



Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences

Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi

Mini İnsansız Hava Aracının Tahıl İslah Parsellerinde Fenotipik Seleksiyonda Kullanılabilirliği

Muhammet KARAŞAHİN^{1,*}, Ahmet SAMANCI²

¹Selçuk Üniversitesi, Çumra UYO Org. Tar. İsl. Bölümü, Konya, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş tarihi: 24.09.2018

Kabul tarihi: 08.11.2018

Anahtar Kelimeler:

Tahıl ıslahı

Fenotipleme

Mini insansız hava aracı

ÖZET

İslah çalışmalarının faydalılığını ortaya çıkarmak için verimli ve doğru fenotiplendirme gereklidir. Bitki ıslahı çalışmalarında yaşanan tıkanıklıkların en önemli nedeni fenotiplendirmedir. Buna rağmen fenotipik seleksiyonda kullanılan mevcut metotlar hala yavaş, maliyetli, iş gücüne dayalı ve sıklıkla tahrip edici durumdadır. Bitki genomu ve çevresel (biyotik/abiyotik) etkilerin sonucu bitki fenotipi oluşmaktadır. Fenotiplemede bitki büyümesinin takibi, kanopi yapısı, fizyoloji, hastalık ve zararlılara karşı dayanıklılık ve verim gibi çok çeşitli bitki özelliklerinin ölçümü yapılmaktadır. Bu bağlamda görsel ve manuel ölçümlerden oluşan geleneksel metotlarla hızlı ve hassas fenotipleme yapmak ulaşılabılır bir sonuç değildir. Binlerce parsellerden oluşan ıslah programlarının başarıya ulaşabilmesi yüksek verimli fenotipleme (HTP) kullanımına bağlıdır. İnsansız hava araçlarının (İHA) hızlıca ve defalarca düşük maliyetlerle devreye alınabilmeleri, uçuş yükseklik ve zamanlarının kullanıcıya uygun ayarlanabilmeleri, yüksek çözünürlüklü görüntü alabilmeleri ve küçük ölçekli araştırmalarda kullanılabilmesi gibi avantajları ile mini insansız hava araçları yüksek verimli fenotipik seleksiyon için bir fırsat oluşturmaktadır. Böylece çeşit geliştirme ve ıslah çalışmalarında süper genotip özellikleri belirlemede yaşanan engeller ortadan kaldırılabilir. Aynı zamanda bu çalışmalar bitki ıslahçıları ve agronomistler için yeni metot geliştirmeye yönelik fırsatlar oluşturacaktır. Bu çalışma tahıl ıslah çalışmaları önünde en büyük engellerden biri olan fenotipleme çalışmalarında yaşanan problemlerin ortadan kaldırılmasına ışık tutacaktır.

Availability of Small Unmanned Aerial Vehicle for Phenotyping Selection in Cereal Breeding Nurseries

ARTICLE INFO

Article history:

Received date: 24.09.2018

Accepted date: 08.11.2018

Keywords:

Cereal breeding

Phenotyping

Small unmanned aerial vehicle (sUAV)

ABSTRACT

It is necessary to have productive and true phenotyping to bring out the usefulness of breeding studies. Phenotyping is the main reason of the obstructions experienced during breeding studies. Despite the fact that, current methods that are used for phenotyping selection are still too slow, overcosting, manpower based and generally very destructive. Plant phenotype is formed from plant genome and environmental (biotic/abiotic) interactions. During the phenotyping studies many plant specifications are measured such as, following the plant growing, canopy structure, physiology, productivity, resistancy against diseases and pests. Considering these information, it is not possible to reach fast and precise results by using traditional methods, that includes visual and manual measurements. To succeed of thousands parcel breeding programs are depending on using high throughput phenotyping (HTP). It is an opportunity to use the small unmanned aerial vehicle for high throughput phenotyping selection with many advantages like to put the device into use very fast and low cost for multiple times, to set the altitude and flight time according to the user's needs, to take high resolution images, and to be available for small scale studies. By using small unmanned aerial vehicle it will be possible to eliminate the obstacles for developing varieties and determining the super genotype specifications. At the same time, there will be new opportunities for plant breeders and agronomists to improve the new methods. This study will shed light on the elimination of problems in cereal phenotyping studies, one of the biggest obstacles to breeding trials.





* Sorumlu yazar email: mkarasahin@selcuk.edu.tr

1. Giriş

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar 9.6 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Artan bu dünya nüfusuna paralel olarak gıda tüketimi de artacaktır. Bu talepleri karşılayabilmek için birim alandan elde edilen ürün miktarında artış elde edilmesi kaçınılmaz bir zorunluluktur. Son yüzyılda bitki ıslahı ve agronomik uygulamadaki gelişmelerle ürün verimlerinde artışlar sağlanmıştır ancak yeterli değildir (Pena-Barragan ve ark., 2012; White ve ark., 2012; Shi ve ark., 2016). DNA dizilimleri ve moleküler teknolojilerindeki ilerlemeler bitki genomları hakkındaki bilgilerimizi artırmıştır ancak fenotipik seleksiyonda kullanılan yöntemler yavaş, pahalı, yoğun iş gücüne dayalı ve sıklıkla yıkıcı olmaya devam etmektedir. 2010 yılından beri hızlı ve yüksek verimli fenotipler metotları bitki ıslah çalışmalarını önemli ölçüde iyileştirici yaklaşım olarak tartışılmaktadır (White ve ark., 2012; Araus ve Cairns, 2014; Deery ve ark., 2014). Verim potansiyeli ve abiyotik/biyotik streslere karşı tolerans gibi kritik üretim özellikleri üzerine genetik ve çevresel faktörler ile bunların interaksiyonlarının dolaylı etkilerini belirleyen nihai bir unsur olduğu için fenotiplendirme, genetik yoluyla ürün geliştirmede kritik bir unsurdur (White ve ark., 2012; Araus ve Cairns, 2014). Yüksek verimli fenotipler yöntemleri mevcut uygulamalara göre bu çevresel değişimleri daha iyi yakalar ve böylece seleksiyon verimliliği artar. Genotip ile fenotip arasında bağlantı kurabilmek bölgesel çevre şartlarına adapte olabilecek yüksek verimli çeşitlerin seçiminde başarıya ulaştıracaktır. Böylece bitkisel üretimde artış sağlanarak artan dünya nüfusunun gıda talepleri karşılanabilecektir. Mini insansız hava araçları yüksek verimli fenotipik seleksiyon için bir fırsat oluşturmaktadır. Böylece çeşit geliştirme ve ıslah çalışmalarında süper genotip özellikleri belirlemede yaşanan engeller ortadan kaldırılacaktır (Sankaran ve ark., 2015).

Çizelge 1

Fenotip belirlemede kullanılan bazı mini insansız hava aracı (sUAV) tipleri

Tip	Taşıma Kapasitesi (kg)	Uçuş Süresi (dakika)	Avantajları	Dejavantajları	Örnekler
Paraşütlü	1.5	10-30	Basit kullanım	Rüzgarlı şartlara uygun değil Sınırlı taşıma kapasitesi	
Balonlu	>3.0	~600	Basit kullanım	Rüzgarlı şartlara uygun değil Sınırlı taşıma kapasitesi	
Rotokopterli	0.8-8.0	8-120	Noktasal navigasyonla uygulanabilirlik Havada sabit kalabilme Termalden, multispektral ve hiperspektrale kadar farklı sensörleri taşıyabilme	Taşınan yük ağırlığının batarya ömrünü ve uçuş süresini kısıtlaması	
Sabit Kanatlı	1.0-10.0	30-240	Noktasal navigasyonla uygulanabilirlik Daha yüksek hızla daha uzun uçuş süresi Çoklu sensörlerin takılabilmesi	Havada sabit kalabilme sınırlılığı Görüntü kalitesi için düşük hız gerekliliği	

(Sankaran ve ark., 2015)

Bu çalışma ile mini insansız hava araçlarının tahıl ıslah parsellerinde fenotipik seleksiyonda kullanılabilme potansiyelleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Genetik farklılık gösteren bitkilerin tarla şartlarında hızlı bir şekilde belirlenmesinde ve fenotip farklılığın hangi genden kaynaklandığının tespitinde uzaktan algılama ile elde edilen bilgilerin kullanımı gereklidir. İnsansız hava araçlarının hızlıca ve defalarca düşük maliyetlerle devreye alınabilmeleri, uçuş yükseklik ve zamanlarının kullanıcıya uygun ayarlanabilmeleri, yüksek çözünürlüklü görüntü alabilmeleri ve küçük ölçekli araştırmalarda kullanılabilmesi gibi avantajları ile mini insansız hava araçları yüksek verimli fenotipik seleksiyon için bir fırsat oluşturmaktadır. Uydular frekans ve uzaysal çözünürlükle sınırlıdır. Yersel algılama platformları bir lokasyonda diğerine taşınmakta zorlanma, gerçek zamanlı olarak diğer haritaları üretmenin kolay olmayışı ve aynı anda birçok parselden bitki parametrelerini ölçemeyişi gibi sınırlılıklara sahiptir. Bu zorluklar, istenen zamansal frekans ve uzaysal çözünürlükte veri elde edebilen sUAV'ler kullanılabilir (Araus ve Cairns, 2014).

Verim ile biyotik ve abiyotik tesirlere karşı bitki tepkilerinin uzaktan algılama ile belirlenmesinde uygun sensörlü mini insansız hava araçları (sUAV), entegre edilmiş sistemle tarlaya daha iyi ulaşım, yüksek çözünürlüklü veriler (uçuş yüksekliğine bağlı olarak 1-2 cm), zamanında veri toplama (bulutlu şartlarda bile), bitki gelişim parametrelerinin hızlı değerlendirilmesi, eşzamanlı görüntü elde etme, üretim sezonunda düzenli periyotlarda parselleri izlemek için otomatik uçuşlar ve düşük işletme maliyeti gibi bazı avantajlara sahiptirler (Perry ve ark., 2012; Araus ve Cairns, 2014).

Multikopter, helikopter ve kanatlı tipi UAV'lerin kullanımı son yıllarda hızla artış göstermektedir (Araus ve Cairns, 2014). Genel olarak, sUAV'ler paraşütlü, balonlu, rotokopterli ve sabit kanatlı sistemler olarak dört sınıfa ayrılmaktadır (Çizelge 1).

sUAV türünün seçimi, istenilen uygulama ve sınırlamalara bağlıdır. Paraşütlü sUAV'ler rüzgarsız koşullar altında kolaylıkla uçabilir, ancak rüzgarlı koşullar altında çalıştırılmazlar. Dahası, düşük hızları ve nispeten kısa uçuş süresi olmasına rağmen, sabit noktada duramazlar. Balonlu sUAV'ler ticari reklamcılıkta yaygın olarak kullanıldıkları gibi havadan görüntüleme için de kullanılabilirler. Havada sabit kalabilme özellikleri nedeniyle istenilen alanlardan net görüntüler elde etmek mümkün olsa da, bir lokasyondan diğerine taşınması oldukça yavaştır. Buna ek olarak, daha geniş yüzey alanına sahip oldukları için rüzgârlı koşullar altında uçurmak zordur. En yaygın olarak kullanılan sUAV türleri rotokopterler ve sabit kanatlı olanlardır. Rotokopterler farklı yüksekliklerde uçabilen 4 veya 8 pervaneli kopterlerdir. Bu platformlar birçok avantajlara sahiptirler. Havada belirlenen bir noktada durabilir, GPS tabanlı navigasyonu kullanabilir, yatay ve dikey olarak uçabilir, kalkış ve iniş için çok az yere ihtiyaç duyarlar. Rotokopterlerin en büyük sınırlılıkları sabit kanat türlerine göre daha düşük hız ve uçuş süresine sahip olmalarıdır. Sabit kanatlı sUAV'ler rotokopterlere göre daha uzun uçuş süresi ve daha yüksek uçuş hızlarına sahiptirler. Bununla birlikte, havada sabit kalma kabiliyetleri yoktur. Bu tür araçlarda yüksek hızlarda görüntü bulanıklığı meydana gelebilmekte bunun için algılama hızı yüksek sensörlere ihtiyaç duymaktadırlar. Rotokopterler ve sabit kanatlı UAV'lerin uçuş süresini arttırabilecek pil teknolojilerini geliştirmeye yönelik araştırmalar devam etmektedir. Rotokopterler için kablolu güç kaynağı alternatifi iyi bir fırsat oluşturmaktadır. Uçuş zamanı ile ilgili iyileşmelerin solar enerjili platformlardan elde edilebileceği görülmektedir.

3. Mini İnsansız Hava Araçları (sUAV) İle Fenotip Belirlemede Kullanılan Sensörler

Mini insansız hava araçları (sUAV) kullanarak uzaktan algılama ile fenotip belirlemede uygun sensör seçimi önemlidir. Termal kamera, hiperspektral kamera, multispektral kamera ve LIDAR (ışık algılama ve mesafe belirleme) sistemleri gibi sensörler, ürün büyüme ve gelişimini ölçmek için kullanılmaktadır (Zhang ve Kovacs, 2012). Bununla birlikte, bu sensörleri taşıyacak ve fenotipik seleksiyonda kullanılacak sUAV'lerin seçiminde kullanılmak istenilen zamansal frekans ve yüksek uzaysal çözünürlük göz önünde bulundurulması gereken hususlardır. Yük kaldırma kapasitelerine bağlı olarak UAV platformları ile bir dizi sensör entegre edilebilir. Sensörler, ses veya ışık sinyallerinin yayılım süresi yada görünür ve kızılötesi bölgedeki nesne ile elektromanyetik spektrum arasındaki ışınım veya yansıma gibi interaksyonlar ile ilgili olabilir (Çizelge 2). Ses veya ışık sinyallerinin yayılım süresi ile ilgili sensörler, bitki gelişimi, yüksekliği, kanopi hacmi ve canlılığı gibi fiziksel ve morfolojik bitki özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Bu parametreler, ıslah çalışmalarında bitki performansları ile verim potansiyellerinin belirlenmesinde önemlidir (Wei ve ark., 2010). Işın analizi ve görüntüleme teknikleriyle, hastalık ve kuraklık stresine karşı hassasiyet, klorofil içeriği, besin maddesi konsantrasyonları, büyüme oranları ve verim potansiyelleri gibi bazı bitki fenotipleri belirlenebilmektedir (Zhang ve Kovacs, 2012). Bitki fenotipi, absorbe edilen yada yansıtılan ışık enerjisi miktarının ve dalga boyunun algılanmasında kullanılan sensörlerle belirlenir. Bu sensörler floresan, görünür, yakın kızılötesi, multispektral, hiperspektral ve termal spektroskopik tekniklerle çalışırlar ve bitki özelliklerini uzaktan algılayabilme imkanı verirler. Bununla birlikte, özellikle görünür ile yakın kızılötesi tabanlı algılamanın sınırlılıklarından biri, ortam ışığı koşullarındaki değişikliklerin spektral yansıma değerlerini etkilemesidir. Bu nedenle, aynı gün içinde farklı saatlerde, farklı günlerde veya bulutlu günlerde yapılan ölçümlerde gün ışığı değişimlerini eşitleyebilmek için referans kalibrasyon kullanılarak ortam ışık koşullarını kalibre etmek çok önemlidir. Ortam ışığı koşullarındaki değişiklikler, spektral oranlar (vejetasyon indeksi gibi) veya ışık sensörü kullanılarak kısmen kalibre edilebilmektedir.

Çizelge 2
Fenotip belirlemede kullanılan sensörler

Sensör Tipi	Özellikleri	Uygulamaları	Sınırlılıkları
Floresan sensör	Görünür ve Yakın Kızılötesi bölgede pasif algılama	Fotosentez, klorofil, su stresi	UAV'ler için henüz geliştirilmemiştir Arka plan gürültüsü ile karşılaşılabılır
Dijital kamera	Gri skala veya renkli görüntüler	Görünür özellikler, dış kusurlar, yeşillik ve gelişim tespiti	Görünür spektral bve ve özellikleri ile sınırlıdır
Multispektral/Kızılötesi kamera	Görünür ve kızılötesi bölgede her pixel için birkaç spektral band	Bitki besin elementi eksikliği, su stresi, hastalıklı bitkileri belirleme	Birkaç spektral band ile sınırlıdır
Hiperspektral kamera	Görünür ve kızılötesi bölgede her pixel için sürekli veya kesik spektra	Bitki stresi, kalite ve emniyet kontrolü	Görüntü işleme zorluğu Sensörlerin pahalılığı
Termal sensör/kamera	Termal kızılötesi ışımlara ait her pikselin sıcaklık değeri	Stoma iletkenliği Su stresi ve hastalıklara karşı bitki tepkileri	Çevre şartları performansı etkiler Çok küçük sıcaklık farklılıkları belirlenemez

Çizelge 2 (Devamı)

Fenotip belirlemede kullanılan sensörler

Spektrometre	Alınmış tarla görüntüsü ortalamalarından görünür ve kızılötesi spektrum	Hastalık, stres ve bitki tepkileri	Yüksek çözünürlüklü kameralar oldukça ağırdır Toprak gibi arka plan veri kalitesini etkiler Spektral karışıklık ihtimalleri Yersel sistemlere daha uygunluk Düşük doğruluk
3D kamera	Işık dalgasının gidiş geliş süresi bilgilerine göre kızılötesi lazer tabanlı belirleme	Bitki boyu ve kanopi yoğunluğu gibi fiziksel özellikler	Tarla uygulamaları sınırlı olabilmektedir
LIDAR (Işık Algılama ve Ölçümü)	Lazer (600-1000 nm) dalgasının gidiş geliş sürelerinden fiziksel ölçüm yapma	Doğru bitki boyu ve hacmi hesabı	Yol uzunluğundaki küçük değişikliklere karşı hassastırlar
SONAR (Ses Navigasyonu ve Ölçümü)	Ses dalgasının gidiş geliş süresi ile ses yayılımına dayalı nesne belirleme	Kanopi hacimlerinin haritalandırılması ve sayısallaştırılması Gübre veya ilaç uygulama oranlarının dijital kontrolü	Akustik emilim, arka plan gürültüsü gibi sebeplerden hassasiyet sınırlılığı Lazer tabanlı algılamadan daha düşük örnekleme oranı

(Sankaran ve ark., 2015)

4. Fenotip Belirlemede Vejetasyon İndeksi Kullanımı

Dijital görüntülerden vejetasyon indeks değeri hesap ederek tarım alanlarından bilgi toplama yaygın ve basit bir yoldur. Havasal fotoğraflar ile bitkilerin kantitatif özellikleri hakkında bilgi toplamada hem görünür band hemde yakın kızıl ötesi band kullanımı doğru bir yaklaşımdır. Havasal fotoğraflardan elde edilen vejetasyon indekslerinden bitkilerin biomas, yaprak alanı indeksi ve klorofil konsantrasyonu gibi değerleri hesap etmekte kullanılabilir (Swain ve Uz Zaman, 2012). Bitkilerin biyofiziksel özellikleri radyometrik ölçümlerle belirlenmiş vejetasyon endeksleri ile spektral olarak karakterize edilebilir. Vejetasyon endeksleri

görünür, yakın kızılötesi ve kısa dalga kızılötesi dalga boylarındaki iki veya daha fazla bandın oranlanması yada farklarından hesap edilmektedir. Spektral ölçümler üzerindeki toprak ve atmosferik kaynaklı olumsuz etkileri azaltmak için çeşitli indeksler geliştirilmiştir. Normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Tucker, 1979) klorofil indeksi (Bausch ve Khosla, 2010), oran bitki örtüsü indeksi (Li ve ark., 2008), efektif yaprak alanı indeksi (Wojtowicz ve ark., 2016), yeşil normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (Chang ve ark., 2003), sağlık indeksi (Calderon ve ark., 2013), yeşil kırmızı bitki örtüsü indeksi (Ranjitha ve ark., 2014), normalize edilmiş fark su indeksi (Zarco-Tejada ve ark., 2003), bunlardan bazılarıdır (Çizelge 3).

Çizelge 3

Tahıl ıslahında sUAV'ler ile yapılan fenotip belirlemede kullanılan bazı vejetasyon endeksleri

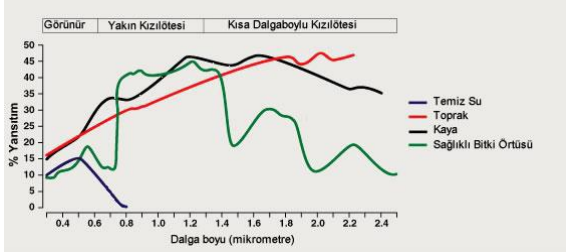
İndeks Adı	Formülü	Spektral Band (nm)	Uygulama	Referanslar
Klorofil İndeksi	$CI=(NIR/GREEN)-1$	GREEN:520-600 NIR:760-900	Bitki azotu tahmini	(Bausch ve Khosla, 2010)
Oran Bitki Örtüsü İndeksi	$RVI=NIR/RED$	RED:630-690 NIR:760-900	Bitki azotu tahmini	(Li ve ark., 2008)
Efektif Yaprak Alanı İndeksi	$ELAI= -0.441+0.285(NIR/RED)$	RED:610-680 NIR:780-890	Verim tahmini	(Wojtowicz ve ark., 2016)
Yeşil Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi	$GNDVI= ((NIR-GREEN)/(NIR+GREEN))$	GREEN:520-590 NIR:760-900	Verim tahmini	(Chang ve ark., 2003)
Sağlık İndeksi	$HI=((GR-RD1)/(GR+RD1)0.5RD2)$	GREEN:534 RED1:698 RED2:704	Hastalık tahmini	(Calderon ve ark., 2013)
Yeşil Kırmızı Bitki Örtüsü İndeksi	$GRVI=(GREEN-RED)/(GREEN+RED)$	GREEN:520-590 RED:620-680	Zararlı tahmini	(Ranjitha ve ark., 2014)
Normalize Edilmiş Fark Su İndeksi	$NDWI=((NIR1-NIR2)/(NIR1+NIR2))$	NIR1:841-876 NIR2:1230-1250	Bitki su içeriği tahmini	(Zarco-Tejada ve ark., 2003)
Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi	$NDVI= (NIR-RED)/(NIR+RED)$	NIR:760-900 RED:630-690	Bitki örtüsü yoğunluğu Yaprak alanı indeksi Biyomas Bitki sağlığı Verim tahmini	(Tucker, 1979)

(Wojtowicz ve ark., 2016)

Normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI) bitki örtüsü izlemede yaygın olarak kullanılmaktadır ve

hesabında yakın kızıl ötesi ve kırmızı band yansıma değerleri kullanılır (Tucker, 1979). Lopes ve Reynolds (2012) farklı tarihlerde normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksi (NDVI) ölçümleri yaparak ürünün yeşil

kalma süresini hesap etmişlerdir. Yeşil kalma süresi ile aynı zamanda yaprak yaşlanma süresi uzunluğunu ölçülmüştür. Bu sürenin uzunluğu verimlilikle doğru orantılıdır (Borrell ve ark., 2014). Aynı zamanda bu veriler sıcaklık stresine karşı dayanıklı çeşitleri seçmede kullanılmıştır (Lopes ve Reynolds, 2012).



Şekil 1
Spektral yansımaya eğrisi (Abdikan, 2017)

Yakın kızıl ötesi (NIR) band, bitkilerin geometrik özellikleri, yaprak alanı indeksi gibi biyofiziksel parametreleri hakkında görünür banda göre daha çok bilgi vermektedir (Jannoura ve ark., 2015). İnsan gözünün algılayabildiği spektrum (400-700 nm)'da yeşil bitki örtüsü %10-20 yansımaya yaparken yakın kızılötesi spektrum (700-950 nm)'da bu oran %40-50'lere çıkabilmektedir (Şekil 1). Bu fark kırmızı dalga boyunda klorofilin kırmızı ışığı absorbe etmesinden dolayı daha da belirgin olmaktadır. Bu nedenle kırmızı (R) ve yakın kızıl ötesi (NIR) band görüntüleri alabilen multispektral kameraların yeşil bitki örtüsünü ayırt etmede kullanımını daha doğru bir yaklaşım olacaktır (Rabatel ve ark., 2014). Bu farklı dalga boylarında ışık yansımalarından elde edilen değerlerin matematiksel hesabı ile yapılmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanlardan bir tanesi NDVI'dir ve $NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$ formülü ile hesap edilmektedir. NDVI değerleri teorik olarak +1 ve -1 arasında değişir. Yeşil bitki örtüsünün fazla olduğu alanlarda indeks değeri +1'e doğru yaklaşırken, bulutlar, su ve kar düşük (eksi) NDVI değerlerine sahiptir. Çıplak toprak ve kaya ise sıfıra yakın NDVI değeri gösterir (Usul, 2010; Yıldız ve ark., 2012). Bu indeks biyomas, klorofil ve azot içeriği, hastalık, zararlı ve yabancı ot yoğunluğu ile kuraklık ve su stresi gibi değerlerin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır (Meffrod, 2014; Rasmussen ve ark., 2016).

5. Tahıl Islah Çalışmalarında Mini İnsansız Hava Araçları (sUAV) ile Fenotip Belirleme

Tahıllarda tane verimi, vejetasyon periyodu içerisinde birbirini izleyen farklı fenolojik dönemler ile bu dönemlerdeki fizyolojik ve morfolojik faktörlerin karşılıklı etkileşimleri sonucu oluşan çok karmaşık bir ögedir. Tane veriminin; bitkinin çıkışından hasat olgunluğuna kadar bütün gelişme dönemlerinde etkili olan faktörlerin değişik oranlardaki katkılarıyla meydana geldiği düşünülürse, yüksek verimli genotiplerin ıslah edilebilmesi için, bu faktörlerin verimi nasıl ve ne

ölçüde etkilediğinin bilinmesi gerekmektedir (Öztürk ve Akkaya, 1996). Tahıllarda verim artışında çeşit katkısı kuru tarımda %20-30, sulu tarımda yaklaşık %50 olduğu varsayılırsa, ıslah çalışmalarında bölgelere uygun çeşitleri geliştirmek çok önem arz etmektedir. Genotip ile fenotip arasında bağlantı kurabilmek bölgesel çevre şartlarına adapte olabilecek yüksek verimli çeşitlerin ıslahında başarıya ulaştıracaktır. Yüksek verimli fenotipleme çalışmalarının yetersizliği hem genetik seleksiyon hem de gen haritalama çalışmalarının önünde engel teşkil etmektedir. Görsel ve manuel ölçümlerden oluşan geleneksel metotlarla hızlı ve hassas fenotiplendirme yapmak ulaşılabilir bir sonuç değildir. Mini insansız hava araçları yüksek verimli fenotipik seleksiyon için bir fırsat oluşturmaktadır (Haghighattalab ve ark., 2016; Rasmussen ve ark., 2016). Yapılan çalışmalarla, iyi geliştirilmiş veri işleme ve veri yönetimi kullanan UAV tabanlı uzaktan algılama uygulamalarının fenotiplendirme potansiyelinin yüksek olduğu ispatlanmıştır (Zaman-Allah ve ark., 2015). Böylece çeşit geliştirme ve ıslah çalışmalarında süper genotip özellikleri belirlemede yaşanan engeller ortadan kaldırılabilir.

6. Biyomas ve Verim Potansiyeli

Bitkiler için yapılan ıslah çalışmalarının ana gayesi, hastalıklara karşı dirençli, tarımsal girdileri en iyi kullanabilen, abiyotik stres şartlarını tolere edebilen yüksek verimli çeşitlerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Yeni çeşitlerin verim potansiyelini belirlemede seçilen genotiplerin çiçeklenme tarihi, başak sayısı, uzunluğu ve hasatta tohum ağırlığı gibi bitki özellikleri ölçülmektedir. Arazi bazlı ölçümlerle çok sayıda parsellerde verim potansiyellerinin belirlenmesinde yaşanan zorluklara karşı yeterli multispektral sensör ekipmanları ile donatılmış havasal platformlar ciddi çözümler getirmektedir. Havasal görüntülemelerden elde edilen bilgiler ışığında hesaplanan vejetasyon indeksleri son zamanlarda yapılan çalışmalarda verim potansiyeli hesabında kullanılmaktadır (Swain ve Uz Zaman, 2012; Chapman ve ark., 2014; Khot ve ark., 2014; Haghighattalab ve ark., 2016; Nebiker ve ark., 2016; Rasmussen ve ark., 2016).

7. Bitki Su ve Sıcaklık Stresi

Bitki ıslah parsellerinin sayısı 100 ile 1000 arasında değişmektedir. Bu geniş alanda zamanla yarışarak geleneksel yöntemlerle ölçüm yapmak zor ve maliyetlidir. Örneğin kızılötesi termometre ile dakikada 2 ile 10 parselde manuel ölçüm yapılabilir. Dolayısıyla atmosferik şartlar değişmeden bütün parselleri ölçümlemek mümkün değildir. Ayrıca manuel ölçüm aletlerindeki termal sensörler tek seferde 2 ile 50 cm² den okuma yapabilirken görüntü işleme yöntemiyle bu alanlar 2 ile 30 m²'ye çıkabilmektedir. 10 ile 40 m yükseklikten hava aracı ile elde edilen görüntülerde bu alan 0.5 ile 3 ha'a kadar çıkabilmektedir. Bu değerler

mini insansız hava araçları ile yapılacak fenotiplleme çalışmalarının ne denli hızlı ve düşük maliyetli olacağını ispatlamaya yeterlidir (Chapman ve ark., 2014). Bitki tarafından kullanılabilir su, bitki ihtiyacından daha düşük olduğu zamansu stresi oluşur. Su stresi, stomaların kapanmasına neden olur bunun sonucu fotosentez ve büyümede azalma meydana gelir aynı zamanda terleme ile soğuma azaldığı için sıcaklık stresi şiddetini artırır. Özellikle kuraklığın sıkça yaşandığı bölgelerde ıslah programlarının temel amacı, su stresine toleranslı ve su kullanım etkinliği yüksek bitkilerin seçimidir. Son zamanlarda araştırmacılar, ıslah programlarında su stresine karşı bitki toleransını belirlemek için yaprak sıcaklıklarından faydalanmaktadır (Jones ve ark., 2009; Chapman ve ark., 2014; Gonzales-Dugo ve ark., 2015; Neiff ve ark., 2015).

8. Bitki Boyu

Bitki boyu ölçümleri; verim, karbonhidrat depolama kapasitesi, çevre şartlarına uyum sağlama ve kültürel uygulamaların doğru yapıldığını belirlemede faydalı bir göstergedir. Bitki boyu çiçekleme döneminde en yüksek seviyesine ulaşmaktadır. Gelişim dönemlerinde bitki boyunu takip etmek çeşit özellikleri ve yetiştirme şartlarını doğrudan yansıtmaktadır (Khanna ve ark., 2015; Holman ve ark., 2016; Watanabe ve ark., 2017).

9. Bitki Besin Elementi

Tahıllarda bitki besin elementi miktarını belirlemede kullanılan en yaygın metotlar arasında yakma, yaprak analizi ve SPAD okumaları yer almaktadır. Bu metotların iş gücü ihtiyaçları ve yüksek maliyetleri geniş alanlarda uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Jia ve ark., 2004). Bu zorluklara sUAV'ler ile uzaktan algılama yoluyla elde edilen bilgilerin çözüm getirmesi beklenmektedir (Li ve ark., 2015). Lelong ve ark.

(2008) onbeş farklı ekmeclik buğday çeşidinde üç farklı ekim sıklığı (170, 250 ve 390 tohum m⁻²) ve beş farklı azot dozu uygulanan ıslah parsellerinden iki farklı kamera (Canon EOS 350D; 8 GigaPixel ve Sony DSC-F828 8 GigaPixel), iki farklı sUAV (motorize paraşüt ve sabit kanatlı) üzerine monte edilerek görüntü almışlardır. Bu görüntülerden elde edilen NDVI ve GNDVI değerlerini manuel LAI ölçümleri ile mukayese etmişler sırasıyla 0.82 ve 0.92 korelasyon bulmuşlardır. Li ve ark. (2015) pirinç tarlasında sUAV ile uygun azot dozlarını belirlemeye yönelik yürüttükleri araştırmada beş farklı doz (0, 75, 150, 225 ve 300 kg ha⁻¹) uygulamışlar ve 50 m yükseklikte uçuşla elde ettikleri görüntülerden azot denge indeksi (NBI) ve koyu yeşil renk indeksi (DGCI) değerleri hesap etmişlerdir. Bu değerleri Multiplex ile yaptıkları manuel klorofil ölçümleriyle mukayese etmişler ve NBI değerleriyle 0.67, DGCI değerleri ile 0.71 korelasyon elde etmişlerdir. Bu sonuçlarla sUAV'ların geniş alanlarda bitki azot içeriklerini belirlemede kullanılabileceği yorumunu yapmışlardır. Zaman-Allah ve ark. (2015) mısır tarlasında sUAV ile azot stresini belirlemeye yönelik yürütmüş oldukları çalışmada elde etmiş oldukları görüntülerden NDVI ve bitki yaşlılık indeksi (CSI) değerlerini hesap etmişler ve bunları manuel ölçümlerle mukayese etmişlerdir. Manuel ölçümler arasında NDVI: 0.83, CSI: 0.85 korelasyon göstermiştir. NDVI değerleri ile tane verimleri arasında 0.72 korelasyon bulunmuştur.

Mini insansız hava araçlarına yerleştirilen sensorler ile yapılan uzaktan algılamanın fenotiplleme çalışmalarında verimli bir şekilde kullanılabileceğini ve azot eksikliği gibi abiyotik stres unsurlarına karşı dayanıklılığı belirlemeye yönelik yapılan genetik çalışmalarda ilerlemelere katkı sağlayacağını belirtmişlerdir. Tahıl ıslahında sUAV'ler ile yapılan fenotip belirleme çalışmalarının bazıları Çizelge 4.'de topluca verilmiştir.

Çizelge 4

Tahıl ıslahında sUAV'ler ile yapılan fenotip belirleme çalışmalarından bazıları

Fenotipik özellik	Standart metot	sUAV tabanlı algılama metodu	Referanslar
Biyomas ve verim	Görsel değerlendirme Söküm örnekleme	Görünür-yakın kızıl ötesi görüntüleme	(Swain ve Uz Zaman, 2012; Khot ve ark., 2014; Haghghattalab ve ark., 2016; Nebiker ve ark., 2016; Rasmussen ve ark., 2016)
Su ve sıcaklık stresi	Görsel değerlendirme Toprak nemi ölçümleri Prometre	Kanopi sıcaklığını ve su absorpsiyonunu ölçmek için görünür-yakın ve termal kızılötesi görüntüleme	(Gonzales-Dugo ve ark., 2015; Neiff ve ark., 2015)
Bitki boyu	Ölçme	LIDAR sistemi. UAV tabanlı sistemler kullanılabilir olmasına rağmen, teknoloji gelişim aşamasındadır. 3 boyutlu görüntüleme	(Khanna ve ark., 2015; Holman ve ark., 2016; Shi ve ark., 2016; Watanabe ve ark., 2017)
Bitki besin elementi	Yaprak/sap analizleri	Yaprak azotuve diğer besin elementleri hesaplamak için görünür-yakın kızıl ötesi görüntüleme	(Lelong ve ark., 2008; Li ve ark., 2015; Neiff ve ark., 2015; Zaman-Allah ve ark., 2015)

10. Diğer Uygulamalar

UAV bazlı algılama teknolojisi bitki boyu, sıra genişliği, bitki sağlığı, bitki örtüsü kaplama oranı gibi diğer bitki özelliklerini belirlemede de kullanılabilir. Ayrıca, herbisit toleransı ve zararı, mineral madde eksiklikleri veya toksisite-leri (demir, bor, alüminyum gibi) ve böcek zararları da bu cihazlar kullanılarak değerlendirilebilir. Dahası, toprak sıkışması, geçmiş üretim uygulamaları kaynaklı olumsuzluklar (örn. tuzlu su ve düşük bitki besin elementine sahip alanlar), yabancı otların varlığı ve toprak değişkenliği, hava, toprak veya vektör kaynaklı mantari ve bakteriyel hastalıklar, nematodlar ve virüslere karşı bitki hassasiyetlerini belirlemede UAV'ler umut vericidirler (Li ve ark., 2015).

11. Sonuç

sUAV'ler ile fenotipleme uygulamalarının başarısı iki ana faktöre bağlıdır. Birinci faktör; stabilite, emniyet, kontrol, güvenilirlik, konumlandırma, otonom çalışma, sensör montajı ve kumanda cihazı gibi sUAV'lerin özellikleri ile ilgilidir. İkinci önemli faktör; spesifik spektral dalga boyları, çözünürlük, ağırlık, kalibrasyon ve görüş alanı gibi sensör özellikleri ile ilgilidir. sUAV'lerin çalışmaları çoğunlukla sensör taşıma kapasitesi (boyut/ağırlık), uçuş yüksekliği (yasal sınırlamalar) ve uçuş süresiyle sınırlıdır (Deery ve ark., 2014). Bununla birlikte, sUAV teknolojileri hızla gelişmektedir. Buna ek olarak, sUAV'lere sürekli güç kaynağı sağlayacak kablolu bağlantı uçuş süresi probleminde çözüm olabilecektir. sUAV tabanlı fenotipik uygulamalarının bir diğer önemli özelliği, veri işleme algoritmaları veya sensörlerden elde edilen bilgileri faydalı fenotipik verilere dönüştürecek araç gereçlerin geliştirilmesidir. Fenotipleme çalışmalarında sUAV teknolojilerinden tam manasıyla yararlanabilmek için görüntü bulanıklığı ve geometrik hata düzeltmeleri, görüntü çakıştırma, coğrafi referanslama ve otomatik öznitelik çıkarma kabiliyetleri geliştirilmelidir.

Özet olarak sUAV'ler, tahılların ıslah ve çeşit geliştirme programlarında üstün genotiplerin seçilmesinde mevcut olumsuzlukları çözüme kavuşturacak yüksek verimli fenotipleme uygulamaları için bir fırsat oluşturmaktadır. sUAV'ler, tarımsal girdilerin kullanımında daha verimli olan ve biyotik, abiyotik streslere karşı önemli direnç gösteren, yüksek verimli tahıl çeşitlerinin seçimini önemli ölçüde hızlandıracaktır.

12. Kaynaklar

Araus JL, Cairns JE (2014). Field High-Throughput Phenotyping: The New Crop Breeding Frontier. *Trends Plant Science*, 19: 52–61.

Bausch WC, Khosla R (2010). Quickbird Satellite Versus Ground-Based Multi-Spectral Data for Estimating Nitrogen Status of Irrigated Maize. *Precision Agriculture*, 11: 274–290.

Borrell AK, Van Oosterom EJ, Mullet JE, George-Jaeggli B, Jordan DR, Klein PE, Hammer GL (2014). Stay-Green Alleles Individually Enhance Grain Yield in Sorghum Under Drought By Modifying Canopy Development and Water Uptake Patterns. *New Phytologist*, 203(3): 817–830.

Calderon R, Navas-Cortes JA, Lucena C, Zarco-Tejada PJ (2013). High-Resolution Airborne Hyperspectral and Thermal Imagery for Early Detection of Verticillium Wilt of Olive Using Fluorescence, Temperature and Narrow-Band Spectral Indices. *Remote Sensing of Environment*, 139: 231–245.

Chang J, Clay DA, Dalsted K, Clay S, O'Neill M (2003). Corn (*Zea mays* L.) Yield Prediction Using Multispectral and Multidate Reflectance. *Agronomy Journal*, 95: 1447–1453.

Chapman SC, Merz T, Chan A, Jackway P, Hrabar S, Dreccer MF (2014). Pheno-Copter: A Low-Altitude, Autonomous Remote-Sensing Robotic Helicopter For High-Throughput Field-Based Phenotyping. *Agronomy*, 4: 279–301.

Deery D, Jimenez-Berni J, Jones H, Sirault X, Furbank R (2014). Proximal Remote Sensing Buggies and Potential Applications for Field-Based Phenotyping. *Agronomy*, 4: 349–379.

Gonzalez-Dugo V, Hernandez P, Solis I, Zarco-Tejada PJ (2015). Using High-Resolution Hyperspectral and Thermal Airborne Imagery to Assess Physiological Condition in The Context of Wheat Phenotyping. *Remote Sensing*, 7: 13586–13605.

Haghighattalab A, Gonzalez Perez L, Mondali S, Singh D, Schinstock D, Rutkoski J, Ortiz-Monasterio I, Singh RP, Goodin D, Poland J (2016). Application of Unmanned Aerial Systems for High Throughput Phenotyping of Large Wheat Breeding Nurseries. *Plant Methods*, 1-15.

Holman FH, Riche AB, Michalski A, Castle M, Wooster MJ, Hawkesford MJ (2016). High Throughput Field Phenotyping of Wheat Plant Height and Growth Rate in Field Plot Trials Using Uav Based Remote Sensing. *Remote Sensing*, 8 (1031): 2-24.

Jannoura R, Brinkmann K, Uteau D, Bruns C, Joergensen RG (2015). Monitoring of Crop Biomass Using True Colour Aerial Photographs Taken From A Remote Controlled Hexacopter. *Biosystem Engineering*, 129: 341-351.

Jia L, Chen X, Zhang F, Buerkert A, Römheld B (2004). Use of Digital Camera To Assess Nitrogen Status of Winter Wheat In The Northern China Plain. *Journal of Plant Nutrition*, 27 (3): 441-450.

Jones HG, Serraj R, Loveys BR, Xiong L, Wheaton A, Price AH (2009). Thermal Infrared Imaging of Crop Canopies For The Remote Diagnosis and Quantification of Plant Responses To Water Stress In The Field. *Functional Plant Biology*, 36: 978–989.

Khanna R, Moller M, Pfeifer J, Liebisch F, Walter A, Siegwart R (2015). Beyond Point Clouds-3d Mapping And Field Parameter Measurements Using Uavs. *IEEE 20th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*.

Khot LR, Zhang Q, Karkee M, Sankaran S, Lewis K (2014). Unmanned Aerial Systems in Agriculture: Part 1 (systems). *WSU Extension*, 1-5.

Lelong CCD, Burger P, Jubelin G, Roux B, Labbe S, Baret F (2008). Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery For Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors*, 8: 3557-3585.

Li F, Gnyup ML, Jia L, Miao Y, Yu Z, Koppe W, Bareth G, Chen X, Zhang F (2008). Estimating N Status of Winter Wheat Using A Handheld Spectrometer in The North China Plain. *Field Crop Research*, 106: 77–85.

- Li J, Zhang F, Qian X, Zhu Y, Shen G (2015). Quantification of Rice Canopy Nitrogen Balance Index With Digital Imagery From Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing Letters*, 6 (3): 183-189.
- Lopes MS, Reynolds MP (2012). Stay-Green in Spring Wheat Can Be Determined By Spectral Reflectance Measurements (normalized difference vegetation index) Independently From Phenology. *Journal of Experimental Botany*, 63(10): 3789–3798.
- Mefford BS (2014). Assessing Corn Water Stress Using Spectral Reflectance. Colorado State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Master of Thesis (unprinted).
- Nebiker S, Lack N, Abacherli M, Laderach S (2016). Light-Weight Multispectral Uav Sensors And Their Capabilities For Predicting Grain Yield And Detecting Plant Diseases, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- Neff N, Dhliwayo T, Suarez EA, Burgueno J, Trachsel S (2015). Using An Airborne Platform To Measure Canopy Temperature And NDVI Under Heat Stress in Maize. *Journal of Crop Improvement*, 29 (6): 669-690.
- Öztürk A, Akkaya A (1996). Kışık Buğdayda Verim, Verim Ögeleri Ve Fenolojik Dönemler Arasındaki İlişkiler. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27 (3): 350-368.
- Pena-Barragan JM (2012). Object-Based Approach For Crop Row Characterization in Uav Images For Site-Specific Weed Management. *Proceedings of the 4th GEOBIA*, May 7-9, 2012, Rio de Janeiro-Brazil.
- Perry EM, Brand J, Kant S, Fitzgerald GJ (2012). Field-Based Rapid Phenotyping With Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Precision Agriculture*, 1-5.
- Rabatel G, Gorretta N, Labbe S (2014). Getting Simultaneous Red And Near-Infrared Band Data From A Single Digital Camera For Plant Monitoring Applications: Theoretical And Practical Study. *Biosystem Engineering*, 117: 2-14.
- Ranjitha G, Srinivasan MR, Rajesh A (2014). Detection And Estimation Of Damage Caused By Thrips Tabaci (Lind) Of Cotton Using Hyperspectral Radiometer. *Agrotechnology*, 3:1–5.
- Rasmussen J, Ntakos G, Nielsen J, Svendsgaard J, Poulsen RN, Christensen S (2016). Are Vegetation Indices Derived From Consumer-Grade Cameras Mounted On Uavs Sufficiently Reliable For Assessing Experimental Plots? *European Journal of Agronomy*, 74: 75-92.
- Sankaran S, Khot LR, Zuniga Espinoza C, Jarolmasjed S, Sat-huvalli VR, Vandemark GJ, Miklas PN, Carter AH, Pumphrey MO, Knowles NR, Pavek MJ (2015). Low-Altitude, High-Resolution Aerial Imaging Systems For Row And Field Crop Phenotyping: A Review. *European Journal of Agronomy*, 70: 112-123.
- Shi Y, Thomasson JA, Murray SC, Pugh NA, Rooney WL, Shafian S (2016). Unmanned Aerial Vehicles For High-Throughput Phenotyping And Agronomic Research. *PLoS ONE*, 11(7): 1-26.
- Swain KC, Uz Zaman Q (2012). Rice Crop Monitoring With Unmanned Helicopter Remote Sensing Images, ed. T. Fatoyinbo (Rijeka: InTech), 254–272.
- Tucker CJ (1979). Red And Photographic Infrared Linear Combinations For Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- Usul M (2010). Arazi Kalite Parametrelerinin Buğday Ürün Rekoltesi Üzerine Etkilerinin Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanılarak Belirlenmesi Altınova Tarım İşletmesi Örneği. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Anabilim Dalı, Doktora Tezi (Basılmamış).
- Watanabe K, Guo W, Arai K, Takanashi H, Kajiya-Kanegae H, Kobayashi M, Yano K, Tokunaga T, Fujiwara T, Tsutsumi N, Iwata H (2017). High-Throughput Phenotyping of Sorghum Plant Height Using An Unmanned Aerial Vehicle And Its Application To Genomic Prediction Modeling. *Frontiers Plant Science*, 8:4-21.
- Wei X, Xu J, Guo H, Jiang L, Chen S, Yu C, Zhou Z, Hu P, Zhai H, Wan J (2010). DTH8 Suppresses Flowering in Rice, Influencing Plant Height And Yield Potential Simultaneously. *Plant Physiology*, 153: 1747–1758.
- White JW, Andrade-Sanchez P, Gore MA, Bronson KF, Coffelt TA, Conley MM, Feldmann KA, French AN, Heun JT, Hunsaker DJ, Jenks MA, Kimball BA, Roth RL, Strand RJ, Thorp KR, Wall GW, Wang G (2012). Field-Based Phenomics For Plant Genetics Research. *Field Crops Research*, 133: 101–112.
- Wojtowicz M, Wojtowicz A, Piekarczyk J (2016). Application of Remote Sensing Methods in Agriculture. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11: 31–50.
- Yıldız H, Mermer A, Ünal E, Akbaş F (2012). Türkiye Bitki Örtüsünün NDVI Verileri İle Zamansal Ve Mekansal Analizi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 21 (2): 50-56.
- Zaman-Allah M, Vergara O, Arous JL, Tarekegne A, Magorokoshi C, Zarco-Tejada PJ, Homero A, Hernandez Alba H, Das B, Craufurd P, Olsen M, Prasanna BM, Cairns J (2015). Unmanned Aerial Platform-Based Multi-Spectral Imaging For Field Phenotyping of Maize. *Plant Methods*, 1-10.
- Zarco-Tejada PLJ, Rueda CA, Ustin SL (2003). Water Content Estimation in Vegetation With MODIS Reflectance Data And Model Inversion Methods. *Remote Sensing of Environment*, 85: 109–124.
- Zhang C, Kovacs JM (2012). The Application Of Small Unmanned Aerial Systems For Precision Agriculture: A Review. *Precision agriculture*, 13(6): 693–712.