

Tarımsal İlaçlamada Kullanılmak Üzere GPS Destekli Oransal Kontrolcü Biriminin Geliştirilmesi

Güven AKGÜL^{1*}, Nazır Can ALADAĞ¹, Ali TAŞKIRAN¹, Bekir YALÇIN²

¹Önallar Tarım Makineleri AŞ. Tasarım Merkezi, Konya, Türkiye.

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye.

*Sorumlu Yazar: guven@onallar.com.tr

Geliş Tarihi: 05.12.2022 Düzeltme Geliş Tarihi: 18.04.2023 Kabul Tarihi: 24.04.2023

ÖZ

Tarımsal ilaçlamada otomasyon, hem arazi ve bitki verimliliği açısından hem de girdilerin azaltılması bakımından giderek önemli hale gelmiştir. Bu çalışmada, tarım ilacı normuna uygun dozajda ilaçlamanın yapılabilmesi için oransal kontrol biriminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, ilaçlama ve hidrolik sistemi kontrolü ve gerçek zamanlı hıza bağlı tarım ilacı akış miktarının kontrolü ele alınarak oransal kontrol birimi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem; ana hatlarıyla motorlu valfler, debimetre, basınç sensörü, insan makina arayüzü (HMI) ekranı ve elektronik kontrol biriminden (ECU) oluşmaktadır. Sistemdeki yüksek basınçlı ilaç akış miktarının, traktör ilerleme hızına ve kuyruk mili (PTO) devrine göre istenilen düzeyde tutulabilmesi için Hassas Oransal İntegral Türevsel Kontrol (PID) yöntemi kullanılmıştır. Sistemde ilaçlama yapılacak alanın kayıt altına alınabilmesi için integral uygulamaları kullanılarak algoritmalar geliştirilmiştir. Ayrıca, sistemde Küresel Konumlama Sisteminin (GPS) ölçümlerinin doğruluğunu arttırmak amacıyla da Genişletilmiş Kalman Filtre (EKF) algoritmaları geliştirilmiştir. Tüm bu algoritmaların oluşturduğu prototip oransal kontrolcünün performans testlerinde ilaçlama hatası maksimum %–2.32 kabul edilebilir düzeyde elde edilmiş ve geliştirilen kontrolcü birimin ülkemiz ilaçlama makina sektöründe uygulanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: PID kontrol, ilaçlama makinası, GPS, oransal pestisit ilaçlama, akış kontrol.

Development of GPS Aided Proportional Controller Unit Used in Agricultural Spraying

ABSTRACT

Automation in agricultural spraying has increasingly become important in terms of both land and plant production and also decreasing of cost. In this study, it is aim to develop a proportional control unit that will be able to spray in accordance with the pesticide norm. In this context, proportional controller was developed by taking into account controlling of spraying and its hydraulic system and pesticide flow amount depending on real time speed. The developed system basically consists of motorized valves, flowmeter, pressure sensor, human machine interface (HMI) and electronic control unit (ECU). Sensitive Proportional Integral Derivative Control (PID) was developed to keep the desired level of high pressured pesticide flow amount in the spraying system according to feed rate of tractor and its shaft spindle (PTO). Algorithms were developed using integral applications to record of area to be sprayed. Besides, in order to increase the accuracy of measurements made with global position system (GPS), extended layer filtering (EKF) algorithms were created. –2.32 % acceptable spraying maximum error was obtained in performance tests of the developed prototype proportional controller unit for pesticide spraying. It is also concluded that the developed controller unit can be applied in spraying machine sector.

Key words: PID Control, Spraying Machine, GPS, Proportional Pesticide Spraying, Flow Control.

GİRİŞ

Artan dünya nüfusuna bağlı olarak, tarım arazilerinden elde edilen ürün miktarı ve kalitesinin artırılmasına yönelik teknolojik uygulamaların önemli hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, tarımsal alanlarda görülen zararlı, hastalık ve yabancı otlar ile mücadelede tarım ilacının direkt bu hedeflere uygulanması yaygınlaşmaktadır. Tarım ürünlerinin yaklaşık üçte birinin ilaçlama uygulamasına bağlı olarak üretilebileceği ve ilaçlama yapılmaması durumunda da meyve üretiminde %78, sebze üretiminde %54 ve tahıl üretiminde %32 kayıp meydana geleceği bildirilmektedir (Tudi vd., 2021). Bu nedenle tarım ilaçları, dünya genelinde hastalıkları azaltmada ve ürün kayıplarını azaltmada kritik rol oynamaktadır. Zararlılar ile mücadele konusunda tarım ilacı ve sıvı gübre kullanımının Bütünleşik Haşere Yönetimi (BHY) kapsamında bilinçli olarak yapılması gerekmektedir. Tiryaki vd. (2010), doğru kullanılmayan ilacın tarımsal ürünlerde kalıntılara yol açarak insan ve doğa sağlığı üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu vurgulamaktadır. Tarım ilaçları geliştirilen ilaçlama makineleriyle; öncelikle bitki ve zararlı üzerine ve doğrudan yabancı otlar yüzeyine uygulanmaktadır. Altıkat vd. (2009), ilaçlama uygulaması sonrasında toprağa nüfuz eden tarım ilacının kalıcı olması ve toprağın organik yapısının değişmesi gibi önemli verimsizlik problemlerine neden olduğunu rapor etmektedir.

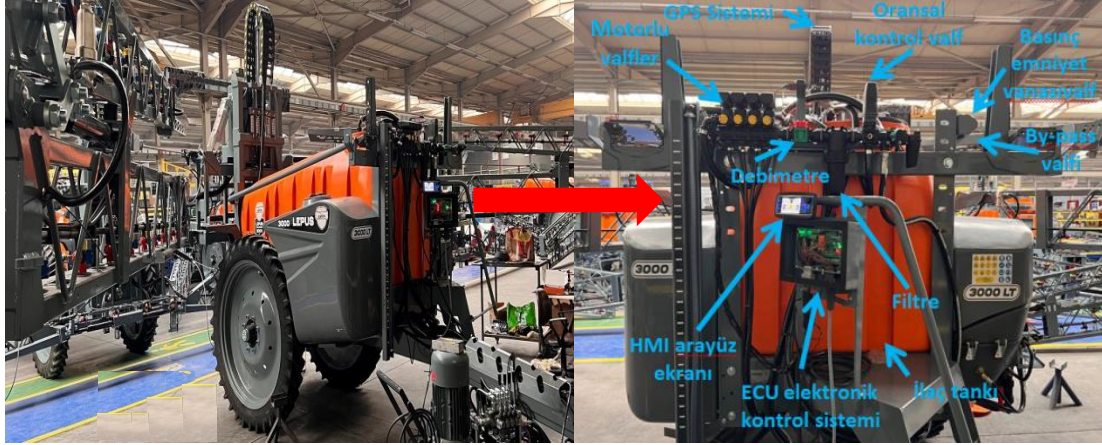
Gelişmekte olan ülkelerde, tarladaki gübreleme ve ilaçlamanın halen geleneksel yöntemlerden biri olan el ile gerçekleştirilmektedir. Rao ve Rao (2019)' da araştırmasında, kontrolsüz kullanılan tarım ilacı kimyasalları sebebiyle birçok sağlık problemine neden olan durumların ortaya çıktığını vurgulamaktadır. Geleneksel yöntemler ile yapılan ilaçlama işleminde arazi ve toprak şartları, traktörün ilerleme hızı veya operatör kaynaklı etkenler, yetersiz ya da gereğinden fazla ilaç uygulanmasına yol açmaktadır. Bu durum ilaçlama maliyetlerinin artmasına, su kaynaklarının kirlenmesine ve verimli toprağın zarar görmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra; tarım ilacı normuna uygun olmayan ilaçlamanın bitkiyi zararlılardan koruyamadığı ve fazla miktarda uygulanan tarım ilacının ise tarım ürünlerinin üzerinde ilaç kalıntısına neden olduğu bilinmektedir. Ürün üzerindeki ilaç kalıntısının da, tarımsal ürünün ihracatında sorunlara neden olduğu ve belli düzeyde ilaç kalıntısı bulunan ürünlerin gıda denetim standartlarını sağlayamadığı üreticiler tarafından bilinmektedir. Bu bağlamda, bu problemlerin en aza indirilebilmesi ve birim alana uygulanması gereken ilaç miktarının normuna uygun olarak ilaçlama yapılabilmesi için, ilaçlama pompasından yüksek basınç ve hız ile akan tarım ilacının debisi debimetre ile gerçek zamanlı olarak ölçülmesi gerekmektedir. Akış miktarı belirlenen ilaç, motorlu valfler gibi akış yönlendirme kontrollü püskürtücüler ile hastalığın görüldüğü bitki, yabancı otlar ve zararlılara püskürtülmelidir. Püskürtülecek ilaç miktarı sabit kabul edildiğinde, traktörün ilerleme hızına göre birim alana atılan ilaç miktarı değişim göstermektedir. Traktör ilerleme hızının sabit tutulması birim alana atılan ilaç miktarını istenilir düzeyde tutabilir ancak pratikte tarla koşulları ve operatör hataları sebebiyle ilaç normuna uygun stabilitede ilaçlamanın çok zor olduğu anlaşılmaktadır.

ABD'nin Güney Carolina eyaletinde, tarımsal ilaç uygulamalarının doğruluk düzeyinin belirlenmesi üzerine yapılan araştırmada (Tobi ve Sağlam, 2015), ilaçlama uygulamalarında tarım ilacı normuyla uygulanan ilaçlama miktarı arasında maksimum hatanın %10 olması kabul edilmektedir. Türkiye'nin Adana ilinde pülverizatörler üzerine yapılan bir araştırmada ise, tarım ilaçlamanın %39'unun kabul edilebilir hata sınırları içerisinde olduğu, %36'sının ise önerilen dozdan yüksek olduğu ve %23'ünün ise önerilen dozdan düşük miktarda olduğu bildirilmiştir (Tobi ve Sağlam, 2015). Ulusal ve uluslararası ilaçlama uygulamalarında, akış ve birim alana atılan ilaç miktarı kontrolüne yönelik birçok araştırma mevcuttur. İspanya'da gerçekleştirilen bir çalışmada (Solanelles vd., 2006), bağlarda yapılan ilaçlama uygulamasında oransal motorlu valfler ve ultrasonik sensörler kullanılarak akış kontrolü sağlanmıştır. Böylece, birim araziye atılan ilaç miktarının tarım ilacı normuna uygun olarak kontrol altına alınabildiği rapor edilmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada ise (Atcıoğlu ve Bayat, 2018), İtalya menşeli Bravo 180 otomatik kontrol sisteminin tarla pülverizatörüne entegre edildikten sonra sistem 100, 150, 200 ve 300 lha⁻¹ ilaç norm değerleri ile test edilmiş ve ilaçlama işlemi boyunca tarım ilacı debi değerlerinde değişimlerin olduğu ileri sürülmektedir.

Ülkemiz tarım ilaçlama sektöründe otomasyon çalışmalarının henüz yeni başlamış olduğu literatür ve piyasa araştırmasından anlaşılmıştır. Bu çalışmada, tarım ilacı normuna uygun dozajda ilaçlama yapabilecek oransal kontrol biriminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, ilaçlama ve hidrolik silindirin kontrolü, gerçek zamanlı hıza bağlı tarım ilacı akış miktarın kontrolü ele alınarak oransal kontrolcü birimi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem; ana hatlarıyla motorlu valfler, debimetre, basınç sensörü, HMI ekranı ve ECU' dan oluşmaktadır. Sistemdeki yüksek basınçlı tarım ilacı akış miktarının istenilen düzeyde tutulabilmesi için PID, ilaçlama yapılacak alanın kayıt altına alınabilmesi için integral uygulamaları ile birlikte GPS ölçümlerinin doğruluğunu arttırmak için de EKF algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen oransal kontrolcü birimin performans testleri gerçekleştirilmiştir.

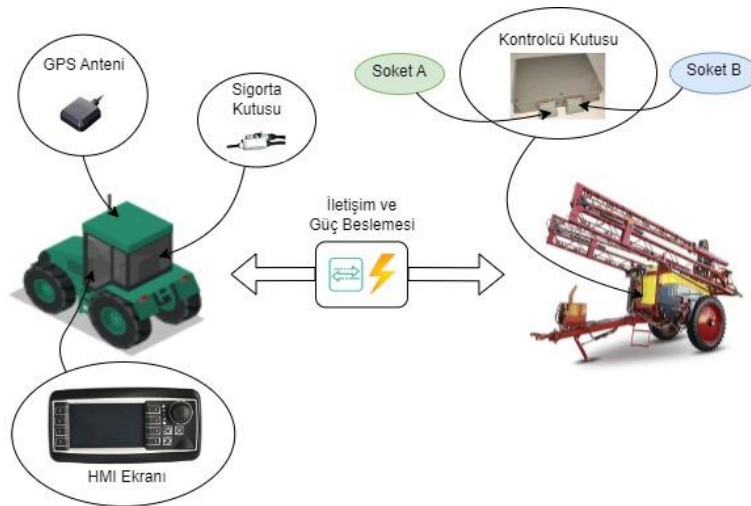
MATERYAL ve METOT

Bu alanda yapılan çalışmalar (Karadöl vd., 2017; Kushwaha and Giri, 2013; Tahmesebi vd., 2012) incelendikten sonra, tarım ilacı normuna uygun dozda ilaçlama yapabilecek GPS destekli oransal kontrol biriminin geliştirilmesi planlanmış ve denenmesi için Şekil 1’ de verilen Önallar marka tarla pülverizatörü kullanılmıştır. Bu bağlamda, kontrol biriminin araç ilerleme hızı, tarım ilacı akış debisi, akış basıncı, ilaçlanan alan, deposundaki kalan ilaç miktar gibi durum parametrelerini algılamak amacıyla ECU ve ECU ile haberleşmeyi sağlayan kontrolü etkin hale getirecek HMI arayüz tasarlanmıştır.



Şekil 1. a) GPS destekli tarım ilaçlama oransal kontrol biriminin uygulandığı ilaçlama makinası, b) GPS destekli tarım ilaçlama oransal kontrol birimi.

Kontrol sisteminde, durum parametrelerini algılamak amacı ile bir adet debimetre, bir adet basınç sensörü ve bir adet GPS alıcısı kullanılmıştır. GPS alıcısında, araç hız bilgisinin elde edilmesi için gerçek zamanlı saat (RTC) ve elektrik kesintisine karşı silinebilir programlanabilir salt okunur bellek (E-EPROM) bulunmaktadır. GPS alıcısının desteklediği L1 frekansı 1575.42 mhz değerindedir. Şekil 2’ de görüleceği üzere, traktör dijital hız göstergesine sahiptir ve traktör hızı profesyonel hız ölçüm cihazıyla kalibre edilmiştir. Sistemde kullanılan debimetre 10-200 l dk⁻¹ ölçüm aralığına sahip ve ölçüm hassasiyeti % 0.1 dir. Basınç sensörü 0-60 bar ölçüm aralığına sahiptir. Elde edilen durum parametreleri ile tarım ilacı akış kontrolünün yapılabilmesi için sisteme düzenleyici ile birlikte dört adet bölüm valfi, bir adet by-pass valfi ve bir adet oransal kontrol valfi adapte edilmiştir. Şekil 1’ de verilen ilaçlama makinasının püskürtücü çubuğa kabul görmüş tekniğe bağlı olarak 50 cm aralıklarla 30 adet nozul yerleştirilmiştir. Şekil 2’ de GPS destekli oransal kontrol biriminin şematiği verilmiştir.



Şekil 2. Tarımsal ilaçlamada GPS destekli oransal kontrol biriminin şematiği.

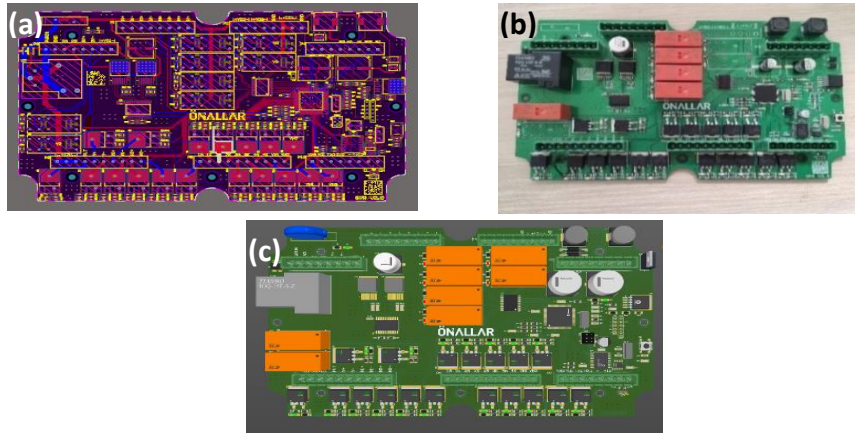
Tasarımı gerçekleştirilen kontrol kartında mikro denetleyicide (MCU) çalışacak kontrol algoritması oluşturularak HMI ve kontrol kartı arasında veri aktarımı denetleyici alan ağı (CAN-Bus) haberleşme protokolü

ile sağlanmıştır. Su ve toz gibi saha şartlarından etkilenmeyen HMI arayüz ekranıyla (Şekil 3) ile tarım traktör ilerleme hızı, sıvı basıncı, toplam akış miktarı, anlık akış miktarı, ilaçlanmış alan, depoda kalan ilaç miktarı, ilaçlama valf durumları gibi tüm bilgiler gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3. HMI arayüz ekranı.

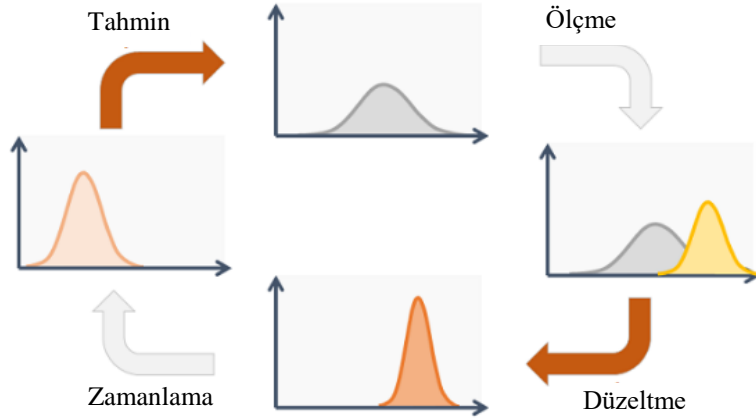
Hidrolik silindir valfi kontrolüyle, ilaçlama makinası püskürtücü çubuğun açılıp kapatılması, dengelenmesi ve yükseklik ayarı yapılabilmektedir. HMI ara yüz ekranında, bir adet enkoder, dokuz adet özelleştirilebilir buton ve üç adet fonksiyon butonu tercih edilmiştir. Tüm kontrol işlemleri ve sensör verileri göz önüne alınarak kontrol kartı mikro denetleyici birimi olarak 8 bitlik bir bileşen kullanılmasına karar verilmiştir. MCU ve ihtiyaç duyulan sensör elemanları belirlenerek Altium Designer programı üzerinde tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de ECU tasarım, işlenmiş ve prototip görüntüleri yer almaktadır. Kullanıcı arayüzü üzerinden verilen komutlar CAN-Bus ile ECU'ya iletilmektedir.



Şekil 4. a) Altium Designer programıyla tasarlanmış devre kartı, b) Üretilmiş devre kartı, c) Altium Designer programıyla tasarlanmış devre kartının üç boyutlu görüntüsü.

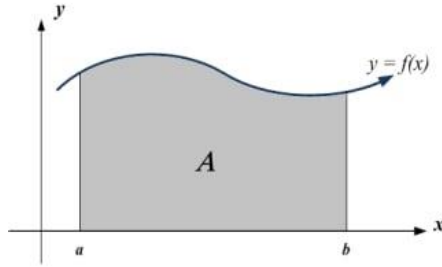
CAN-Bus aracılığı ile iletilen veriler ECU içerisine gömülmüş olan algoritma marifetiyle işlenmekte ve oransal valf ile tarım ilacı debisi kontrol edilmektedir. ECU; debimetre, basınç ve GPS sensörler ile GPS tarafından alınan bilgileri anlamlandırmaktadır. Sistem bu verilere göre kontrol parametrelerini güncellemekte ve CAN-Bus üzerinden HMI ekrana iletmektedir.

Geliştirilen kontrol birimi, toplam ilaçlama iş genişliğindeki aktif olan bölümleri ve gidilen hızı gerçek zamanlı olarak tespit etmektedir. İşlem süresince ilaçlanmış toplam taranan alan hesabı, integral algoritmaları Eşitlik 1-3 ile yapılmaktadır. GPS aracılığı ile elde edilen hız verisinin doğruluğu, EKF algoritması kullanılarak artırılmıştır. EKF algoritması, hız verisi üzerindeki dalgalanmaları önleyerek sistemin kararsız bir yapıya geçmesini engellemektedir. Ayrıca, EKF algoritması U dönüşte ve çalışma alanı içerisinde gerçekleştirilen manevralar esnasında hız ölçümünün hata payını en aza indirmek için kullanılmıştır. EKF algoritmasının çalışma prensibi Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. EKF algoritmasının çalışma prensibinin şematifi.

Bilinen elektronik kontrol disiplninde, GPS verisi üzerinden elde edilen hız parametresine integral uygulanarak zamana bağı konum değişimi elde edilmektedir. Elde edilen anlık konum değişimi iş genişliği ile çarpılarak taranan alan hesaplanmaktadır. Araç hızının zamana bağı değişim grafiği temsili olarak Şekil 6' da gösterilmiştir ve matematiksel integral alan hesabı Eşitlik 1 ile yapılmıştır.



Şekil 6. Araç hız-zaman eğrisi.

$$X = \frac{\int_a^b f(x) dx \times L}{1000} \quad (1)$$

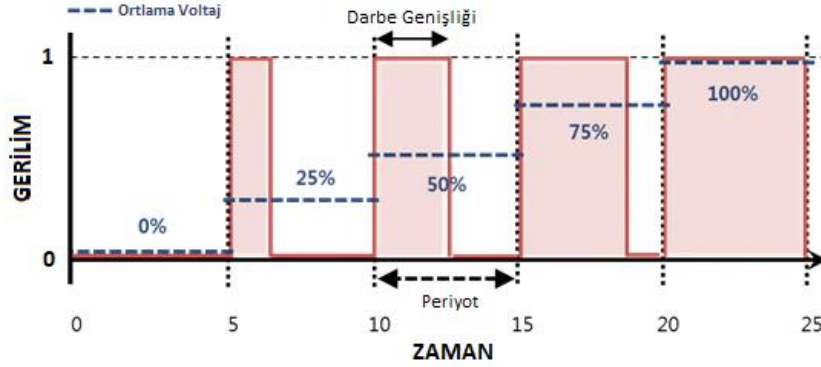
Eşitlik 1' de $y = f(x)$ hızın zamana bağı olarak fonksiyon denklemi, L aktif iş genişliği (m), X ise taranan alanı (daa) ifade etmektedir. MCU algoritmasına yönelik integral hesabı Eşitlik 2 ve 3 ile yapılabilmektedir. Eşitlik 2 ve 3' de, V gerçek zamanlı hız (km s-1) L aktif iş genişliği, X_t taranan alan (daa), X_{t-1} önceki periyoda ait taranan alan (daa), T ise kontrol periyodunu (sn) ifade etmektedir.

$$X_t = \left[\frac{\left(\frac{(V \times L \times T \times 1000)}{3600} \right)}{1000} \right] + X_{t-1} \quad (2)$$

$$X_t = \left[\frac{V \times L \times T}{3600} \right] + X_{t-1} \quad (3)$$

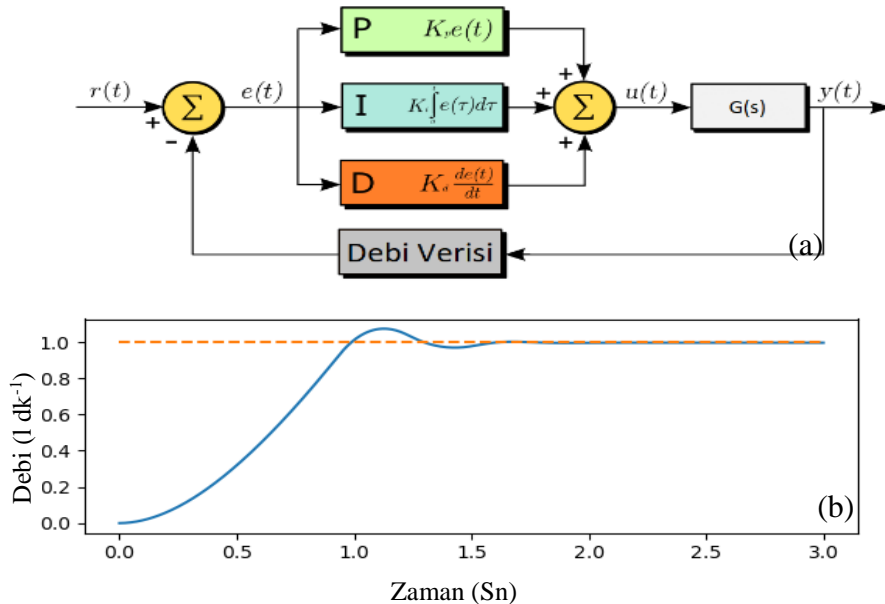
Kontrol kartı içerisine entegre edilmiş algoritma el ile ve otomatik kontrol olmak üzere iki farklı çalışma moduna sahiptir. El ile kontrol modunun aktif olduğu durumda, oransal kontrol valfi kullanıcı tarafından kontrol edilmekte ve oransal valf motorunun tam güç kapasitesi ile çalışmasından dolayı hassas ayarlanabilmesini

mümkün olamamaktadır. Elektronik uygulamalarında darbe genişlik modülasyonu (PWM), sinyali darbeler şeklinde kodlamak için kullanılan tekniktir ve çalıştırılan cihaza iletilen ortalama voltaj değeri, bir periyottaki pozitif alternansların oranı frekans ve görev döngüsü kontrol edilerek ayarlanmaktadır (Priyanka ve Mariyammal, 2018). Oransal valfin kontrolünde, motor kontrol hassasiyetini artırmak amacı ile darbe PWM kullanılmıştır. PWM uygulama işleminde, genel frekans aralığında seçilmesi durumunda yüksek PWM değerleri düşük hassasiyet, düşük PWM değerleri ise yetersiz güç sorunlarını ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla yüksek hassasiyet için, motora düşük frekanslı PWM uygulanmıştır. Bu durum Şekil 7’ de verilmiştir.



Şekil 7. Uygulanan PWM sisteminin akış diyagramı.

Diğer bir çalışma seçeneği olan otomatik moda ise oransal valf kontrolü için PID yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bilgisayar ortamında, MATLAB ve ANSYS Twin Builder kullanılarak oransal valf için uygun PID değerleri hesaplanmıştır. Şekil 8’ de verilen PID akış şemasında, $r(t)$ olması gereken tarım ilacı debisi, $e(t)$ olması gereken debisi ile uygulanan debisi arasındaki hatadır. P bloğu hata ile oransal kontrolcü katsayısının (K_p) çarpımı sonucu elde edilen oransal kontrolcü çıkışı olarak tanımlanmaktadır. I bloğu hatanın integrali ile integral kontrolcü katsayısının (K_i) çarpımıyla elde edilen integral kontrolcü bloğu, türevsel kontrol çıkışı olan D bloğu da hatanın türevi ile türevsel kontrolcü katsayısının (K_d) çarpımıyla elde edilir. Bu üç çıktı toplanarak transfer fonksiyonu $u(t)$ elde edilir. PID sisteminin temel modeli Şekil 8-a’ da gösterilmiştir.



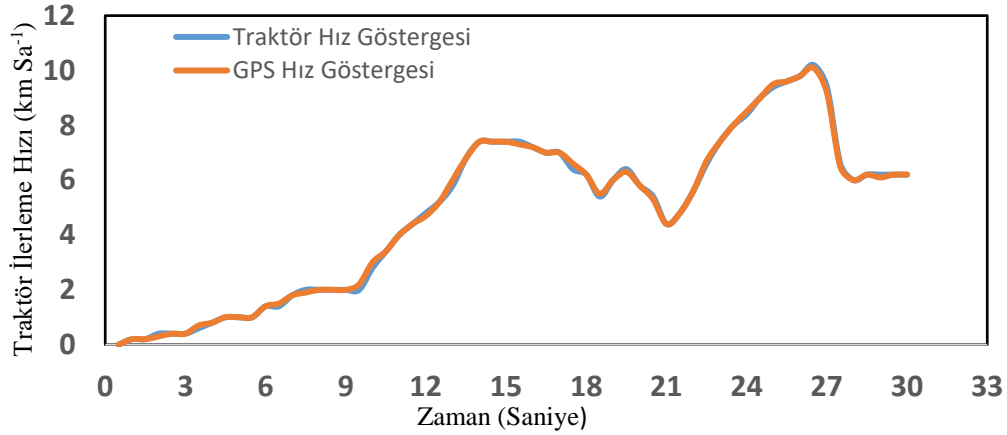
Şekil 8. PID sisteminin modeli ana modeli (a) ve PID kontrolcüsünün doğruluğu yaklaşık 1 saniye sonra oransal kontrol valfinin doğru değere ulaştığının gösterimi (b).

$G(s)$ PID sisteminin kontrolcüsüdür ve kontrol verisi buradan motora gönderilerek kontrol sağlanmaktadır. Debiyi kontrol etmek için püskürtme çubuğunun uzunluğu, aracın ilerleme hızı, birim alana

atılacak tarım ilacı norm değeri kullanılmış ve uygulanması gereken debi PID sistemine girdi olarak tanımlanmıştır. Şekil 8-b' ye göre geliştirilen PID kontrolcüsünün doğruluğu yaklaşık 1 saniye sonra oransal kontrol valfinin doğru değere ulaştığını ifade etmektedir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

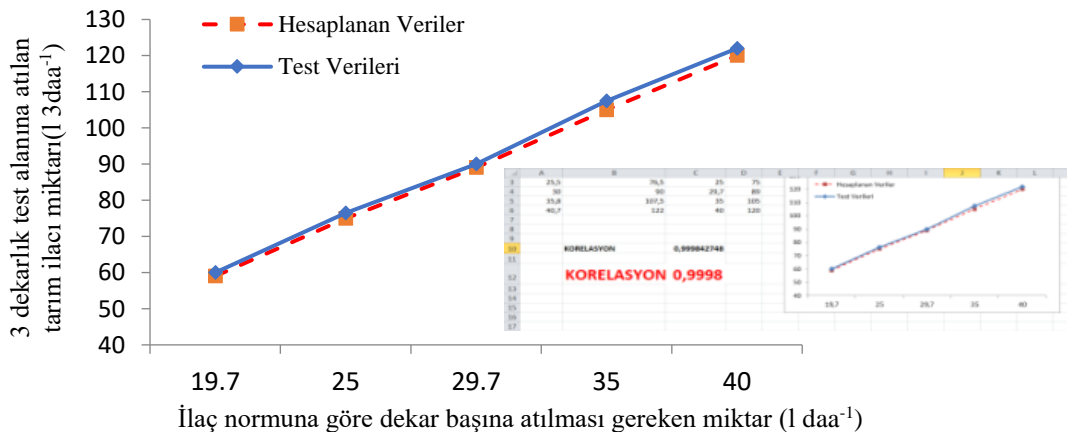
Geliştirilen kontrol biriminin testleri için Önallar marka Alfa D-10 model çapraz katlanır tarla pülverizatörü kullanılmıştır. HMI' ya girdi olarak iş genişliği bilgisi 15 m girilmiştir. Her test öncesi pülverizatör deposu 1000 litre su ile doldurulmuştur. Her test için norm değeri değiştirilmiş ve araç hız bilgisi 3-10 km/saat aralığında (Şekil 9), ortalama basınç 5 bar, mesafe bilgisi 200 m girdi olarak tanımlanarak, ilaç normuna göre uygulanan tarım ilacı miktarındaki sapmanın tayini için 5 farklı test ve üç farklı tekrar tercih edilmiş olup verilerin ortalama değerleri verilmiştir. Başlangıç test koşulları Tablo 1' de verilmiştir.



Şekil 9. Traktör ilerleme hızı ve GPS hız bilgisi.

Tablo 1. Geliştirilen kontrol biriminin testleri sırasındaki ilaçlama koşulları.

Test No	Depo su miktarı (L)	İlaçlama makinası iş genişliği (m)	Kullanılan tarım ilacının norm değerleri (l daa ⁻¹)
1	1000	15	40
2	1000	15	35
3	1000	15	30
4	1000	15	25
5	1000	15	20



Şekil 9. Teorik ilaç miktarıyla geliştirilen kontrol biriminin uyguladığı ilaç miktarı.

Şekil 9’ da geliştirilen kontrol biriminin test sırasında dekar basına ve üç dekara uyguladığı tarım ilacı miktarı ile teorik hesaplanan ilaç miktarı gösterilmektedir. Teorik hesaplana ve uygulanan ilaçlama miktarı arasındaki korelasyon katsayısı (r) Eşitlik 5’ temel bilgiye dayanarak excel ile hesaplatılmış ve 0.9998 olarak elde edilmiştir. Bilindiği üzere korelasyon katsayısı, iki sürekli değişken arasındaki ilişkiyi veren katsayıdır ve genellikle teoride Eşitlik 5 ile hesaplanmaktadır.

$$S = \frac{L \times N \times Y}{1000} \quad (4)$$

Tarım ilacı norm bilgisi, iş genişliği ve gidilen mesafe parametreleri dikkate alındığında, üç dekar alana atılması gereken ilaç miktarı Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, S atılan tarım ilacı miktarını ($l_{daa^{-1}}$), püskürtücülerin montajlandığı püskürtücü çubuğun uzunluğunu (m) veya aktif iş genişliğini (m), N tarım ilacı norm değerini ($l_{daa^{-1}}$) ve Y ise aracın aldığı yolu (m) ifade etmektedir. Teorik olarak hesaplanmış ve uygulanmış veriler Şekil 10’ da verilmiştir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n XY - n.X_o.Y_o}{\sqrt{\{\sum_{i=1}^n X^2 - n.X_o^2\} \{\sum_{i=1}^n Y^2 - n.Y_o^2\}}} \quad (5)$$

Bu denklemde n veri sayısını, X teorik hesaplanan tarımsal ilaç miktarını, Y geliştirilen kontrol sistemiyle uygulanan tarımsal ilaç miktarını, X_o ortalama hesaplanan tarımsal ilaç miktarını, Y_o ise geliştirilen kontrol sistemiyle uygulanan tarımsal ilaç miktarını temsil etmektedir. Korelasyon katsayısı değeri $-1 \leq r \leq 1$ aralığında değer almaktadır. $r = -1$ olması durumunda iki veri negatif yönde mükemmel bir ilişkiye sahip olduğu, $r = 1$ olması durumunda da iki veri aynı yönlü mükemmel uyum içerisinde anlamına gelmektedir. Elde edilen 0,9998 korelasyon katsayısı değerinin teorik atılması gereken tarım ilacı miktarı ile geliştirilen oransal kontrol biriminin uyguladığı tarım ilacı miktarının aynı yönlü oldukça uyumlu olduğunu ifade etmektedir. Hesaplanan tarım ilacı miktarı ile ilaçlama yapılan tarım ilacı miktarı arasındaki bağıl hata ölçme disiplinindeki temel denklem olan Eşitlik 6 ile hesaplanmıştır.

$$\%BH = \frac{X_i - X_t}{X_t} \times 100 \quad (6)$$

Eşitlik 6’ da, X_i Eşitlik 4 ile hesaplanan teorik atılması gereken ilaç miktarı, X_t geliştirilen kontrol sistemiyle atılan ilaç miktarını ve %BH ise geliştirilen kontrol sisteminin bağıl hatasını vermektedir. Tablo 2’ de teorik hesaplanan ve kontrolcünün uyguladığı tarım ilacı miktarlarının sapma oranları, 5 ölçüm sonucunda excel programı kullanılarak hesaplanmıştır ve sapmanın aritmetik ortalaması $\% -0.62$, geometrik ortalaması $\% 1.68$ ve standart sapması $\% 1.67$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bubağıl hatanın kabul edilebilir $\% \mp 10$ oranının (Atcioğlu ve Bayat, 2008) çok altında olduğu belirlenmiş olup, geliştirilen oransal kontrol sistemi prototipin, ticari ilaçlama makinalarına adapta edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 2. Hesaplanan ve atılan tarım ilacı miktarları.

Test No	Teorik atılması gereken ilaç miktarı (L)	İlaçlama makinası ile yapılan tarım ilacı miktarı (L)	Bağıl hata oranı (%)
1	60	59	1.69
2	75	76.5	-1.96
3	90	89	1.12
4	105	107.5	-2.32
5	120	122	-1,63

Yapılan beş test sonucu, atılması gereken teorik tarım ilacı miktarı ile kontrolcünün uyguladığı ilaç miktarı arasındaki sapma oranının aritmetik ortalaması $\% -0.62$, geometrik ortalaması $\% 1.68$ ve standart sapması $\% 1.67$ olarak hesaplanmıştır. Bu oranların kabul edilebilir değerlerin altında olduğu anlaşılmıştır (Felizardo vd., 2013).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Ülkemiz ilaçlama makineleri imalatında, elektronik ve otomasyon uygulamaları henüz yeni başlamış olup, prototipi geliştirilen GPS destekli elektronik ilaçlama oransal kontrol biriminin uygulamalı test edildiği bu çalışmada;

- Geliştirilen PID kontrolcüsünün doğruluğu yaklaşık 1 saniye sonra oransal kontrol valfinin doğru değere ulaştığı görülmüştür. Elde edilen 0.9998 korelasyon katsayısıyla, teorik atılması gereken tarım ilacı miktarı ile geliştirilen oransal kontrol biriminin uyguladığı tarım ilacı miktarının aynı yönlü oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- Teorik atılması gereken ilaç miktarı ile kontrolcünün uyguladığı ilaç miktarı arasında maksimum%–2.32 bağıl hata görülmüştür. Elde edilen bu bağıl hatanın kabul edilebilir ± 10 oranın (Atcıoğlu ve Bayat, 2008) çok altında olduğu belirlenmiş olup, geliştirilen oransal kontrol sistemi prototipin, ticari ilaçlama makinelerine adapte edilebileceği sonucuna varılmıştır.
- Yapılan beş test sonucu, atılması gereken teorik tarım ilacı miktarı ile kontrolcünün uyguladığı ilaç miktarı arasındaki sapma oranının aritmetik ortalaması ± 0.62 , geometrik ortalaması ± 1.68 ve standart sapması ± 1.67 olarak hesaplanmıştır. Bu oranların kabul edilebilir değerlerin altında olduğu anlaşılmıştır (Felizardo vd., 2013).
- Geliştirilen oransal ilaçlama biriminin ürün ilaçlama sırasında birim alana düşen ilaç miktarının düşük hata payı ile gerçekleştirilmesi sonucu bu alanda ticarileşmenin önünün açık olduğu düşünülmektedir.

Teşekkür: Bu makale çalışması, Önallar Tarım Makineleri AŞ. firmasının Tasarım Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Destekleri için firmaya teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı: Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti: Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

KAYNAKLAR

- Altıkat, A. Turan, T. Torun, F.E. 2009. Türkiye’de Pestisit Kullanımı ve Çevreye Olan Etkileri. Atatürk Üniv. Ziraat Fakültesi Dergisi, 40 (2):87-92.
- Atcıoğlu, T., Bayat, A., 2006.. Yerli Yapım Bir Tarla Pülverizatörüne Elektronik Kontrol Sisteminin Uygulanması ve Etkinliğinin Saptanması. Çukurova Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları A.D., Yüksek Lisans Tezi, Adana, 59s.
- Felizardo, K.R. Mercaldi, H.V. Oliveira, V.A. and Cruvinel, P.E. 2013. Modeling and Predictive Control of a Variable-Rate Spraying System. 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 10-13 September 2013, Cardiff UK, pp. 202-207.
- Karadöl, H. Arslan, S. and Aybek, A. 2017. PID control for sprayer sections under laboratory conditions. Agronomy Research, 15(1): 187–195.
- Kushwaha, P.K. Giri, V.K. 2013. PID controllers for water level control of two tank system. VSRD. Int. Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, 3(3): 383–389.
- OECD, 2021. Report on the State of the Knowledge – Literature Review on Unmanned Aerial Spray Systems in Agriculture. OECD Series on Pesticides, No: 105, OECD Publishing, Paris, pp. 73.
- Priyanka, K. Mariyammal, A. 2018. DC Motor Speed Control Using PWM. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 3(2):584-587.
- Rao, V.P.S. and Rao, G.S. 2019. Design and Modelling of an Affordable UAV Based Pesticide Sprayer in Agriculture Applications. Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 21-22 February 2019, Chennai, India, pp. 1-4.
- Solanelles, F. Escolà, A. Planas, S. Rosell, Camp, J.R. Gràcia, F. 2006. An Electronic Control System for Pesticide Application Proportional to the Canopy Width of Tree Crops. Biosystems Engineering, 95 (4):473-481.
- Tahmasebi, M. Rahman, R.A. Mailah, M. Gohari, M. 2012. Sprayer boom active suspension using intelligent active force control. Conference Paper in World Academy of Science, Engineering and Technology 68, 1277–1281.
- Tiryaki, O. Canhilal, R. Horuz, S. 2010. Tarım İlaçları Kullanımı ve Riskleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 256(2): 154-169.
- Tobi, İ. Sağlam, R. 2015. Süne İlaçlamaları İçin İşletme Koşullarında İlaç Kalıntı Miktarı ve Dağılımı. Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 19(2):110-121.

Tudi, M. Daniel Ruan, H. Wang, L. Lyu, J. Sadler, R. Connell, D. Chu, C. Phung, D.T. 2021. Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18, 1112: 1-23.