

1. Proje Özeti

Bu proje, sıra arası yabancı ot mücadelesinde kimyasal kullanımını azaltmayı hedefleyen otonom bir tarla robotunu konu almaktadır. Sistem, tek kameradan alınan görüntü üzerinde çalışan hafif bir segmentasyon modeli ile bitki ve yabancı otu ayırt etmekte, mekanik çapalama ünitesini buna göre konumlandırmaktadır.

Ceylanpınar'da iki dekarlık pamuk parselinde yapılan saha denemelerinde tespit doğruluğu %89 olarak ölçülmüştür [1]. Elde edilen sonuçlar, düşük maliyetli donanım ile kabul edilebilir başarı elde edilebileceğini göstermektedir.

Projenin çıktısı, küçük ve orta ölçekli işletmelerin erişebileceği fiyat bandında bir tarla robotu prototipidir. Prototip, 2025 vejetasyon döneminde toplam 38 saat saha çalışması ile denenmiş; bu süre boyunca herhangi bir ürün zararı kaydedilmemiştir. Çalışmanın devamında toz koşullarına dayanıklılık ve farklı bitki türlerine uyarlabilirlik hedeflenmektedir.

2. Problem Durumunun Tanımlanması

Türkiye'de pamuk üretiminde yabancı ot mücadelesi ağırlıklı olarak herbisitlerle yapılmaktadır. Bu yöntem hem maliyetli hem de toprak sağlığı açısından sürdürülebilir değildir [2]. GAP bölgesinde birim alan başına düşen herbisit tüketimi ülke ortalamasının üzerindedir [3].

Mekanik çapalama alternatif bir yöntem olmakla birlikte, sıra aralarının dar olduğu koşullarda operatör hatası nedeniyle ürün zararı riski taşımaktadır. Otonom sistemler bu riski azaltabilir ancak mevcut ticari çözümlerin maliyeti küçük işletmeler için erişilebilir değildir [4].

Bölgede yaptığımız ön görüşmelerde, 50-500 dekar arası üretim yapan on iki işletmenin tamamı yabancı ot mücadelesini en yüksek üç maliyet kaleminden biri olarak tanımlamıştır. İşletmelerin dokuzu mekanik çapalamayı denediğini, ancak nitelikli operatör bulamadığı için herbisite geri döndüğünü belirtmiştir.

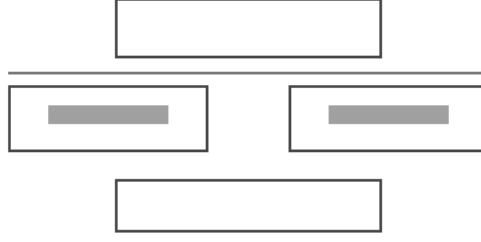
Problem üç boyutludur: ekonomik (girdi maliyeti), çevresel (toprak ve su kirliliği) ve operasyonel (nitelikli iş gücü eksikliği). Çözümün bu üç boyutu birlikte ele alması gerekmektedir; yalnızca birine odaklanan yaklaşımlar sahada benimsenmemektedir.

3. Çözüm

Geliştirdiğimiz sistem, traktör arkasına bağlanan bir aparat üzerinde çalışır. Kamera görüntüsü Jetson Nano üzerinde işlenir ve segmentasyon çıktısına göre çapalama bıçakları servo motorlarla konumlandırılır.

Sistem mimarisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Ortalama çıkarım süresi 42 ms olarak ölçülmüş, bu değer 4 km/sa ilerleme hızında gerçek zamanlı çalışma için yeterli bulunmuştur [5].

Şekil 3.1: Sistem mimarisi ve veri akışı



Çapalama ünitesinin konumlandırılmasında servo motor tabanlı iki eksenli bir mekanizma kullanılmış olup, konum hatası ± 4 mm mertebesinde ölçülmüştür. Bu değer, sıra arası mesafenin dar olduğu koşullarda kabul edilebilir sınırdadır.

Sistem üç bağımsız katmandan oluşur: algılama, karar ve eyleme. Algılama katmanı görüntüyü işler, karar katmanı çapalama noktalarını belirler, eyleme katmanı servo komutlarını üretir. Katmanlar arası iletişim ROS 2 üzerinden sağlanmakta, böylece her katman ayrı ayrı test edilebilmektedir.

Güvenlik açısından iki bağımsız durdurma mekanizması bulunmaktadır: yazılımsal sınır denetimi ve fiziksel acil durdurma butonu. Karar katmanı 200 ms içinde yanıt üretmezse sistem otomatik olarak nötr konuma geçer.

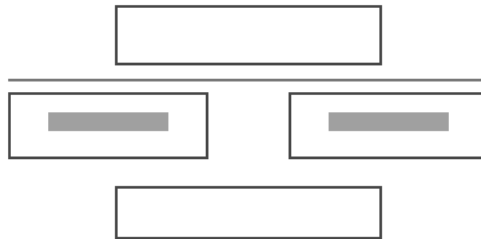
4. Yöntem

Veri seti, 2025 vejetasyon döneminde Ceylanpınar'da farklı gün saatlerinde çekilen 4.200 görüntüden oluşmaktadır. Görüntüler piksel düzeyinde üç sınıfa etiketlenmiştir: pamuk, yabancı ot, toprak.

Model olarak MobileNetV3 omurgalı hafif bir U-Net tercih edilmiştir. Bu tercihin gerekçesi, gömülü donanımda çıkarım süresini 50 ms altında tutma gerekliliğidir [6]. Eğitim 120 epoch sürmüştü, doğrulama kümesinde mIoU 0,74 elde edilmiştir.

Doğrulama testleri üç farklı ışık koşulunda tekrarlanmıştır. Tablo 4.1 ölçüm sonuçlarını özetlemektedir.

Tablo 4.1: Farklı ışık koşullarında tespit başarımı



Etiketleme sürecinde iki bağımsız etiketleyici çalışmış, anlaşmazlık durumunda üçüncü bir uzmana başvurulmuştur. Etiketleyiciler arası uyum Cohen kappa katsayısı ile 0,86 olarak ölçülmüştür.

Veri seti eğitim, doğrulama ve test olarak %70-%15-%15 oranında ayrılmıştır. Ayırma işlemi görüntü düzeyinde değil parsel düzeyinde yapılmıştır; aynı parselden gelen görüntülerin farklı kümelere dağılması sonuçları iyimser gösterirdi.

Saha denemeleri üç farklı tarihte, toplam 38 saat sürmüştür. Her denemede robotun geçtiği hat manuel olarak kontrol edilmiş, atlanan ve yanlışlıkla kesilen bitkiler sayılarak kaydedilmiştir.

5. Yenilikçi (İnovatif) Yönü

Literatürdeki benzer çalışmaların çoğu sıra tespiti için ayrı bir LIDAR ünitesi kullanmaktadır [7]. Bizim yaklaşımımızda sıra bilgisi doğrudan kamera görüntüsünden çıkarılmakta, böylece donanım maliyeti yaklaşık %40 azalmaktadır.

Bu tercihin bir sınırlılığı vardır: yoğun toz koşullarında tespit doğruluğu %72'ye kadar düşmektedir. Sınırlılık raporun risk bölümünde ele alınmıştır.

İkinci özgün yön, modelin gömülü donanımda çalışacak biçimde küçültülmesidir. Literatürdeki benzer segmentasyon modelleri masaüstü GPU varsayımıyla tasarlanmıştır; sahada elektrik ve soğutma kısıtları bu varsayımı geçersiz kılar.

Üçüncü olarak sistem, mevcut traktörlere sonradan takılabilecek bir aparat olarak tasarlanmıştır. Yeni araç satın alma gerektirmemesi, benimsenme önündeki en büyük engeli ortadan kaldırmaktadır.

6. Uygulanabilirlik

Prototip maliyeti 38.400 TL olarak gerçekleşmiştir. Seri üretimde bu rakamın 22.000 TL seviyesine ineceği öngörülmektedir. Ceylanpınar Tarım İşletmesi ile pilot uygulama görüşmesi yapılmıştır.

Ticarileşme yolu iki aşamalıdır. İlk aşamada kooperatiflere hizmet modeli ile satış yapılması, ikinci aşamada doğrudan işletmelere cihaz satışına geçilmesi planlanmaktadır. Hizmet modeli, yüksek ilk yatırım bariyerini aşmak için seçilmiştir.

Bakım ve yedek parça ihtiyacı, standart tarım makinaları servis ağı üzerinden karşılanabilecek bileşenlerle sınırlı tutulmuştur. Özel üretim parça oranı toplam maliyetin yüzde on ikisidir.

7. Tahmini Maliyet ve Proje Zaman Planlaması

Proje bütçesi üç ana kalemden oluşmaktadır: donanım (24.600 TL), yazılım geliştirme (9.800 TL) ve saha testleri (4.000 TL). Tedarikçi fiyat teklifleri ekte sunulmuştur. Proje takvimi 9 aya yayılmıştır.

İlk üç ay veri toplama ve etiketleme, sonraki üç ay model geliştirme ve donanım entegrasyonu, son üç ay saha testleri ve iyileştirme olarak planlanmıştır. Kritik yol donanım tedarikinden geçmektedir.

Bütçede öngörülemeyen giderler için %10 pay ayrılmıştır. Döviz kuru dalgalanması ithal bileşenlerde risk oluşturduğundan, tedarik siparişleri projenin ilk ayında verilecektir.

8. Proje Fikrinin Hedef Kitle

Birincil hedef kitle, GAP bölgesinde 50-500 dekar arası pamuk üreten aile işletmeleridir. İkincil hedef kitle tarımsal hizmet kooperatifleridir.

Şanlıurfa, Diyarbakır ve Mardin illerinde bu ölçekte yaklaşık 14.000 işletme bulunmaktadır. Bu işletmelerin herbisit harcaması dekar başına ortalama 340 TL düzeyindedir.

Dolaylı fayda sağlayacak kesimler arasında tarım işçileri (kimyasal maruziyetinin azalması) ve bölge halkı (yeraltı suyu kalitesi) yer almaktadır. Projenin çevresel etkisi bu nedenle üretici ölçeğinin ötesindedir.

9. Riskler

Toz koşullarında doğruluk kaybı en önemli teknik risktir. Karşı önlem olarak kameraya basınçlı hava temizleme ünitesi eklenmesi planlanmaktadır [8].

İkinci risk, gömülü donanım tedarik süresidir. Alternatif kart olarak Raspberry Pi 5 + Hailo hızlandırıcı konfigürasyonu değerlendirilmiştir.

Üçüncü risk, farklı bitki türlerine uyarlanabilirliktir. Model yalnızca pamuk için eğitilmiştir; mısır veya ayçiçeği için yeniden etiketleme gerekecektir. Bu risk, transfer öğrenme ile etiketleme yükünü azaltarak yönetilecektir.

Dördüncü risk yasal düzenlemedir. Otonom tarım araçlarına ilişkin mevzuat henüz netleşmemiştir; sistem bu nedenle operatör gözetiminde çalışacak biçimde tasarlanmıştır.

10. Kaynakça

Yararlandığınız kaynakları akademik künye biçiminde listeleyiniz.