



Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi Turkish Journal of Science and Engineering

www.dergipark.org.tr/tjse

Bitki Islahında Kullanılan Yüksek Kapasiteli Fenotipleme Araçları

Okan Yaman^{1*}, Hakan Aktaş²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü – Isparta-Türkiye

*Sorumlu yazar: d2240614003@isparta.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ

Alınış tarihi: 22/05/2026

Kabul tarihi: 26/06/2026

Anahtar Kelimeler: Bitki ıslahı, Fenotip, Tarım, Yüksek kapasiteli fenotipleme

DOI: 10.55979/tjse.1957026

ÖZET

Dünya nüfustaki hızlı artış ve iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki baskısı, bitki ıslahında fenotipleme süreçlerinin etkinliğini stratejik bir öncelik haline getirmiştir. Bu anlatımsal derleme; bitki ıslah programlarında kullanılan yüksek kapasiteli fenotipleme (HTP) araçlarını sensörler, görüntüleme sistemleri, analitik yazılım platformları ve veri yönetimi bileşenleri çerçevesinde kapsamlı biçimde ele almayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda RGB, yakın kızılötesi (NIR), termal ve hiperspektral kameralar başta olmak üzere güncel görüntüleme ve algılama teknolojileri ile PlantCV, HTPPheno, IAP ve LemnaGrid gibi analitik araçlar incelenmiş; büyük ölçekli otomatik fenotipleme sistemlerinin ürettiği yüksek hacimli verinin yönetimi ve işlenmesi için gereken altyapı tartışılmıştır. Derleme bulgularına göre, HTP sistemleri insan duyularıyla tespit edilemeyen morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal özellikleri yüksek doğrulukla ölçebilmekte ve klasik ıslah döngülerini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Bununla birlikte, maliyet-fayda dengesi, veri standartlaşması ve saha koşullarına uyulanabilirlik alanlarında kritik araştırma boşlukları varlığını sürdürmektedir. Fenotipleme ve moleküler teknolojilerin bütünleştirilmesi, iklim değişikliğine uyumlu üstün çeşitlerin geliştirilmesini ivmelendirme potansiyeli taşımakta ve geleceğin sürdürülebilir tarım sistemlerine güçlü bir altyapı sunmaktadır.

The Usage of High-throughput Phenotyping Tools in Plant Breeding

ARTICLE INFO

Received: 22/05/2026

Accepted: 26/06/2026

Keywords: Plant breeding, Phenotype, Agriculture, High-throughput phenotyping

DOI: 10.55979/tjse.1957026

ABSTRACT

The rapid growth of the world population and the pressure of climate change on agricultural production have made the effectiveness of phenotyping processes in plant breeding a strategic priority. This narrative review aims to comprehensively examine high-throughput phenotyping (HTP) tools used in plant breeding programs within the framework of sensors, imaging systems, analytical software platforms, and data management components. In this context, current imaging and sensing technologies, primarily RGB, near-infrared (NIR), thermal, and hyperspectral cameras, as well as analytical tools such as PlantCV, HTPPheno, IAP, and LemnaGrid, are reviewed, and the infrastructure required for the management and processing of high-volume data produced by large-scale automated phenotyping systems is discussed. According to the findings of this review, HTP systems can measure morphological, physiological, and biochemical traits that cannot be detected by human senses with high accuracy, significantly shortening classical breeding cycles. However, critical research gaps persist in the areas of cost-benefit balance, data standardization, and adaptability to field conditions. The integration of phenotyping and molecular technologies has the potential to accelerate the development of superior varieties adapted to climate change, offering a robust infrastructure for the sustainable agricultural systems of the future.

1. Giriş

Dünya nüfusunun 2050 yılına kadar yaklaşık 9.7 milyara ulaşması beklenmekte olup, artan küresel gıda talebinin karşılanabilmesi için mevcut tarımsal üretim seviyelerinin %25-70 oranında artırılması öngörülmektedir (Hunter vd., 2017). Ancak tarımsal üretimin önündeki en büyük engel, artan sera gazı emisyonlarının tetiklediği iklim değişikliği ve buna bağlı gelişen ekstrem iklim olaylarıdır. Küresel ısınmanın yarattığı abiyotik stres faktörleri coğrafi bölgelere göre değişiklik gösterdiğinden, farklı tarımsal ekosistemler için bölgeye özgü adaptasyon stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle düşük gelirli ülkelerdeki kısıtlı kaynak erişimi ve yetersiz altyapı, bu bölgelerdeki

tarımsal sistemleri iklim krizine karşı oldukça kırılgan bir konuma sürüklemektedir (Altieri & Nicholls, 2017).

Çevresel tahribatı en aza indirerek sürdürülebilir gıda güvenliğini sağlamak; modern bitki ıslahı yöntemlerinin yenilikçi tarım teknolojileriyle desteklenmesi bu süreçte önemli katkı sağlayabilir. Bu bağlamda, değişen çevre koşullarına adaptasyon yeteneği yüksek ve verim potansiyeli maksimize edilmiş yeni çeşitlerin geliştirilmesi, güncel ıslah programlarının temel stratejisini oluşturmaktadır. Klasik ıslah uygulamalarının ötesinde, bitki sağlığı ve gelişiminin otonom sistemlerle izlenmesi gibi teknolojik entegrasyonlar, yeni çeşit geliştirme döngülerini ciddi oranda ivmelendirmektedir. Bu hızlı, güvenilir ve otonom fenotipik değerlendirme süreçlerinin

başarıya ulaşması ise, yüksek kapasiteli fenotipleme (HTP) araçlarının bitki ıslahı programlarına eksiksiz ve etkin bir şekilde entegre edilmesine bağlıdır (Chawade vd., 2018).

Bitki fenomiği; bitki büyümesi, yapısı ve performansının incelenmesinde botanik, bitki fizyolojisi ve veri bilimi gibi alanları bir araya getiren multidisipliner bir yaklaşımdır. HTP sistemleri, tarımsal açıdan kritik değere sahip genetik materyallerin hızlıca taranmasını ve sınıflandırılmasını sağlar. Bu teknolojiler, nitelikli gen havuzlarının oluşturulması ve elit hatların seçilmesi yoluyla yeni çeşit geliştirme (ıslah) süreçlerini doğrudan ivmelendirir. Söz konusu tarama ve seleksiyon işlemleri, hedeflenen ölçüğe göre yüksek kapasiteli, otonom veya farklı çözünürlük seviyelerindeki sensör araçlarıyla gerçekleştirilebilmektedir (Mahlein, 2016). Gelişmiş fenotipleme teknikleri, bitki sağlığının otonom (insandan bağımsız) olarak izlenmesine olanak tanıyarak ıslah programlarındaki seleksiyon isabetini ve genetik kazanç hızını artırır. Bu otonomasyon, uzun ıslah süreçlerinde yaşanabilecek nicel ve nitel veri kayıplarını da en aza indirmektedir. Ancak, bu yenilikçi teknolojilerin sadece laboratuvarında kalmayıp ıslahçılar ve üreticiler tarafından sahada geniş çapta benimsenebilmesi için, geliştirilen sistemlerin maliyet-etkin bir yapıda olması temel bir gerekliliktir (Reynolds vd., 2019).

Tarımda sürdürülebilirlik kavramı ile ürünlerin maksimum verim potansiyeline ulaşmasını gübre, pestisit ve sulama gibi girdileri minimize ederek hassas tarım tekniklerini uygulamayı mümkün kılar (Pretty, 1997). Geleneksel tarımda, yüksek verim elde etmek için belirli aralıklarla gübre ve pestisit uygulanır. Bu strateji beklenen verimlere ulaşmayı sağlasa da çevre üzerinde önemli değişikliklere neden olur. Aşırı gübre kullanımı, yüksek doz kimyasal kullanımının toprakta sızmasına ve nihayetinde su kaynaklarını kirleterek sucul yaşamı olumsuz etkilediği görülmüştür. Pestisitlerin aşırı kullanımı da pestisitlere dirençli patojenlerin evrimleşmesine neden olmaktadır. Tarımsal sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda gübre kullanımının azaltılması ve sentetik pestisitlerin daha dikkatli yönetimi giderek önem kazanmaktadır. Bu bağlamda Avrupa Birliği, 2009/128/EC sayılı Direktif aracılığıyla pestisitlerin sürdürülebilir kullanımını ve insan ile çevre üzerindeki risklerinin en aza indirilmesini yasal bir çerçeveye oturtmuştur. Söz konusu düzenlemeler, tarımda yeni ve çevre dostu yöntemlere olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir (Elmgren & Larsson, 2001). Bu bağlamda, bitki fenotiplemesinin entegre bir zararlı yönetimi yaklaşımına dahil edilmesi ve bu entegrasyonun üreticilerin, tüketicilerin ve toplumun taleplerini karşılamaya yardımcı olabileceği öngörülmektedir. Bu nedenle, yüksek verim elde etmek ve çevresel etkinin bitkiler üzerindeki olumsuz sonuçlarını azaltmak için etkin kültürel faaliyetlerin gerçekleştirilmesi için çeşitli HTP araçlar geliştirilip, kullanılmalıdır (Chawade vd., 2018). Sürdürülebilir verim artışı sağlamak için gübre, kimyasal uygulama kontrolü, bitki yoğunluğu, hastalık tanılama ve etkin sulama faaliyetlerinin optimizasyonu gereklidir. Özellikle, sezon boyunca değişkenlik gösteren azot seviyelerini optimize ederek gübre kullanımını azaltma yöntemi en popüler optimizasyon örneğidir. Patates

üretiminde, bu tür bir optimizasyon gübre kullanımını %25'e kadar azaltılabilir. Bu durum hem çiftçilere hem de çevreye önemli oranda fayda sağlar. Bu tür optimizasyonlar, tarladaki ekim ve gübreleme ekipmanına entegre edilmiş gelişmiş sensörlerin kullanımıyla mümkündür (Kempenaar vd., 2017).

Gelecekteki gıda ve yakıt ihtiyaçlarını karşılamak için tarım ürünlerinin yüksek verim ve abiyotik streslere karşı dayanıklılık göstermesi gerekmektedir. Dünya genelinde geleneksel ıslah programları ile elde edilen yıllık verim artışları, pirinç (*Oryza sativa*), mısır (*Zea mays*) ve buğday (*Triticum aestivum*) gibi önemli üç tahıl ürünü için beklenen talebi karşılamak için artık yeterli gelmemektedir (Tester & Langridge, 2010). Artan dünya nüfusu göz önüne alındığında, 2050 yılına kadar küresel gıda üretiminin en az %70 oranında artırılması gerekmektedir (FAO, 2009).

Aynı zamanda, iklim değişikliğinin küresel sıcaklık ve yağış desenleri üzerindeki etkileri, abiyotik stres koşullarının etkisi ile verimlerin azalmasına neden olmaktadır (Tester & Langridge, 2010). İklim değişikliğiyle yükselen atmosferik karbondioksit seviyeleri, fotosentez hızını teşvik ederek teorik olarak ürün verimliliğini artırabilir. Ancak, yüksek koşullarına verilen verim tepkisi bitki genotipleri arasında büyük bir varyasyon göstermektedir; hatta yeni geliştirilen ticari çeşitler bu değişen çevre koşullarına karşı oldukça kırılgan ve hassas reaksiyonlar verebilmektedir. Bu durum, iklim değişikliğine adaptasyon yeteneği yüksek genetik kaynakların keşfi ve geliştirilmesine olan ihtiyacı artırmaktadır. Söz konusu küresel zorlukların aşılması ve tarımsal sürdürülebilirliğin güvenceye alınması; fonksiyonel genomik yaklaşımların ve yenilikçi bitki ıslahı stratejilerinin etkin bir şekilde entegrasyonunu zorunlu kılmaktadır (Leakey vd., 2009).

Genomik verilerin tarımsal üretime aktarılabilmesi, genotip ile tarladaki fenotip arasındaki bağın doğru kurulmasına bağlıdır. Ancak gen bankalarındaki geniş koleksiyonların fenotipik kayıtları halen oldukça sınırlıdır. Literatürde sıkça rastlanan 'belirgin bir fenotipik etki saptanamadı' ifadesi, aslında genlerin etkisizliğinden ziyade, karmaşık mekanizmaları analiz edecek fenotipleme kapasitemizin yetersizliğini göstermektedir. Dolayısıyla, tarımsal açıdan kritik özelliklerden sorumlu genlerin keşfi için; geniş popülasyonların yeni nesil (yüksek genomik/fenotipik kapasiteli) araçlarla endüstriyel ölçekte taranması, seçilen özel hatların ise yüksek çözünürlüklü yöntemlerle derinlemesine analiz edilmesi zorunludur (Lu vd., 2008).

Yüksek kapasiteli fenotipleme yöntemlerinin etkin kullanımı, ıslah programlarında genetik kazancı doğrudan belirleyen kritik bir unsurdur. Arazi koşullarında yürütülen fenotipleme çalışmaları; yalnızca hedef karakterlerin seçimi, sensör/platform tedariki veya temel veri analiz yöntemleriyle sınırlı kalmamalı, daha makro bir çerçevede ele alınmalıdır. Başarılı bir fenotipleme mimarisi; operasyonel verimliliğin ötesinde, deneme alanındaki mekansal değişkenliklerin (toprak heterojenliği vb.) istatistiksel olarak yönetilmesini, hedef çevre koşullarının doğru tanımlanmasını ve bitki büyüme modellerini

kapsayan bütünsel bir veri yönetim sisteminin kurulmasını zorunlu kılar (Araus vd., 2018).

2. Fenotip ve Fenotipleme Kavramı

Fenotip; genotip (G), çevre (Ç) ve kültürel işlemler (K) arasındaki karmaşık etkileşimlerin bir yansıması olarak, bir organizmanın morfolojik, fizyolojik ve agronomik özelliklerinin bütünü ifade etmektedir (Fenotip= Genotip + Çevre + Genotip x Çevre interaksyonu). Fenomik, belirli bir genom veya genom seti tarafından oluşturulan fenotipik alanın daha kapsamlı bir karakterizasyonuna doğru ilerlemek için çeşitli organizasyon seviyelerinde uygun fenotipik verilerin toplanmasını içerir. Bu nedenle, bitki fenotipleme, moleküler düzeyden tüm bitkiye ve kontrol edilen koşullardan tarla koşullarına kadar farklı çözünürlük ve boyutlarda çalışabilir. Her seviye belirli özelliklere odaklanmasına rağmen, nihai hedef alttan yukarıya doğru bilgi entegrasyonu yaparak daha yüksek performanslı çeşitler üretmektir. Bu bağlamda, bitki fenotipleme yöntemlerinin ıslah programlarının bir parçası olarak kullanılması, ıslahçılar için çeşitli zorlu çevresel senaryolara karşı daha uyumlu çeşit üretmelerine yardımcı olacak güçlü bir araştırma aracı haline gelmiştir (Kim, 2020).

Fenotipleme, bitkinin genotiplerinin çevre ile etkileşiminden gelişen fizyolojik ve metabolik tepkilerin ölçümüdür. Bu tepkiler, verim, abiyotik stres toleransı ve agronomik özellikleri belirleyen anahtar gen/alellerin ve ilişkili moleküler işaretçilerin tanımlanmasına katkıda bulunur. Bitki ıslahı ve biyoteknoloji, sürdürülebilir tarım için yeni çeşitlerin geliştirilmesini teşvik eder. Seçim sürecini geliştirmek için güçlü bir fenotipleme kritiktir çünkü bu süreç yıllar süren üretim sürecinin her aşamasında hat seçimini belirlemek için temel bir araçtır. Geleneksel bitki fenotipleme yöntemleri, yetiştiricilerin deneme tarlalarında dolaşp görünümüne, tatlarına veya dokularına göre parselleri puanlamalarını içerir. Fenotipleme yöntemlerine iyileştirmeler gereklidir; doğruluk, hız ve maliyet dengesini ele alarak süreç iyileştirilmelidir (Kim, 2020). Fenomik disiplinin amacı ayrıca, genomik, bitki fonksiyonu ve tarımsal özellikler arasındaki boşluğu kapatmaktır. Özellikle genomik dizilimin hızla arttığı model sistemler bağlamında, gen sekansını, bitki yapısı, gelişimi, bileşimi ve performansı ile bağdaştıran arama yapılabilir bir fenotipik veri tabanına acil bir ihtiyaç vardır (Ilic vd., 2007). Bir model türde anlamlı bir fenotipik karakter veri tabanı oluşturmak için ilk gereksinim, verilerin nesnel bir şekilde tanımlanmış olmasıdır, tercihen matematiksel, kolayca dijitalleştirilebilen ve aranabilir bir formatta ölçülmelidir. İkinci olarak, deneyin nasıl gerçekleştirildiği, kullanılan bitki materyali ve kullanılan büyüme koşulları, standartlaştırılmış bir formatta kaydedilmelidir. Üçüncü olarak, fenotipleme tekniklerinin standartlaştırılması veya en azından yeterli raporlanması, veri setlerinin karşılaştırılmasına izin vermek için arzu edilir. Bu tanımlamaların ve deneysel işlemlerin literatürde ve mevcut veri tabanlarında standartlaştırılmamış olması hem transkripsiyonel hem de metabolomik verilerin

kullanışlılığını ciddi şekilde sınırlamıştır (Hannemann vd., 2009).

Bitki fenomiği, sadece belirli bir koşulda (örneğin, kontrol edilmiş bir ortamda) bir genotipi bir fenotiple ilişkilendirmekten ibaret değildir; aksine, bitki fenomunu çeşitli çevresel koşullara maruz kaldığında karakterize etmektedir. Çoğu hayvanın, çevrelerine bağlı olarak temelde aynı yapıyı korumasının aksine, bir bitki çevresel koşullara bağlı olarak çok farklı yapılar oluşturabilir. Örneğin, aynı *Arabidopsis thaliana* çeşidi, kısa veya uzun gün koşullarına maruz kaldığında yaprak morfolojisi ve rozet yapısı bakımından belirgin biçimde farklılaşarak büyük ya da küçük bireyler oluşturabilmektedir (Mishra vd., 2012). Benzer şekilde, su eksikliği, azot yoksunluğu ve düşük ışık, bitki organlarının sayısı ve boyutu üzerinde büyük etkilere sahiptir. Bu nedenle, bitki fenomiği araştırması, organizma yapısındaki değişkenliğin incelenmesine büyük çaba harcar, oysa hayvan fenomiği genellikle temelde metabolizmaya odaklanır. Bitki su durumu, sıcaklık ve büyüme hızı dakikalar içinde değişebilir. Gerçekten de memeliler ve kuşlar gibi bitkiler de, hızla değişen çevresel koşullar altında sıcaklık ve su için dengede değildir. Bitkiler, her gün kendi ağırlıklarının %50 ila %200'ü oranında suyu terleme (transpirasyon) yoluyla kaybederler (Vadez vd., 2014). Ayrıca, bitki sıcaklıkları enerji dengesiyle uyumlu olarak hızlı değişimler sergilemektedir. Bir yaz gününde, bitki sabahın erken saatlerinde yeterli su koşullarında 11°C'de seyredebilirken, altı saat gibi kısa bir süre içinde 36°C'ye ulaşarak ciddi su stresine maruz kalabilmekte ve bu durum bitki morfolojisinde köklü değişimlere yol açmaktadır. Bu koşullar altında gerçekleştirilen ölçümlerde, yer değiştirme sensörleri aracılığıyla bitki büyüme hızında anlık ve belirgin dalgalanmaların meydana geldiği saptanmıştır. Nitekim yaprak uzaması, günün erken saatlerinde saatte 4 mm'lik bir hıza ulaşabilirken, öğle sonrasında bu değerin 0 mm'e gerilediği bildirilmektedir (Caldeira vd., 2014). Bu bağlamda, hücresel düzeyde belirli bir homeostazın varlığından söz edilebilecek olsa da bu durumun organizma düzeyinde geçerliliğini yitirdiği görülmektedir. Farklı çevresel koşullar arasındaki geçiş süreçlerinde çok sayıda moleküler olayın eş zamanlı olarak gerçekleştiği bilinmektedir. Dolayısıyla, kararsız durum koşullarının fenomik açıdan incelenmesi büyük önem taşımaktadır (Baerenfaller vd., 2012). Bitkilerdeki düşük derecede homeostaz, bitkinin maruz kaldığı koşulların mekânsal değişkenliğinin büyük fonksiyonel sonuçlarına yol açar. Örneğin, kök sistemi yapısı gereği, yüksek derecede heterojen toprak su içeriğine yerelde adapte olmayı yansıtan büyük bir mekânsal varyasyon sergiler. Bu nedenle, fenotipik veri setlerinin analizi, bitkiler ve organlar tarafından algılanan çevresel koşullarla birlikte, büyüme ve fizyoloji ile ilgili süreçlere ilişkin tutarlı zaman serisi bilgilerini içermelidir (Bao vd., 2014). Bitkilerde merkezi bir orkestratör organ olmadığından, çoğu fonksiyonun kontrolü, örneğin hormonal veya hidrolik iletiler aracılığıyla bilgi alışverişi yapan farklı organları içeren geribildirim döngülerine dayanır (Visentin vd., 2017).

Bu tür bilgi alışverişleri, hücre veya organ düzeyinde kısa vadeli ölçeklerde çalışır ve matematiksel modeller kullanılarak uzun vadeli bitki veya gölgelik davranışlarına dönüşür ki bu da son derece doğrusal olmayan bütün bitki mekanizmalarını içerir. Bu nedenle, bitki fenomiği, tek hücreden bitkinin tüm yapılarına kadar uzanan süreçlerde metabolizma ve bitki dengesine yönelik sağlıklı veri için aylara kadar uzanan zamansal ölçeklerde analizler gerektirir. Bu nedenle, modelleme sistemleri bu ölçekleri birbirine bağlama amacıyla bitki fenomiğinin ayrılmaz bir parçasıdır. Gerçekten de genellikle sezgisel olmayan geri bildirim mekanizmaları, matematiksel modeller kullanılarak öngörülebilir. HTP alanı oldukça hızla gelişmektedir. Bu ilerlemelerin, ıslah programlarında pratik uygulama bulmasını ve genetik kazanca katkıda bulunmasını sağlamak için bir ihtiyaç bulunmaktadır. İyileştirmelerin belirli teknolojilere (fenotipleme dahil) bölünmesi zor olsa da teknolojileri genetik kazanç kavramı içine yerleştirmek, başarıyı izlemeye yardımcı olacaktır. HTP, genetik kazanca hem doğrudan hem de dolaylı olarak katkıda bulunabilir (Tardieu & Parent, 2017).

2.1. Fenotiplemenin doğruluğunu ve hızını artırma

Materyallerin genetik değerlerinin doğru ve uygun maliyetli bir şekilde elde edilmesi, ıslah programları için temel bir öneme sahiptir. Materyal fenolojisi, abiyotik stres şiddeti, hastalık şiddeti ve ilerleyişi, bitki boyu, başaklanma veya çiçeklenme tarihi, yatma ve verim bileşenleri gibi birçok rutin özellikler ıslah programlarında genellikle manuel olarak ölçülmektedir (Masuka vd., 2017). Manuel ölçümler subjektiftir, insan hatalarına eğilimlidir ve sağlamlık veya tekrarlanabilirlikten yoksundur. Sonuç olarak, ıslah ekipleri, bazı özellikler için özellik kalıtımını artırmak ve daha fazla replikasyon sağlayarak veri toplayabilirler. Bu ölçümlerdeki hata ve subjektiviteyi az maliyetle kaldırmak, ıslah programları için doğrudan tasarruf sağlayacaktır. Dahası, çıplak gözle değerlendirilen görsel değerlendirmeler, bitkilerin fizyolojik durumunu yeterince yakalayamayabilir. Toplanmaya değer bitki özelliklerin manuel ölçümlerinin doğruluğu genellikle belgelenmemiş olmasına rağmen, genellikle düşük kalıtım yeteneği veya konumlar arasında doğru ölçme konusundaki sorunlar nedeniyle rapor edilemez (Montesinos-Lopez vd., 2017). Özellikle farklı alanlarda ve farklı ölçme yeteneği olan HTP araçlarının geliştirilmesi, düşük maliyetle seçim doğruluğunu artıracaktır. Son zamanlarda, ıslahçılar tarafından tercih edilen özellikler için (yani, ıslah programlarında yaygın olarak kullanılan özellikler) HTP araçlarının geliştirilmesinde birçok ilerleme kaydedilmiştir. Bitki boyu sensörleri, LiDAR, ultrasonik sensörler ve RGB görüntüleri dahil bir dizi sensör kullanılarak geliştirilmiştir (Tanger vd., 2017). Mısır bitkisi üzerine yapılan bir çalışmada, dijital görüntü analizi kullanılarak koçanın özellikleri nitelendirilmiştir. Hem bir çizgi tarayıcı hem de konveyör bant ve düz bant tarayıcı kullanarak verim bileşenlerini ölçmek için yeni görüntü analizi protokolleri oluşturulmuştur (Liang vd., 2016). Gölge sıcaklık sensörlerinin LiDAR ile birleştirilmesi, işlevsel ve kozmetik kalıcı yeşili birbirinden ayırmaya olanak tanımıştır (Rebetzke vd., 2016). Fenotipleme maliyetleri ve

zaman kısıtlamaları nedeniyle, dinamik özellikler genellikle belirli bir özelliği ölçmek için en kritik anların en iyi bilgiye dayanarak sadece birkaç kez ölçümü yapılır. Saatte binlerce ölçüm alabilme yeteneği, yüksek yoğunluklu genotipleme ile birleştiğinde, genetik sinyali maksimize etme yeteneği sağlamış ve genom tahminine dayalı stratejilerin etkinliğini artırmıştır. Temel özelliklerin manuel ölçümleri zaman alıcıdır ve HTP araçlarının uygulanması iş gücü gereksinimini önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, pirinçte (*Oryza sativa* L.) bitki boyunun manuel ölçüm hızı saatte 45 arazi ile sınırlıyken, ultrasonik bir kafes yükseklik sensörü ile donatılmış bir fenomobil kullanılarak saatte 3000 araziye çıkarılmıştır (Tanger vd., 2017). Benzer şekilde pamukta uzaktan algılama ile bitki boyunu tahmin etmek, manuel ölçümler için harcanan sürenin küçük bir kesirini gerektirmiştir. Rutin fenotipik özelliklerin ölçümünde HTP teknolojilerinin kullanılması, operasyonel maliyetleri önemli ölçüde düşürmektedir. Bu durum, tasarruf edilen kaynakların ıslah döngü süresini kısaltmaya yönelik daha yenilikçi stratejilere (örneğin; hızlı ıslah veya genomik seleksiyon) aktarılmasına olanak tanır. Ayrıca, otonom tarama sistemleri çok daha geniş bitki popülasyonlarının değerlendirilebilmesini sağlayarak seleksiyon yoğunluğunu doğrudan artırır. Ancak; uzun vadede iş gücü ve zamandan sağlanan bu büyük tasarrufa rağmen, yüksek teknolojiye sahip donanımların tedariği ve nitelikli veri analizi yapabilecek personelin eğitim maliyetleri başlangıç aşamasında ciddi bir yatırım gerektirmektedir (Sun vd., 2017).

HTP araçlarının, özellikle farklı coğrafyalara yayılan geniş deneme ağlarında benimsenmesi yüksek başlangıç yatırımları gerektirmektedir. Bu durum, söz konusu teknolojilerin; lojistik erişimin kısıtlı ve iş gücü maliyetlerinin düşük olduğu orta/alt gelir grubu ülkelerde de uygulanabilir ve maliyet-etkin olacak şekilde optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Saha ağlarının farklı coğrafyalara genişletilmesi; artan arazi gereksinimleri, altyapısı bulunmayan yeni test lokasyonlarının kurulum zorlukları ve geniş mesafelerin getirdiği mekansal değişkenliğin yönetimini oldukça karmaşık hale getirir. Kontrol altına alınamayan mekansal değişkenlik, deneysel hata varyansını artırarak genetik varyansın toplam fenotipik varyans içindeki payını (kalıtım derecesini) düşürür. Yüksek kalıntı hata varyansı, güvenilir fenotipik veriler elde etmek için tekrarlı deneme sayılarının artırılmasını zorunlu kılar, genomik seleksiyon modellerinin tahmin doğruluğunu da ciddi oranda zayıflatır. Özellikle genom düzenlemesi yapılmış çeşitlerdeki küçük ancak anlamlı verim farklılıklarını tespit edebilmek, veride yüksek bir sinyal-gürültü oranına ihtiyaç duyar. Tüm bu istatistiksel zorluklara ek olarak, yıllar ve farklı lokasyonlar üzerinden toplanan fenotipik verilerin bütünlüğünü tehdit eden en büyük faktör, sürekli değişim gösteren çevresel koşullardır (Masuka vd., 2017).

Bir arazide, birçok faktör; parselden parseli etkileyen ve diğer özelliklerle birlikte birbirini etkileyen mikroçevreleri oluşturmak üzere bir araya gelir. Genotip etkilerini tahmin ederken, bu faktörleri düzeltmek önemlidir. Fenotiplemedeki ilerlemelere kıyasla, ölçümlerin kalıtım

seviyelerini artırmaya yönelik deney öncesi ve sonrası kontrolde daha az ilerleme kaydedilmiştir. Deney öncesi mekansal değişkenliği ölçme yöntemleri, bir alandaki eğilimleri tanımlamaya dayanır ve daha sonra uygun deneysel tasarımlar kullanılarak dikkate alınabilir (Shi vd., 2017). Sıklıkla korele olan özellikler, analiz sırasında kovaryant olarak kullanılabilir ve bunlardan bazıları yeni fenotipleme araçlarının uzaktan algılama teknikleri aracılığıyla verimli bir şekilde ölçülebilir. Modelin verilere iyi uyduğu bir modelin deney sonrası kontrolü, alternatif bir yaklaşım haline gelebilir (Federer & Crossa, 2012).

Küresel ve yerel eğilimlerin modele uyumlu bir şekilde monte edildiği mekansal analiz, geleneksel ıslah için mekansal değişkenliği azaltmada ve genomik seçim için tahmin doğruluklarını artırmada önemli bir rol oynamıştır. HTP, bu veri kaynaklarını kontrol etmek için eğitim modellerinde çevresel değişken setlerini karakterize etme potansiyeline sahiptir ve bu verileri sonrasındaki veri işleme sürecinde kullanılabilir (Lado vd., 2013).

3. Tarımsal Model Sistemleri

HTP ile ilişkilendirilen veri fazlalığı, bu bilginin tam anlamıyla kullanılmasını engelleyebileceği giderek daha fazla algılanmaktadır. Ancak basit özet istatistiklerin yeterli olmayacağı da bir gerçektir. Fenotip verileri, nicel ve güçlü bir şekilde hızlı bir şekilde edinilmeli, işlenmeli ve analiz edilmelidir; bu da kantitatif genetik, istatistik ve gen-fenotip bilgisi entegrasyonunu gerektirir ve bu tür bir ampirik (yani istatistiksel temelli) uygulamanın başarılı bir örneğidir. Dikkat çekici bir şekilde, teknolojik hazırlıkta son sıçrama, geliştirilmiş sensörler veya platformlardan ziyade, ticari olarak temin edilebilen ve uygun maliyetli dijital kameralar kullanılarak yapılan veri odaklı yaklaşımlar ve işleme ile veri miktarındaki ilerlemelerden gelmiştir (Ubbens ve Stavness vd., 2017).

Tarım modelleri, bitki büyümesi ve gelişimi ile ilgili süreçleri matematiksel denklemlere çevirir. Bu, sınırlı sayıda saha gözleminde elde edilen mevcut bilgilerin kullanılmasına ve geniş koşullar altında yayılmasına izin verir, içsel (örneğin, özellik veya alel) ve dışsal (örneğin, iklim veya tarım yönetimi) faktörlerin bitki performansını nasıl etkileyeceğini tahmin etmeye olanak sağlar. Tarımsal bağlamda, tarım modelleri, iklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesinde ve duyarlılık noktalarının belirlenmesinde, aynı zamanda tarımsal ekolojiler ve yeni iklim koşulları altında performansın tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Genomikteki ilerlemeler, modelleme uygulamalarını ıslah hatlarında gen başlangıç parametrelerini açığa çıkararak artırabilir (Jones vd., 2017). Genetik girdilerle modeller, belirli çevreler için gereken alel kombinasyonunu göstererek genotipler, lokasyonlar ve yıllar arasında çeşitli özellikleri simüle etmek için kullanılabilir. HTP platformları ve araçları, modelleri genetik bilgileri parametreleştirmek için yeni bir yol sunar (Parent ve Tardieu, 2014). Dahası, biyotik streslerin modellenmesi genellikle hastalık ve bitki modellerinin hassas bağlantısıyla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, modeller tarafından yapılan tahminler, erken modellerin varsayımları ve bütünlüğünün ötesine geçebilir (Wang vd., 2017).

4. Yüksek Kapasiteli Fenotipleme Araçları

HTP sistemlerinin geliştirilmesi, daha büyük popülasyonların değerlendirilmesine olanak tanıyarak seçim yoğunluğunu artırır ve seçim doğruluğunu iyileştirir (Araus vd., 2018). Bitki ıslahı programları için yeni nesil bir fenotipleme sistemi tasarlarlarken, geliştiriciler ihtiyaçlarına uygun sistemin bileşenlerini dikkate almalıdırlar. Bir sistem dört bileşenden oluşur: sensör, platform, analiz ve veri, yani SPAV olarak adlandırılan bu bileşenler birbiriyle ilişkilidir ve sorunsuz entegrasyon için teknik olarak bağlıdır.

4.1. Sensörler

Sensör, hangi bitki özelliklerinin ilgi çekici olduğunu ve hangi fenotipik metriklerin sunulabileceği sorularını yanıtlarken düşünülmesi gereken ilk bileşendir. Tipik fenotipik metrikler ise bitki canlılığı, biyokütle, gölgelik sıcaklık, bitki boyu, sayısı vb. içerir. Fenotipleme için kullanılabilecek birkaç tür sensör bulunmaktadır: multispektral, hiper-spektral, termal ve hafif algılama ve mesafe (LiDAR). Spektral ve morfolojik özellikler genellikle çok spektralli kameralar tarafından ölçülür; bu kameralar, bitki indekslerini, yaprak alan indeksini, bitki sayısını, verimi ve büyüme hızını tahmin edebilen çok spektralli kameralardır. Bitki boyu, LiDAR (Bai vd., 2019), ultrasonik sensörler (Barker vd., 2016) veya stereo kameralar tarafından ölçülebilir. Gölge sıcaklığı, kızılötesi termometre (Andrade-Sanchez vd., 2014) veya termal görüntüleme cihazı ile ölçülebilir. Diğer metrikler, bir gaz analizatörü ve klorofil sensörleri tarafından ölçülebilir. Sensör ve metriklerin çeşitliliği arasında, yaygın düşünce maliyet etkin ve sağlam sensörler bulmaktır. Bitki tepe pigment değişimi, bitkinin abiyotik streslere verdiği yanıtın en doğrudan göstergesidir ve genellikle iki şekilde spektral sensörlerle ölçülür: nokta ve görüntü sensörleridir. Aktif spektral sensörler, Crop Circle veya GreenSeeker gibi nokta sensörleridir ve tarandıktan sonra hedef yüzeyden yansıyan ışığı alarak ortalama bir nokta verisi sunar. Aktif spektral nokta sensörleri, HTP için kullanılmıştır ancak sensörün tam kapsama alanındaki doğrusal görüş alanına ve güneşin zirve açılarındaki spektral sapmaya dikkat edilmesi gerekmektedir. Multispektral kameralar, spektral bir görüntü yakalar ve görüntü analizi aracılığıyla hem spektral hem de morfolojik özellikleri sunabilir. Dikkat edilmesi gereken bir şey, kare hızıdır: üç model 1 fps ve biri 30 fps'dir. Kamera, saniyede birden fazla görüntü yakalaması gereken bir zemin platformu üzerine tasarlandıysa, kamera 1 fps'den daha fazla seçilmelidir. Bu 1 fps kameralar, yavaş sürücülü (<4 km/saat) yer tabanlı platformlar veya çoğunlukla insansız hava aracı platformları için kullanılabilir, bu durumda görüntü saniyede veya daha uzun süre alınır. Kamera arabirimi, edinim yazılımıyla birlikte dikkate alınması gereken başka bir faktördür. Bazı modeller, dahili bir edinim yazılımına sahiptir ve diğerleri bir uygulama program arayüzü veya kamera kontrolü için darbe genişlik modülasyonu arayüzü ile gelir. Görüntü edinimi için yer/drone imajı geliştirilirken, imajların arasında alanın kaçırılmaması ve minimum örtüşümle otomatik olarak toplama yöntemi gereklidir ve otomatik

olarak önceden belirlenmiş alan sınırları içinde yalnızca görüntüleri tetiklemek için geliştirilmelidir (Kim, 2020).

4.2. Platform

Çeşitli sensörlerle donatılmış HTP sistemleri, üç farklı platforma monte edilebilir: zemin, hava ve uydu platformlarıdır. Her platformun kendi avantajları ve dezavantajları vardır ve geliştiricilerin her platformdan neler beklediği ve hangi sınırlamaların olduğunu bilmeleri gerekir. Her platformda olumlu yönler bulunsada genel olarak HTP'ye olan araştırma eğilimi, güneş radyasyonu etkilerini en aza indiren kısaltılmış bir edinim penceresi nedeniyle yer platformundan insansız hava aracı platformuna kaymaktadır. Gelecekteki fenotipler platform tasarımı, edinimde tarla kapsamı ve veri analitiğinde dönüş süresi olmak üzere iki en önemli faktöre uygun olmalıdır. Merkezi olmayan bir platform, tak-çalıştır sensörler ve ham veriyi parsel düzeyi metriklere ve görselleştirmeye işlemek için sağlam bir analitik araç setinin geliştirilmesi, gereken tarla kapsamı (örneğin, 50 ha/saat) ve dönüş süresi (<1 saat) için ideal olacaktır (Kim, 2020).

4.2.1. Zemin platformu

Zemin platformu, bitki fenotipler için iki farklı çevresel koşulları altında en yaygın olarak kapalı ortamlar ve açık alanlarda kullanılır. En yaygın olarak kullanılan fenotipler platformu, bir arabayla veya bir traktör tarafından işletilen açık hava zemin platformudur. Manuel itişli arabalar (Crain vd., 2016), motorlu arabalara (Thompson vd., 2018) yükseltilmiştir. Araba, farklı bitki yüksekliklerine ve sıra aralıklarına uyum sağlamak için ayarlanabilir yükseklik ve genişlikte çerçevelere ihtiyaç duyar. Sensörlerin tasarımı, aksesuarların ve bataryanın boyutu ve ağırlığını göz önünde bulundurarak çerçeve malzemelerini optimize etmelidir; bu gereklilik, dönüşlerde ve yokuşlarda lastiklere aşırı yüklenmeyi önlemek içindir. Traktör tabanlı yer platformları da yaygın olarak incelenmiştir (Andrade-Sanchez vd., 2014). Bu zemin platformları, yakın ve spektral sensörler kullanarak bitki morfolojik ve spektral özelliklerinin ayrıntılarını ölçebilir. Zemin platformlarındaki başlıca endişe, yavaş edinimdir (örneğin, <3 km/saat (1.9 mph)), bu, çevresel aydınlatma değişikliklerinden ciddi şekilde etkilenebilir ve dar alan kapsamına neden olabilir; ayrıca yüzlerce görüntünün işlenmesi, parsel düzeyde coğrafi referanslama ve gürültü filtreleme karmaşıklığına neden olabilir. İki tür kapalı mekan platformu bulunmaktadır; bunlar, sabit veya hareketli bitkilere bağlı olarak değişir. Eğer bitkiler bir taşıma bandındaki bir tarama odasına besleniyorsa, tüm sensörler farklı açılarda sensör paketinde monte edilir. Mobil bitki tabanlı platform, VIS, NIR, floresans, stereo kameralar, termometre ve LiDAR gibi çeşitli sensörler kullanarak kontrol edilen bir ortamda detaylı gözlem avantajı sağlar. Fahlgren vd. (2015), Bellwether Phenotyping Platform'nu kullanarak günlük olarak 1140 bitkiye otomatik sulama ve görüntü yakalama ile su stresine tepkileri incelemek için kullanmıştır. Bu yöntemin dezavantajı, inceleme odasına tüm bitkilerin beslenmesi için uzun bir işlem süresine ve ayrıca sensörlerdeki yazılım ve taşıyıcı makinedeki donanımın sık sık karşılaşılan bakım sorunlarına neden olmasıdır. Sabit bitki tabanlı

platform, ticari olarak kullanılabilir cihazları kullanarak hedef bitkiye hareket etmek için bir vinç modunda mobil sensörlere ihtiyaç duyar (Bai vd., 2019). Alternatif olarak, sensörler, mobil bitki tabanlı platformdaki hareketli makine veya sensörün tek başına durmasına neden olan tek bir sorun tarafından değil, bireysel bir sensörün yerine hemen hemen tüm alana yerleştirilmiş bir sensör ızgarası kullanarak sabit konumda da kullanılabilir. Bu, zaman gecikmesi ile ilgili işletimsel sorunları hafifletir ve mobil bitki tabanlı platformdaki hareketli makine veya sensörün tek bir sorun nedeniyle değil, bireysel bir sensörün yerine hemen hemen tüm alana yerleştirilmiş bir sensör ızgarası kullanarak bir sensörün yerinde sorun giderilmesine olanak tanır. Kontrollü bir ortamda, VIS, NIR, floresans, stereo kameralar, termometre ve LiDAR gibi çeşitli sensörleri kullanarak detaylı gözlem avantajı sağlanabilir. Bu durum, ticari olarak mevcut cihazlar olan Scanalyzer veya SpiderCam tarafından sağlanabilir (Kim, 2020).

4.2.2. Hava platformu

Havadan fenotipler, iki platforma sahiptir: bir mürettebatlı hava aracı ve insansız hava aracıdır. Mürettebatlı hava aracı, kentsel ve orman endüstrisinde iyi bir şekilde kurulmuş ve tarımsal uygulamalarda giderek daha fazla benimsenmiştir (Yang ve Hoffmann, 2015). Mevcut mürettebatlı hava aracı platformu, yüksek çözünürlüklü multispektral görüntüleme sunar. Hava görüntüsü kalitesi olağanüstüdür ve yer örnekleme mesafesi en düşük 305 m irtifada Ultracam Eagle kullanılarak 2 cm'ye kadar küçülebilir, 260 × 400 m izler. Mürettebatlı hava aracının kullanımı, LiDAR, termal ve hyperspectral sensörler gibi ek sensörlerle genişletilmiştir. Sensörler genellikle küçük uçaklara monte edilir, yaygın olarak Piper Saratoga, Air Tractor 402B (Yang ve Hoffmann, 2015) ve Cessna 182, 210 veya 320 (Huang vd., 2010) üzerine monte edilir. Mürettebatlı hava aracı platformu genellikle hava haritalamacıları tarafından işletilir ve hava görüntüleme için hareket mesafesi, yer örnekleme mesafesi, ek sensörler, yer kontrol noktası eklemeleri ve son işleme dayalı olarak uçuş başına 2000 ile 8000 dolar arasında değişen hizmet ücretleri sunar. Maliyet yüksektir, ancak kalite, kötü bağlantı ve bulanık piksel sorunlarının olmaması nedeniyle güvenilirdir. Havadan platformda yakalanan nihai görüntü, alan boyutuna ve yer örnekleme mesafesine bağlı olarak bir nokta görüntüsü veya bir ortomozayik görüntü olabilir. Havadan HTP platformu için yer örnekleme mesafesi, 5 ila 10 cm önerilir ve bu, 30 inç sıra ekim için 14 ila 7 piksel iz genişliği ve bitki düzeyinde doğruluk sağlamak için bitki başına 38 piksel iz genişliği ile sonuçlanır. Görüntü teslim edildikten sonra, görüntü, parsel düzeyinde metrikler çıkarmak için daha fazla işlenmelidir (Kim, 2020).

4.2.3. Uzak platformu

Uzak platformu, birkaç hükümet kuruluşu tarafından hava koşulları, tarım alanları ve verim tahminleri için kullanılmıştır. Özel şirketler, tarım üretimine destek sağlamak ve yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden modeller geliştirmek için uydu uzaktan algılama teknolojisine yatırım yapmaktadır. En yaygın uydu görüntüleme, ABDGS tarafından işletilen Landsat'tan 11 spektral bant ve Avrupa Havacılık Ajansı tarafından

işletilen Sentinel'den 12 bantla sağlanmıştır, ancak görüntü çözünürlükleri 30 m ve 10 m ile sırasıyla Landsat 8 ve Sentinel 2'den güncelleme alınam 6 ve 5 gündür. Yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleme, 120'den fazla mikro uydu tarafından 3×3 m/piksel 4 bant olarak ticari olarak sunulmaktadır. PlanetScope, güneşe senkronize yörüngede yüzlerce uydu ile dünya genelinde her gün 3 m çözünürlükte görüntüler sağlar ve genellikle tarımda büyük ölçekli veya tarla düzeyinde ürün sağlığı izleme amacıyla kullanılmıştır. Ancak, en son 14 SkySats uydularının çözünürlüğü 1×1 m 4 bant görüntüye kadar iyileşmiş olsada mevcut uydu görüntüleri fenotipik özellik tanımlamak için yeterli görüntü çözünürlüğüne ve sıklığına sahip değildir. Uydu ve algılama teknolojisi geliştikçe, bu sınırlayıcı faktörler ele alındığında uydu, gelecekteki HTP platformu olarak mümkün olabilir (Planet, 2019).

4.3. Analiz

HTP, genetik modellemeyi geliştirmek ve bitki genotiplerini hızlı bir şekilde tanımlamak için büyük bir potansiyele sahiptir, bu da bitki verimliliğini artırabilir. Bu amaç doğrultusunda birkaç analitik araç seti yayımlanmıştır: PlantCV (Fahlgren vd., 2015), LemnaGrid (Golzarian vd., 2011), HTPPheno (Hartmann vd., 2011) ve entegre analiz platformudur (Klukas vd., 2014). Örneğin, HTPPheno, ImageJ için bir eklenti olarak uygulanmış olup arpa bitkisinin üst ve yan görünümünün görüntü analizini otomatikleştirir, yükseklik, genişlik ve sürgün alanını çıkarmak için kullanılmıştır ancak sadece LemnaTec sistemi tarafından bir yetiştirme odasındaki tek bir bitkinin görüntülerine uygulanmıştır. Standartlaştırılmamış bir analitik aracın eksikliği, farklı platformlardan ve sensörlerden gelen verilerin işlenmesini geciktirir ve HTP işleme hattında önemli bir engeldir. Farklı sensörlerin ve

platformların varlığına rağmen, görüntü analizi ve özellik çıkarma, görüntü tabanlı fenotipleme platformları için ortak zorluklardır ve bu nedenle geliştirmesi için bir mekanizmaya sahip açık kaynaklı özellik çıkarma yazılımları, bitki geliştirmede fenotipleme darboğazını hafifletmeye yardımcı olacaktır (Fahlgren vd., 2015). Bu araçların temel özellikleri, giriş veri türleri, kullanım lisansı, test edilen bitki türleri ve çalıştıkları platformlar bakımından karşılaştırmalı bir özeti Tablo 1'de sunulmuştur. HTP görüntü analitikleri için başlıca yönleri, görüntü oluşturma, radyometrik kalibrasyon, veri birleştirme ve görüntü analizi içerir.

4.3.1. Görüntü oluşturma

Arazi koşullarında yürütülen görüntü tabanlı fenotipleme çalışmalarında karşılaşılan temel kısıtlardan biri aydınlatma varyasyonlarıdır. Elde edilen ham görüntülerin parlaklık ve radyometrik kalitesi; bulutlanma veya güneş açısı gibi anlık çevresel ışık dalgalanmalarından doğrudan etkilenmektedir. Bu değişimlerin standartize edilebilmesi ise, kullanılan görüntüleme sisteminin diyafram açıklığı, pozlama süresi, sensör kazancı ve ISO hassasiyeti gibi donanımsal kalibrasyon parametrelerine bağlıdır. Bir görüntü, mercek aracılığıyla ışık enerjisi alındığında, kamera, kendi sensörünün duyarlı olduğu dalga boylarındaki yansıyan ışığı yakalar. Çoğu multispektral kamera, 400 ila 1200 nm arasındaki görünür bölgeden yakın kızılötesi bölgesine kadar olan spektrumda duyarlı olan silikon tabanlı sensörler kullanılarak spektral bantlardaki nesnelerin yansımaları band geçişli filtreler veya prizmalar aracılığıyla yakalar. Pikseller, görüntünün bit derinliğine dayanarak minimumdan maksimuma kadar bir değere sahiptir.

Tablo 1. Analiz araçları
Table 1. Analysis tools

Araç	Temel İşlev	Giriş Verisi	Lisans	Test Edilen Bitki Türleri	Donanım Platformu
PlantCV (Fahlgren vd., 2015)	Modüler görüntü analiz iş akışları; segmentasyon, yükseklik, biyokütle, renk ve mimari ölçümü	VIS, PSII floresans, NIR	Açık kaynak (Python/OpenCV)	<i>Setaria viridis/italica</i> , <i>Arabidopsis</i> , <i>Brachypodium</i> , <i>Camelina</i> , tatlı patates	Donanım bağımsız; Bellwether/LemnaTec 3D-HT ile doğrulanmış
LemnaGrid (Golzarian vd., 2011)	Görüntülerden biyokütle tahmini; alan ve yaşa dayalı modelleme	RGB	Ticari (LemnaTec)	Buğday, arpa	LemnaTec 3D Scanalyzer
HTPheno (Hartmann vd., 2011)	Yükseklik, genişlik, çıkıntı alanı ve çap ölçümü	RGB	Açık kaynak (ImageJ eklentisi, Java)	Arpa	LemnaTec uyumlu; manuel sistemlerle kullanılabilir
IAP (Klukas vd., 2014)	Blok tabanlı otomatik analiz; yaprak sayısı, hacim, büyüme hızı, renk ölçümü	VIS, NIR, termal, floresans	Açık kaynak (GNU GPL)	Mısır, arpa, <i>Arabidopsis</i> , buğday	LemnaTec uyumlu; farklı kaynaklardan görüntü aktarımı desteklenir

Örneğin, 8-bit görüntüler 0 ile 255 arasında değerlere sahiptir ve bir bilgisayar ekranında görüntülenirken, 16-bit görüntüler 0 ile 65.535 arasında piksel değerlerine sahiptir ve doğru bir şekilde görüntülemek için GIS yazılımına ihtiyaç duyar. Pikseller min (çok karanlık) veya max (çok parlak) değerlere ulaştığında görüntü doygunluğu meydana gelir ve kamera ayarları ayarlanarak önlenmelidir. Görüntü elde etmeden önce başka bir hazırlık adımı, her banttaki piksel ölçeğini karanlık akımdan beyaz referansa doğru bir şekilde atamak için beyaz dengesi yapmaktır. Eğer görüntü mavimsi veya sarımsı görünüyorsa, kamera normal renk ve parlaklık elde etmek için beyaz dengesi yapılmalıdır, bu da her bantta spektral sinyalin tam aralığı içinde pikselleri düzenler ve görüntü bantları arasında doğru piksel oranlarını sağlar. Bitki fenotipleme için, görüntü elde etme sırasında tüm kanallar için sabit kamera ayarları önerilir, bu da otomatik pozlama tarafından neden olunan her banttaki bağımsız piksel değişikliklerinden kaçınmak için hedef bitkide gerçek pikseller elde etmeye yardımcı olur (Kim vd., 2016).

4.3.2. Radyometrik kalibrasyon

Radyometrik kalibrasyon, nesnelerin gerçek yansımaları elde etmek amacıyla bilinen bir yansıma referansındaki pikselleri okuyarak ve tüm piksellere hesaplanmış bir kalibrasyon faktörü uygulayarak gerçekleştirilir. Bu, bir görüntüyü kalibre edilmiş bir görüntüye dönüştüren bir işlemdir. Bu işlem, aynı aydınlatma koşulları altında yakalanan tüm diğer görüntülere kalibrasyon faktörünü uygulayarak veya her bir görüntü kendi referans hedefini içeriyorsa bireysel bir kalibrasyon faktörü hesaplayarak tekrarlanır. Kalibre edilmiş görüntüdeki her piksel, her spektral bantta siyahtan (%0 yansıma) beyaza (%100 yansıma) kadar yansımanın bir yüzdesini temsil eder. Görüntüler kalibre edildikten sonra, görüntülerin parsel düzey ölçümleri çıkarmak için işlenmesinde iki seçenek vardır: karo tabanlı ve dikim tabanlı. Karo tabanlı işlem, metrikleri doğrudan karo görüntülerinden, coğrafi referanslı parsel sınırlara dayanarak çıkarmaktır. Dikim tabanlı işlem için ise, kalibre edilmiş karo görüntüleri, ev

içi veya ticari yazılımlar kullanılarak bir ortomozaik ana görüntüye dikilir ve ardından metrik hesaplamalar için ana görüntüye parsel sınırlar uygulanır. Dikim tabanlı yöntemde, radyometrik kalibrasyon, dikim sırasında eşleşmeyen özelliklerle ilgili olası sorunlar nedeniyle dikimden önce önerilir. Ancak, veri birleştirme yazılımı, kalibre edilmiş görüntüler arasındaki bağlantı noktalarını bulmada zorlanıyorsa, kullanıcı ham görüntüleri birleştirmeyi ve ardından kalibrasyonu ana görüntüye uygulamayı seçebilir (Kim & French, 2015).

4.3.3. Veri birleştirme

Veri birleştirme, alanda çekilen birçok karo görüntüsünü içeren bir ana mozaik görüntü oluşturmaktır. Sonuçlar, yazılımın gelişmişliğine bağlı olarak değişir. Her karo görüntüsüne eklenen GPS noktaları, karo görüntülerini bir ana haritada konumlandırmak ve ardışık görüntüler arasındaki örtüşen alan, birinci planın arka plana oranı gibi bir seçim koşulu tarafından düzeltilir veya kırılır. Dikimin ince ayarları, görüntülerin özelliklerini kullanır ve doğruluğu, görüntülerin içeriğine bağlı olarak değişir ve tarım alanındaki bitki örtüsü gibi karmaşık durumlarla azalır, burada görüntüler birbirine çok benzer görünür. Karo görüntüleri, bulut tabanlı hizmetler ve yerel bir bilgisayarda çalışan bağımsız programlar tarafından birleştirilebilir. DroneDeploy ve MapsMadeEasy gibi bulut tabanlı paketler, karo görüntülerini web sitelerine yüklenmiş ve veri birleştirmesi tamamlanmış bir bulut sunucusu üzerinde sağlayarak, ortomozaik görüntüler, dijital arazi modelleri, 3D model ve NDVI verileri sunar. Pix4Dmapper ve PhotoScan gibi diğer yazılım paketleri, görüntü veri setlerini hizalamayı destekler ve kullanıcıya birleştirilmiş katmanları çeşitli bant matematiği için işleme imkânı tanır. Bu programlar, her pikseli inceleyerek yapay görme kullanarak görüntüleri eşleştirebilir ve bazı görüntüleri coğrafi referans olmadan dikerek, ancak coğrafi referanslı görüntülerin daha hızlı ve daha iyi birleştirilmesine olanak tanır (MAPIR, 2019).

Juan & Gwun (2009), SIFT, PCA-SIFT ve SURF yöntemlerini hız, ölçek değişimi, döndürme, bulanıklık, aydınlatma değişimi ve afin dönüşüm koşullarında

karşılaştırmıştır. SIFT; ölçek, döndürme ve bulanıklık koşullarında en kararlı performansı sergilerken, işlem hızı bakımından en yavaş yöntem olduğu belirlenmiştir. SURF, genel olarak en hızlı yöntem olup çoğu koşulda SIFT ile benzer başarı göstermiş; ancak büyük açılı döndürme durumlarında performansının düştüğü gözlemlenmiştir. PCA-SIFT ise aydınlatma değişimi ve afin dönüşümlerde avantaj sağlamış, buna karşın ölçek değişimi ve bulanıklık koşullarındaki performansının yetersiz kaldığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar, hiçbir yöntemin tüm koşullar için evrensel üstünlük taşımadığını ve yöntem seçiminin uygulamanın öncelikli gereksinimine göre yapılması gerektiğini vurgulamıştır. UAV görüntü birleşimi, SIFT (Chen vd., 2019), SURF (Xiong vd., 2013) ve özel geliştirilmiş algoritma (Liu vd., 2012) kullanılarak incelenmiştir. Birçok başarılı çalışma yapılmış olmasına rağmen, işleme süresi, geometrik doğruluk ve parsel düzeyi HTP verileri için radyometrik tutarlılık gibi daha fazla iyileştirmeler için ince ayarlar gereklidir.

4.3.4. Görüntü işleme

Görüntülerin anlamlı fenotipik ölçümlere otomatik olarak dönüştürülmesi için görüntü işleme, özellik çıkarma ve veri analizinde kilit bir rol oynar. Büyük miktardaki görüntüleri işlemek için yeterli işleme gücü ve gelişmiş algoritmalar, geçtiğimiz birkaç yıldır görüntü tabanlı fenotipleme çalışmalarını en umut verici araçlar haline getirdi. Farklı görüntü işleme akışları, yaprak alanını ölçerek (Leister vd., 1999), NDVI ve termal imza ile bitki canlılığını ölçerek floresans ile klorofil ölçerek büyüme hızı için, görüntü sınıflandırmasıyla sürgün fenotipleri için geliştirilmiştir (De Vyllder vd., 2012). Ayrıca, veri analizi için nesne tespiti, bölütleme ve sınıflandırma ve yaprak sayma (Ubbens & Stavness, 2017), bitki hastalık tespiti ve teşhisi (Mohanty vd., 2016) ve meyve ile çiçek sınıflandırması (Pawara vd., 2017) gibi alanlarda makine öğrenimi uygulanmıştır. Birçok görüntü işleme programında, parametreler belirli bir durum için manuel olarak ayarlanır, ancak bunlar aydınlatma yoğunluğu, iki yönlü etki ve atmosferik etki gibi görüntüleme koşullarındaki değişikliklerde geçersiz olabilir. Teknoloji transferi ve üretimdeki temel başarı, görüntü türleri ve platformlardan bağımsız olarak standart bir yöntemin, radyometrik ve geometrik kalibrasyonların, bölütleme ve parsel düzeyi metrik çıkarma işlemlerini otomatik hale getirmektir.

4.4. Veri

HTP ile veri yönetimi, çeşitli bölgelerde farklı hava koşulları altında birden çok alandan elde edilen mekansal ve zamansal fenotipler için büyük veriler oluşturulduğunda giderek daha önemli hale gelmektedir. HTP çalışmaları, çeşitli formatlarda devasa miktarda ham veri üretir ve yüksek çözünürlük, gereksiz veya geçersiz veri ile veri bolluğunu içerir, bu nedenle fenotipleme verileri büyük veri yönetiminde önemli bir rol oynar. TERRA-REF sistemi, dünyanın en büyük robotik tarla tarayıcıları arasında yer almakta olup günde 10 TB'a kadar fenotipik veri üretme kapasitesine sahip olduğu Kim (2020) ve 3 yıl içinde toplam veri hacminin 10 PB'ye ulaşacağı tahmin edilmektedir (Kooper vd., 2017). Birçok kurum benzer şekilde büyük miktarda fenotipik veri toplar ve veri

birlikte bir zorlukla karşılaşır, bu nedenle işlenebilen veri yüzdesi azalmaktadır. Meta veriler, heterojen fenotip verilerini entegre etmek için esastır, ancak jeospatial veriler için meta veri oluşturmak, yüksek boyutluluk ve karmaşıklık gibi verinin içsel özellikleri nedeniyle zordur (Yang vd., 2017). Büyük veri görselleştirmesi, desenleri ortaya çıkarır ve bilinmeyen korelasyonları keşfeder, bu da karar verme sürecini iyileştirmek için etkileşimli resimli ve grafik temsil sağlamalıdır. Araziden toplanan fenotipik veriler, bulut veri tabanına yerel depolama aracılığıyla aktarılır, analitik bir araç kutusunu kullanarak bulutta veri işleme ve analizi için erişilir ve görselleştirme için kataloglanır. Farklı platformlardan sorunsuz veri işleme ve entegrasyonu sağlamak için veri formatı ve tarla düzeni için standartlaştırma gereklidir. Standart prosedür ve formatlar, türler, zamanlar ve konumlar arasında veri entegrasyonu aracılığıyla dönüştürücü araştırmayı ve hızlandırılmış keşfi mümkün kılacaktır. Veri işlendikten sonra, son kullanıcılara saha görüntülerine erişim sağlamak ve sonuçları anlamalarını kolaylaştırmak için görselleştirme uygulanır. Analizi kolay, erişilebilir kılmak ve hızlı bir şekilde görselleştirmek için, veri yönetim sistemleri verilerin nereden geldiği ve nereye gittiği, nasıl işlendiği ve görselleştirildiği ve nereye depolandığı ve nasıl erişildiği konularını düzenlemek ve uygulamak için tasarlanmalıdır (Kim, 2020).

HTP araştırması, bitki bilimi ve veri analitiği arasındaki boşluğu kapatma zorluğu yaşar, böylece bitki bilimi topluluklarının bu fenotipleme verilerini nasıl kullanacaklarını ve veri analitiği topluluklarının bilim insanları ve üreticiler için etkili sonuçları nasıl sunacaklarını anlamalarını sağlaması açısından önemlidir. Bu nedenle, ıslah, genetik, ziraat, mühendislik, bilgisayar bilimi ve istatistik gibi temel disiplinler arasında koordinasyon ve entegrasyon gereklidir. Böylece bu araçların geniş ve uygulamalı tarımsal kullanım için erişilebilir hale getirilebilir. (Shakoor vd., 2019).

Yüksek çözünürlüklü veri seti bitki düzeyi fenotipleri için büyük ayrıntılara sahiptir. Birçok durumda, yer platformundaki yakın çekim görüntülerinin çözünürlüğü fazladır ve genellikle işleme süresini ve belleği kaydetmek için veri doğruluğunu kaybetmeden küçültülür. Uzaktan algı veri seti, yüksek zaman çözünürlüğü ile kısa bir zaman penceresinde büyük bir mekansal kapsama sahiptir, ancak düşük mekansal çözünürlük ve yer doğruluğunda daha az performansa sahiptir. Veri yönetimi, yerel yer platformu ve uzaktan algı uçak/uydu veri setlerinden bu çok katmanlı veri setlerini entegre etmek ve fenotip modelleme alan gözetimi için bunları koordine etmek zorundadır. Makine öğrenimi modelleri için kullanılan pozitif görüntülerin kalitesiz olması, kötü bir tahmin sonucuna yol açabilir. Kalite güvencesi ve kontrol, sensör hassasiyeti ve tutarlılığı için daha önemli hale gelir ve gelecekteki HTP araştırma programları için kalite protokollerinin geliştirilmesi ve standartlaştırılması gerekmektedir (Kim, 2020).

5. Sonuç

Bu derleme, yüksek kapasiteli fenotipleme sistemlerini oluşturan sensör, platform, analitik araç ve veri yönetimi bileşenlerini bütünsel bir perspektiften incelemiş; geleneksel manuel yöntemlerin zahmetli ve tutarsız yapısının görüntü tabanlı otomatik sistemlerle nasıl aşılabileceğini ortaya koymuştur. Ancak bu dönüşümün önünde, yalnızca teknolojik değil yapısal nitelikte de ciddi engeller bulunmaktadır. Bileşenler arasındaki temel ödünleşimler değerlendirildiğinde, sensör–platform düzeyinde en belirgin gerilimin doğruluk ile ölçeklenebilirlik arasında ortaya çıktığı görülmektedir. Yüksek çözünürlüklü sensörler fenotipik bilgi zenginliği sağlarken platform maliyetini önemli ölçüde artırmakta; bu durum geniş ölçekli ıslah programlarında uygulanabilirliği doğrudan kısıtlamaktadır. Platform–analitik düzeyinde ise kontrollü sistemleri standart ve tekrarlanabilir veri üretmekle birlikte tarla koşullarının karmaşıklığını ve çevresel belirsizliği yeterince yansıtamamaktadır. Saha platformları daha gerçekçi fenotipik bilgi sunmakta; ancak görüntü değişkenliği ve standart dışı koşullar analitik karmaşıklığı artırmaktadır. Analitik–veri entegrasyonu açısından ise büyük veri yaklaşımları ve derin öğrenme tabanlı modeller yüksek doğruluk sunmakla birlikte kapsamlı etiketli veri setleri gerektirmekte; çevresel karakterizasyon ve veri yönetimi altyapısındaki yetersizlikler bu potansiyelin tam anlamıyla kullanılmasını engellemektedir. Önceliklendirilmiş araştırma boşlukları açısından en kritik ihtiyaç; çoklu lokasyon tarla denemelerinde güvenilir biçimde çalışabilen, ekonomik, kullanıcı dostu ve istikrarlı veri üretebilen platform–donanım–yazılım entegrasyonlarının geliştirilmesidir. Mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu kontrollü ortamlarda doğrulanmış olup saha koşullarına aktarımda performans kaybı yaşanmaktadır. Bu boşluk özellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki kamu sektörü ıslah programları için hayati önem taşımaktadır; zira bu bölgelerde fenotipleme alanındaki akademik ilerlemelerin tarlada somut verim artışlarına dönüştürülebilmesi, ancak düşük maliyetli çözümlerin sahaya entegrasyonu ile mümkün olacaktır. İkinci öncelikli boşluk, genotip–çevre–kültürel işlem (G + Ç + K) etkileşimini mekanistik düzeyde ele alabilen, iklim koşulları, toprak özellikleri ve yetiştiricilik uygulamalarını kapsayan bölgeye özgü büyüme modellerinin geliştirilmesidir. Bu modeller coğrafi hedeflemeyi ve bölge tanımlamasını iyileştirerek ıslah uygulamalarının ilerlemesini hızlandıracak; özellikle iklim değişikliği senaryoları ve beklenen sıcaklık artışları bağlamında genetik varyasyonun çevresel senaryolara göre analizini mümkün kılacaktır. Üçüncü olarak, piyasa odaklı ürün profillerinin belirlenmesi, üretici ve tüketici ihtiyaçlarının dengelenmesi ve değer zinciri paydaşlarının sisteme dahil edilmesi; fenotipleme çıktılarının gerçek ıslah hedeflerine dönüştürülmesi için vazgeçilmez bir çerçeve sunmaktadır. Tüm bu hedeflere ulaşmak, bitki bilimcilerinden mühendislere, iklim bilimcilerinden bitki modelcilerine uzanan disiplinlerarası çalışma gruplarının ortak çabasını ve uluslararası topluluk ağlarının güçlendirilmesini gerektirmektedir. Yatırım maliyetlerinin elde edilen genetik kazançla kanıtlanabilir biçimde dengelendiği noktada, yüksek kapasiteli fenotipleme teknolojileri modern ıslah programlarının standart ve ayrılmaz bir bileşenine dönüşecektir.

6. Teşekkür

Yazarlar bu makalenin bazı bölümlerinde dil düzenlemesi için Google Gemini kullanmış olup metni kontrol edip düzenlemiştir. Sonucundaki içeriğin tüm sorumluluğunu yazarlar üstlenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

7. Kaynaklar

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic change*, 140(1), 33-45. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>
- Andrade-Sanchez, P., Gore, M. A., Heun, J. T., Thorp, K. R., Carmo-Silva, A. E., French, A. N., ... & White, J. W. (2013). Development and evaluation of a field-based high-throughput phenotyping platform. *Functional Plant Biology*, 41(1), 68-79. <https://doi.org/10.1071/FP13126>
- Araus, J. L., Kefauver, S. C., Zaman-Allah, M., Olsen, M. S., & Cairns, J. E. (2018). Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. *Trends in plant science*, 23(5), 451-466. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.001> External Link
- Baerenfaller, K., Massonnet, C., Walsh, S., Baginsky, S., Bühlmann, P., Hennig, L., ... & Gruissem, W. (2012). Systems-based analysis of Arabidopsis leaf growth reveals adaptation to water deficit. *Molecular systems biology*, 8(1), <https://doi.org/10.1038/msb.2012.39>
- Bai, G., Ge, Y., Scoby, D., Leavitt, B., Stoerger, V., Kirchgesner, N., ... & Awada, T. (2019). NU-Spidercam: A large-scale, cable-driven, integrated sensing and robotic system for advanced phenotyping, remote sensing, and agronomic research. *Computers and electronics in agriculture*, 160, 71-81. [10.1016/j.compag.2019.03.009](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.009)
- Bao, Y., Aggarwal, P., Robbins, N. E., Sturrock, C. J., Thompson, M. C., Tan, H. Q., ... & Dinnyes, J. R. (2014). Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9319-9324. <https://doi.org/10.1073/pnas.1400966111>
- Barker III, J., Zhang, N., Sharon, J., Steeves, R., Wang, X., Wei, Y., & Poland, J. (2016). Development of a field-based high-throughput mobile phenotyping platform. *Computers and Electronics in Agriculture*, 122, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.017>
- Caldeira, C. F., Bosio, M., Parent, B., Jeanguenin, L., Chaumont, F., & Tardieu, F. (2014). A hydraulic model is compatible with rapid changes in leaf elongation under fluctuating evaporative demand and soil water status. *Plant Physiology*, 164(4), 1718-1730. <https://doi.org/10.1104/pp.113.228379>
- Chawade, A., Armoniené, R., Berg, G., Brazauskas, G., Frostgård, G., Geleta, M., ... & Weih, M. (2018). A transnational and holistic breeding approach is needed for sustainable wheat production in the Baltic Sea region. *Physiologia plantarum*, 164(4), 442-451. <https://doi.org/10.1111/ppl.12726>
- Chen, J., Xu, Q., Luo, L., Wang, Y., & Wang, S. (2019). A robust method for automatic panoramic UAV image mosaic. *Sensors*, 19(8), 1898. <https://doi.org/10.3390/s19081898>
- Crain, J. L., Wei, Y., Barker III, J., Thompson, S. M., Alderman, P. D., Reynolds, M., ... & Poland, J. (2016). Development and deployment of a portable field phenotyping platform. *Crop Science*, 56(3), 965-975. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.05.0290>
- De Volder, J., Vandenbussche, F., Hu, Y., Philips, W., & Van Der Straeten, D. (2012). Rosette tracker: an open source image analysis tool for automatic quantification of genotype effects. *Plant physiology*, 160(3), 1149-1159. <https://doi.org/10.1104/pp.112.202762>

- Elmgren, R., & Larsson, U. (2001). Nitrogen and the Baltic Sea: managing nitrogen in relation to phosphorus. *The Scientific World Journal*, 1(2), 371-377. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.291>
- Fahlgren, N., Feldman, M., Gehan, M. A., Wilson, M. S., Shyu, C., Bryant, D. W., ... & Baxter, I. (2015). A versatile phenotyping system and analytics platform reveals diverse temporal responses to water availability in *Setaria*. *Molecular plant*, 8(10), 1520-1535. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.06.005>
- FAO (2009). How to Feed the World in 2050. High-Level Expert Forum, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Federer, W. T., & Crossa, J. (2012). I. 4 screening experimental designs for quantitative trait loci, association mapping, genotype-by-environment interaction, and other investigations. *Frontiers in Physiology*, 3, 156. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00156>
- Golzarian, M. R., Frick, R. A., Rajendran, K., Berger, B., Roy, S., Tester, M., & Lun, D. S. (2011). Accurate inference of shoot biomass from high-throughput images of cereal plants. *Plant methods*, 7, 1-11. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-7-2>
- Hannemann, J. A. N., Poorter, H., Usadel, B., Blaessing, O. E., Finck, A., Tardieu, F., ... & Gibon, Y. (2009). Xeml Lab: a tool that supports the design of experiments at a graphical interface and generates computer-readable metadata files, which capture information about genotypes, growth conditions, environmental perturbations and sampling strategy. *Plant, Cell & Environment*, 32(9), 1185-1200. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01964.x>
- Hartmann, A., Czauderna, T., Hoffmann, R., Stein, N., & Schreiber, F. (2011). HTPheno: an image analysis pipeline for high-throughput plant phenotyping. *BMC bioinformatics*, 12(1), 148. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-148>
- Huang, Y., Thomson, S. J., Lan, Y., & Maas, S. J. (2010). Multispectral imaging systems for airborne remote sensing to support agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), 50-62. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.0-0>
- Hunter, M. C., Smith, R. G., Schipanski, M. E., Atwood, L. W., & Mortensen, D. A. (2017). Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. *Bioscience*, 67(4), 386-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- Ilic, K., Kellogg, E. A., Jaiswal, P., Zapata, F., Stevens, P. F., Vincent, L. P., ... & Rhee, S. Y. (2007). The plant structure ontology, a unified vocabulary of anatomy and morphology of a flowering plant. *Plant physiology*, 143(2), 587-599. <https://doi.org/10.1104/pp.106.092825>
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... & Wheeler, T. R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural systems*, 155, 240-254. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>
- Juan, L., & Gwun, O. (2009). A comparison of sift, pca-sift and surf. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(4), 143-152.
- Kempenaar, C., Been, T., Booi, J., Van Evert, F., Michielsen, J. M., & Kocks, C. (2017). Advances in variable rate technology application in potato in the Netherlands. *Potato research*, 60(3), 295-305. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9357-4>
- Kim, J. Y. (2020). Roadmap to high throughput phenotyping for plant breeding. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(1), 43-55. <https://doi.org/10.1007/s42853-020-00043-0>
- Kim, J. Y., & French, J. (2015). High throughput phenotyping for soybean breeding applications. In *Technical Community of Monsanto Conference*. (pp. 9-11)
- Kim, J. Y., French, J., Ye, X., Kramer, A. J., Lussenden, R. L., Gulleston, J. A., & Carlson, C. M. (2016). Ground remote sensing for soybean IDC screening. In *Technical Community of Monsanto Conference, TCM2016*. (pp. 7-9)
- Klukas, C., Chen, D., & Pape, J. M. (2014). Integrated analysis platform: an open-source information system for high-throughput plant phenotyping. *Plant physiology*, 165(2), 506-518. <https://doi.org/10.1104/pp.113.233932>
- Kooper, R., Burnette, M., Maloney, J., & LeBauer, D. (2017, December). Data flow for the TERRA-REF project. In *AGU Fall Meeting Abstracts*. (pp. IN31A-0063)
- Lado, B., Matus, I., Rodriguez, A., Inostroza, L., Poland, J., Belzile, F., ... & von Zitzewitz, J. (2013). Increased genomic prediction accuracy in wheat breeding through spatial adjustment of field trial data. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 3(12), 2105-2114. <https://doi.org/10.1534/g3.113.007807>
- Leakey, A. D., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., & Ort, D. R. (2009). Elevated CO2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *Journal of experimental botany*, 60(10), 2859-2876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>
- Leister, D., Varotto, C., Pesaresi, P., Niwergall, A., & Salamini, F. (1999). Large-scale evaluation of plant growth in *Arabidopsis thaliana* by non-invasive image analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 37(9), 671-678. [https://doi.org/10.1016/S0981-9428\(00\)80097-2](https://doi.org/10.1016/S0981-9428(00)80097-2)
- Liang, X., Wang, K., Huang, C., Zhang, X., Yan, J., & Yang, W. (2016). A high-throughput maize kernel traits scorer based on line-scan imaging. *Measurement*, 90, 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.015>
- Liu, Q., Liu, W., Zou, L., Wang, J., & Liu, Y. (2012). A new approach to fast mosaic UAV images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38, 271-276. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-271-2011>
- Lu, Y., Savage, L. J., Ajjawi, I., Imre, K. M., Yoder, D. W., Benning, C., ... & Last, R. L. (2008). New connections across pathways and cellular processes: industrialized mutant screening reveals novel associations between diverse phenotypes in *Arabidopsis*. *Plant physiology*, 146(4), 1482-1500. <https://doi.org/10.1104/pp.107.115220>
- Mahlein, A. K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant disease*, 100(2), 241-251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- MAPIR (2019). Creating the ortho-mosaic. Retrieved June 19, 2019, www.mapir.camera/pages/processing-survey3-camera-images
- Masuka, B., Atlin, G. N., Olsen, M., Magorokosho, C., Labuschagne, M., Crossa, J., ... & Cairns, J. E. (2017). Gains in maize genetic improvement in Eastern and Southern Africa: I. CIMMYT hybrid breeding pipeline. *Crop Science*, 57(1), 168-179. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0343>
- Masuka, B., Magorokosho, C., Olsen, M., Atlin, G. N., Bänziger, M., Pixley, K. V., ... & Cairns, J. E. (2017). Gains in maize genetic improvement in Eastern and Southern Africa: II. CIMMYT open-pollinated variety breeding pipeline. *Crop Science*, 57(1), 180-191. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0408>
- Mishra, Y., Johansson Jänkänpää, H., Kiss, A. Z., Funk, C., Schröder, W. P., & Jansson, S. (2012). *Arabidopsis* plants grown in the field and climate chambers significantly differ in leaf morphology and photosystem components. *BMC Plant Biology*, 12(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-6>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in plant science*, 7, 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
- Montesinos-López, A., Montesinos-López, O. A., Cuevas, J., Mata-López, W. A., Burgueño, J., Mondal, S., ... & Crossa, J. (2017). Genomic Bayesian functional regression models with interactions for predicting wheat grain yield using hyper-spectral image data. *Plant Methods*, 13(1), 1-29. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0212-4>
- Parent, B., & Tardieu, F. (2014). Can current crop models be used in the phenotyping era for predicting the genetic variability of yield of plants subjected to drought or high temperature? *Journal of experimental botany*, 65(21), 6179-6189. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru223>
- Pawara, P., Okafor, E., Surinta, O., Schomaker, L., & Wiering, M. (2017). Comparing local descriptors and bags of visual words to deep convolutional neural networks for plant recognition. In *Proceedings of the 6th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*. (pp. 479-486)
- Planet (2019). Planet imagery and archive. Retrieved Aug 18, 2019, from www.planet.com/products/planet-imagery/
- Pretty, J. N. (1997, November). The sustainable intensification of agriculture. In *Natural Resources Forum*. (pp. 247-256). <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1997.tb00699.x>
- Rebetzke, G. J., Jimenez-Berni, J. A., Bovill, W. D., Deery, D. M., & James, R. A. (2016). High-throughput phenotyping technologies allow accurate selection of stay-green. *Journal of experimental botany*, 67(17), 4919-4924. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw301>
- Reynolds, D., Baret, F., Welcker, C., Bostrom, A., Ball, J., Cellini, F., ... & Tardieu, F. (2019). What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios. *Plant Science*, 282, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.06.015>
- Shakoor, N., Northrup, D., Murray, S., & Mockler, T. C. (2019). Big data driven agriculture: big data analytics in plant breeding, genomics, and the use of remote sensing technologies to advance crop productivity.

- The Plant Phenome Journal*, 2(1), 1-8. <https://doi.org/10.2135/tppj2018.12.0009>
- Shi, J., Gao, H., Wang, H., Lafitte, H. R., Archibald, R. L., Yang, M., ... & Habben, J. E. (2017). ARGOS 8 variants generated by CRISPR-Cas9 improve maize grain yield under field drought stress conditions. *Plant biotechnology journal*, 15(2), 207-216. <https://doi.org/10.1111/pbi.12603>
- Sticklen, M. B. (2007). Feedstock crop genetic engineering for alcohol fuels. *Crop science*, 47(6), 2238-2248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0212D>
- Sun, S., Li, C., & Paterson, A. H. (2017). In-field high-throughput phenotyping of cotton plant height using LiDAR. *Remote Sensing*, 9(4), 377. <https://doi.org/10.3390/rs9040377>
- Tanger, P., Klassen, S., Mojica, J. P., Lovell, J. T., Moyers, B. T., Baraoidan, M., ... & McKay, J. K. (2017). Field-based high throughput phenotyping rapidly identifies genomic regions controlling yield components in rice. *Scientific reports*, 7(1), 42839. <https://doi.org/10.1038/srep42839>
- Tardieu, F., & Parent, B. (2017). Predictable 'meta-mechanisms' emerge from feedbacks between transpiration and plant growth and cannot be simply deduced from short-term mechanisms. *Plant, Cell & Environment*, 40(6), 846-857. <https://doi.org/10.1111/pce.12822>
- Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), 818-822. <https://doi.org/10.1126/science.1183700>
- Thompson, A. L., Conrad, A., Conley, M. M., Shrock, H., Taft, B., Miksch, C., ... & Dyer, J. M. (2018). Professor: A motorized field-based phenotyping cart. *HardwareX*, 4, e00025. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2018.e00025>
- Ubbens, J. R., & Stavness, I. (2017). Deep plant phenomics: a deep learning platform for complex plant phenotyping tasks. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1190. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01190>
- Vadez, V., Kholova, J., Medina, S., Kakkera, A., & Anderberg, H. (2014). Transpiration efficiency: new insights into an old story. *Journal of experimental botany*, 65(21), 6141-6153. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru040>
- Visentin, I., Vitali, M., Ferrero, M., Zhang, Y., Ruyter-Spira, C., Novák, O., ... & Cardinale, F. (2016). Low levels of strigolactones in roots as a component of the systemic signal of drought stress in tomato. *New Phytologist*, 212(4), 954-963. <https://doi.org/10.1111/nph.14190>
- Wang, E., Martre, P., Zhao, Z., Ewert, F., Maiorano, A., Rötter, R. P., ... & Asseng, S. (2017). The uncertainty of crop yield projections is reduced by improved temperature response functions. *Nature plants*, 3(8), 1-13. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.102>
- Xiong, P., Liu, X., Gao, C., Zhou, Z., Gao, C., & Liu, Q. (2013). A real-time stitching algorithm for UAV aerial images. In *Conference of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)*. (pp. 1613-1616). <https://doi.org/10.2991/iccsee.2013.405>
- Yang, C., & Hoffmann, W. C. (2015). Low-cost single-camera imaging system for aerial applicators. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 096064-096064. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.9.096064>
- Yang, C., Huang, Q., Li, Z., Liu, K., & Hu, F. (2017). Big Data and cloud computing: innovation opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 10(1), 13-53. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771>