Bunun için;

$$\begin{aligned} G'_0(1 - B)G - H_3 \cdot W_C &\text{ ise,} \\ G'_0 > 0 &\text{ şartı sağlanmalıdır.} \end{aligned}$$

2.2. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada geliştirilen ağırlık merkezi dengeleme mekanizması, eğimli arazilerde çalışan traktörlerin ağırlık merkezini optimize ederek devrilme riskini azaltma konusunda başarılı sonuçlar vermiştir. 15° ila 25° arasında değişen eğim senaryolarında gerçekleştirilen testler; sistemin devreye girme süresi, ağırlık merkezi değişimi ve stabilite kazancı gibi metriklerde anlamlı iyileştirmeler göstermiştir (Şekil 18).



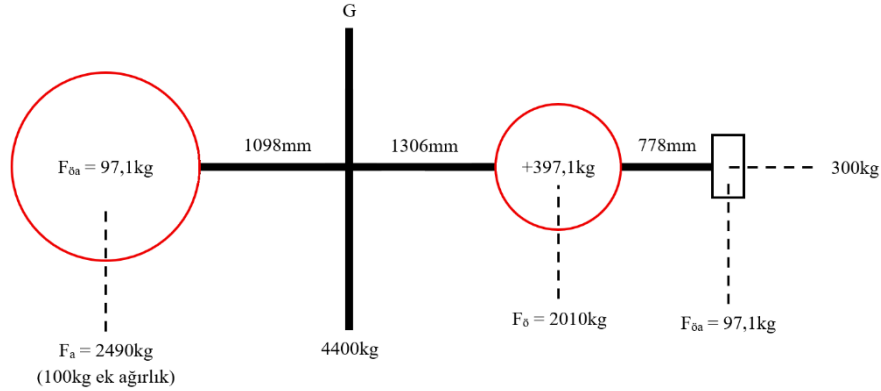
Şekil 18. Sistemin Tepki Süresine Bağlı Stabilite Kazancı

Elde edilen veriler doğrultusunda, eğim açısının artmasıyla birlikte sistemin daha hızlı devreye girdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, tepki süresinin azalmasına katkı sağlayarak sistemin daha hızlı ve etkin bir şekilde dengeleyici müdahalede bulunmasına olanak tanımaktadır. Tepki süresinin bu denli hızlı olması, traktörün daha güvenli ve kontrollü bir çalışma performansı sergilemesini sağlamaktadır.

Tablo 1’de, aynı motor yapısına sahip fakat farklı şanzıman konfigürasyonlarıyla donatılmış üç traktör modeline ait ölçüm verileri sunulmaktadır:

- 557 (Erkunt – ArmaTrac 1254Lux CRD5)
- 537 (Erkunt – Kıymet 90Lux CRD5)
- 506 (Erkunt – Kudret 105E+ CRD5)

Bu veriler, ağırlık merkezine etki eden parametrelerin önemini ve sistemin farklı yapılandırmalar üzerindeki etkisini görsel olarak ortaya koymaktadır (Şekil 19).



Şekil 19. Ağırlık Merkezini Etkiyen Parametreler

Ön aksa etkiyen kuvvet (F_o);

$$F_o = 1098/2404 \cdot 4400 = 2010kg$$

Arka aksa etkiyen kuvvet (F_a);

$$F_a = (1306/2404 \cdot 4400) + 100 = 2490kg$$

Ön-arka aksa arasındaki etkileşim kuvveti (F_{oa});

$$F_{oa} = 778/2404 \cdot 300 = 97,1kg$$

Bu değerlere göre kuvvet dengesi (F_o);

$$300 + 97,1 = 397,1kg$$

Elde edilen bulgular, literatürde yer alan traktör devrilme nedenleriyle örtüşmektedir. Özellikle [9] ön aks yük dağılımının bozulması ve şaşlanması riski bu çalışmada sistemin müdahale ettiği kritik noktalarla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, teorik analizle karşılaştırıldığında sistemin “ $GA = BG + H_3 \cdot W_c$ ” denklemini sağlayacak şekilde ağırlık merkezini dengelediği görülmüştür. Bu, ön tekerlerin havaya kalkmasını önleyen kritik bir eşik değerinin sistem tarafından başarıyla kontrol edildiğini göstermektedir.

3. Sonuçlar

Bu çalışma, eğimli arazilerde çalışan traktörlerde ağırlık merkezinin dinamik olarak dengelenmesini sağlayan elektromekanik bir sistemin etkinliğini ortaya koymuştur. Sistem, sensör verilerine dayalı olarak gerçek zamanlı dinamik olarak tepki verebilmekte ve devrilme riskini anlamlı düzeyde azaltmaktadır.



4. Tartışma

Sistemin dijital tarımın gelişen ihtiyaçlarına uyum sağlayacak şekilde IoT tabanlı veri izleme ve uzaktan kontrol özellikleriyle entegre edilmesi, tarım teknolojileri alanında önemli katkılar sunacaktır.

5. Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde teknik altyapı, veri desteği ve uygulama olanakları sağlayan Erkunt Traktör Sanayii A.Ş. 'ye teşekkür ederim. Ayrıca, bilimsel paylaşım ortamını sağlayarak bu bildirinin sunulmasına imkân tanıyan RDCONF organizasyonuna ve katkı sunan tüm paydaşlara teşekkürlerimi sunarım.



Referanslar

- [1] G. Casini-Ropa, "Il Rilievo Delle Coordinate Del Baricentro Nei Trattori a Due Assi a Ruote Pneumatiche," *Rivista di Ingegneria Agraria*, vol. 1, pp. 15–25, 1976.
- [2] G. Casini-Ropa, "Attrezzatura E Metodo Per Il Rilievo Dell'altezza Da Terra Del Baricentro Delle Macchine Agricole," *Rivista di Ingegneria Agraria*, vol. 2, pp. 81–85, 1976.
- [3] EC, "Proposal for a Council Directive On the Approximation of the Laws of the Member States Relating to Roll-Over Protection Structures Incorporating Two Pillars and Mounted In Front of the Driver's Seat on Narrow-Track Wheeled Agricultural or Forestry Tractors," *Official Journal of the European Communities*, vol. 28, no. C222/1, pp. 1–77, 1985.
- [4] H. Göhlich, *Mensch und Maschine*, Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin, 1987.
- [5] M. K. Jang, S. J. Kim, B. S. Shin, and J. S. Nam, "Lateral Overturning and Backward Rollover of Agricultural Tractors: A Review," *Agriculture (Switzerland)*, MDPI, Mar. 2024.
- [6] T. Kut, "Traktörlerde Kütleli Atalet Momentlerinin Saptanması Üzerinde Bir Araştırma," İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Ziraat Makinaları Birimi, İstanbul, 1982.
- [7] A. Saral, *Tarım Traktörleri*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No:1471, Ders Kitabı 436, pp. 141–152, 1997.
- [8] H. Silileli, "Traktörlerin Uzunlamasına Eksende Kütleli Atalet Momenti ve Ağırlık Merkezinin Salınım Yöntemiyle Belirlenmesi," *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, vol. 3, no. 4, pp. 217–224, 2007. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/119155>
- [9] S. O. Yıldız, S. Olum, and H. Velioğlu, "Tarım Traktörlerinde Hidrolik Kaldırma Kuvvetinin Geriye Devrilme (Şahlanma) Noktasına Etkisi Üzerine Bir Çalışma," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 133–143, 2025. doi: 10.21923/jesd.1452910
- [10] R. W. Wilson, "Hydraulic Power Lift Controls and Power Utilization for Larger Tractors," *SAE Transactions*, vol. 80, sec. 4, pp. 2378–2385, 1971.