



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İHA TABANLI RGB GÖRÜNTÜLEME İLE KANOPI YAPISAL
PARAMETRELERİNİ BELİRLEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kardelen ATASEVER TOLAY

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Servet YAPRAK

TOKAT- 2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Servet YAPRAK danışmanlığında hazırlamış olduğum “İHA Tabanlı RGB Görüntüleme ile Kanopi Yapısal Parametrelerini Belirleme” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20/07/2023

Kardelen ATASEVER TOLAY



JÜRİ KABUL VE ONAY

Kardelen Atasever Tolay tarafından hazırlanan “**İHA Tabanlı RGB Görüntüleme ile Kanopi Yapısal Parametrelerini Belirleme**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.06.2023 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Başkan) :Prof. Dr. Fatih POYRAZ

Üye : Prof. Dr. Tekin SUSAM

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Servet YAPRAK

ONAY

20/07/2023

Prof. Dr. Mehmet GÜNEŞ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

“İHA Tabanlı RGB Görüntüleme ile Kanopi Yapısal Parametrelerini Belirleme” adlı tez çalışmam boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda beni yönlendiren, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan çok değerli tez danışmanım ve hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Servet YAPRAK’a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda yaptığım uygulamaya yönelik sağladıkları tüm teknik ekipman ve yardımları için başta Enver Neşet Koca olmak üzere tüm Enver Harita çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın uygulama aşamasında tarım arazisini bulmada ve kullanmada sağladığı kolaylıklar açısından Hasan KAPLAN Bey’e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemde her türlü maddi ve manevi desteği benden esirgemeyen canım annem Hamiye ÜRER’e, her an yanımda olan ve beni destekleyen çok değerli eşim Musa Turap TOLAY’a, onun kıymetli ailesine ve canım dedem Memet TOLAY’a sonsuz teşekkür ederim.

Kardelen ATASEVER TOLAY

ANTALYA-2023

ÖZET

İHA TABANLI RGB GÖRÜNTÜLEME İLE KANOPI YAPISAL PARAMETRELERİNİ BELİRLEME

Atasever Tolay, Kardelen

Yüksek Lisans, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Servet Yaprak

Temmuz 2023, xviii + 153 sayfa

Eskiden tarım faaliyetleri basit insan gücüyle ve ilkel aletlerle yapılmaktayken, günümüzde çok gelişmiş teknolojiler uygulanarak yapılmaktadır. İHA'ların sivil kullanıma sunulması, teknolojilerindeki gelişmeler ve İHA fiyatlarının düşmesiyle pek çok disiplin araştırmalarında İHA'ları yaygın olarak kullanmaya başlamıştır. İHA'lar hassas tarım uygulamalarında biyokütle, ilaçlama, hastalık tespiti, bitki su stres analizi, yabancı ot tespiti, gübreleme, sulama, ürün verimi, toprak erozyonu, sınıflandırma, vahşi hayvan hasarı belirleme gibi birçok amaçla kullanılmaktadır. İHA'lar ile yapılan gözlemler ve müdahaleler sonucunda toprak ve su kaynakları korunmakta, ilaçlama, sulama ve gübreleme faaliyetleri kontrol altında tutulmakta, düşük maliyetlerle maksimum verim elde edilmektedir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde kanopi hacminin verim, biyokütle, fenotipleme gibi konular ile ilgili olduğu görülmüştür. Kanopi yapısal parametreleri bitki sağlığı ve büyümesiyle yakından ilişkili olup, bu çalışma ile hassas tarım uygulamalarına katkı yapmak, bitki sağlığı ve büyümesinin yüksek doğruluk ve hassasiyetle izlenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında İHA'dan elde edilen görüntüler Hareketten Yapı algoritmasıyla çalışan Agisoft yazılımında, Pix4D ve QGIS yazılımlarında işlenmiştir. Agisoft Metashape ve Pix4D'de nokta bulutu, Sayısal Yüzey Modeli, ortofoto ve kırmızı, yeşil ve mavi bantların görüntüleri orta ve yüksek hassasiyetli olacak şekilde ayrı ayrı elde edilmiştir. Farklı hassasiyetle elde edilen sonuç ürünler Quantum GIS'e aktarılmıştır. İlk olarak Agisoft Metashape'te yüksek hassasiyetle oluşturulan R, G ve B bandları QGIS'e ayrı ayrı aktarılarak Aşırı Yeşil İndeks (Excess Green Index) değeri hesaplanmış, ardından bitki örtüsü ve diğer sınıfların sınıflandırılması için bir eşik katmanı oluşturulmuştur. Daha sonra toprak pikselleri maskelenmiş ve Sayısal Yüzey Modeli QGIS'e aktarılmıştır. Buradan, sadece kanopi ve sadece toprak değerleri içeren raster katmanlar üretilmiştir. "Zonal Statistics" kısmından ise türetilen ortalama kanopi yüksekliği, ortanca toprak yüksekliği, kanopi alanı gibi değerler Excel'e aktarılmıştır. Excel'de uygun değerlerle yapılan hesaplamalar sonucunda kanopi hacmi elde edilmiştir. Tüm işlemler Agisoft'ta ve Pix4D'de farklı hassasiyetle üretilen ürünler için tekrarlanmış ve 4 farklı kanopi yapısal parametre değeri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar SPSS yazılımında analiz edilmiştir.

SPSS’te ortalama kanopi boyu, ortalama kanopi alanı, aşırı yeşil indeks ve hacim arasında yapılan çoklu regresyon analizine göre; hacim bağımlı değişkeni üzerinde en fazla kanopi boyunun etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Hacim ve ortalama kanopi boyu arasında Pix4D (orta) için Pearson korelasyon katsayısı $r = 0,776$, Pix4D (yüksek) için $r = 0,667$, Agisoft (orta) için $r = 0,767$, Agisoft (yüksek) için $r = 0,764$ olarak bulunmuştur. Çoklu regresyon analizi sonuçlarına göre hacim ve bağımsız değişkenler arasında belirleme katsayısı (R^2), Agisoft (orta) için $R^2 = 0,733$, Agisoft (yüksek) için $R^2 = 0,65$, Pix4D (orta) için $R^2 = 0,741$, Pix4D (yüksek) için $R^2 = 0,684$ olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre verilerin orta hassasiyetle işlenmesinin daha doğru ve hızlı olacağı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Sonuç olarak; İHA’dan elde edilen RGB görüntülerin kanopi yapısal parametreleri çıkarmada oldukça faydalı ve düşük maliyetli olduğu görülmüştür. Ayrıca, Aşırı Yeşil İndeks’in bitki örtüsü bölgelerini ve kapsama alanlarını çıkarmada başarılı olduğu görülmüştür. İHA'ların hassas tarım uygulamalarında kullanılabileceği ve bu yöntemle bitki büyüme ve gelişiminin gözlemlenebileceği kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı, Kanopi Hacmi, Hareketten Yapı, Hassas Tarım, Kanopi Yapısal Parametreleri

ABSTRACT

CANOPY STRUCTURAL PARAMETERS ESTIMATION WITH UAV-BASED RGB IMAGERY

Atasever Tolay, Kardelen

Master's Thesis, Department of Geomatics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Servet Yaprak

July 2023, xviii + 153 pages

In the past, agricultural activities were carried out with simple human-power and primitive tools but today, it's made in line with very advanced technologies. With the introduction of UAVs for civilian use, their use has become widespread, and many professions have started to include UAVs in their research. With the decrease in UAV costs, UAVs have also started to be used in precision agriculture applications. UAVs are used for many purposes such as biomass, spraying, disease detection, plant water stress analysis, weed detection, fertilization, irrigation, crop yield, soil erosion, classification, wild animal damage determination. As a result of observations and interventions by UAVs, soil and water resources are protected, spraying, irrigation and fertilization activities are kept under control, and maximum efficiency is achieved with low costs.

When the literature studies were examined, it was seen that the canopy volume was related to issues such as yield, biomass, and phenotyping. Canopy structural parameters are closely related to plant health and growth, and with this study, it is aimed to contribute to precision agriculture practices and monitoring plant health and growth with high accuracy and precision.

In this thesis, the images obtained from UAV were processed in Agisoft and Pix4D software working with the Structure from Motion algorithm and QGIS. In Agisoft Metashape and Pix4D, images of point cloud, Digital Surface Model, orthophoto and red, green and blue bands were obtained separately with medium and high precision. The resulting products obtained with different precision were transferred to the Quantum GIS. First of all, the R, G and B bands, which were created with high precision in Agisoft Metashape, were transferred to QGIS separately and the Excess Green Index (ExG) value was calculated, then a threshold layer was created for the classification of vegetation and other classes. Then, the soil pixels were masked and the Digital Surface Model was transferred to QGIS. Hence, canopy only and soil only raster layers were produced. Values such as mean canopy height, median soil height and canopy area derived from the "Zonal Statistics" tool were transferred to Excel. The canopy volume was obtained as a result of the calculations made with appropriate values in Excel. All processes were reiterated for products produced with different precision in Agisoft and Pix4D, and 4 different canopy structural parameter values were obtained. The obtained results were analyzed in SPSS software.

According to the multiple linear regression analysis made between mean canopy height, mean canopy area, Excess Green Index and canopy volume in SPSS; It has been concluded that the mean canopy height is the most effective on the volume dependent variable. The Pearson correlation coefficient between volume and mean canopy height was found to be $r = 0,776$ for Pix4D (medium), $r = 0,667$ for Pix4D (high), $r = 0,767$ for Agisoft (medium), $r = 0,764$ for Agisoft (high). According to the results of multiple regression analysis, determination coefficient (R^2) between volume and independent variables was found to be $R^2 = 0.733$ for Agisoft (medium), $R^2 = 0.65$ for Agisoft (high), $R^2 = 0.741$ for Pix4D (medium), $R^2 = 0.684$ for Pix4D (high). According to these results, it was concluded that data processing with medium precision would be more accurate and faster.

As a result, it has been seen that RGB images obtained from the UAV are very useful and low cost in extracting the canopy structural parameters. Also, the Excess Green Index has been seen to be successful in extracting vegetation zones and coverage areas. It has been proven that UAVs can be used in precision agriculture applications, plant growth and development can be observed with this method.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Canopy Volume, Structure from Motion, Precision Agriculture, Structural Parameters

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1
1. TEORİK TEMELLER	4
1.1. İnsansız Hava Aracı Sistemleri	4
1.2. İHA'ların Sınıflandırılması	5
1.3. Uçuş Planlaması ve Parametreleri.....	7
1.4. İHA Sensörleri ve Özellikleri.....	9
1.5. İHA Aerodinamiği ve Mekaniki	12
1.6. Structure From Motion Tekniği	15
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	18
3. MATERYAL VE METOD.....	53
3.1. Materyal	53
3.1.1. Çalışma alanı	53
3.1.2. DJI Phantom 4 RTK insansız hava aracı	54
3.1.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan yazılımlar	60
3.2. Metod	64
3.2.1. Arazi çalışması	64
3.2.2. Uçuş planlaması.....	67
3.2.3. Verilerin işlenmesi.....	67
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	90
4.1. Pix4D (yüksek) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları	93
4.2. Pix4D (orta) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları	95
4.3. Agisoft (yüksek) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları.....	97
4.4. Agisoft (orta) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları.....	99
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	101

KAYNAKLAR	103
EKLER.....	108
Ek 1: Agisoft Metashape Sonuç Raporu (Agisoft yüksek için).....	108
Ek 2: Agisoft Metashape Sonuç Raporu (Agisoft orta için).....	117
Ek 3: Pix4DMapper için Sonuç Raporu (Pix4D yüksek için)	126
Ek 4: Pix4DMapper için sonuç raporu (Pix4D orta için)	138
Ek 5: Agisoft yüksek için hesaplanılan kanopi parametre değerleri	149
Ek 6: Agisoft orta için hesaplanılan kanopi parametre değerleri.....	150
Ek 7: Pix4D yüksek için hesaplanılan kanopi parametre değerleri	151
Ek 8: Pix4D orta için hesaplanılan kanopi parametre değerleri	152
ÖZGEÇMİŞ	153

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. NATO'ya göre insansız hava araçlarının sınıflandırması	6
Tablo 1.2. Çeşitli İHA platformlarının karşılaştırılması.....	13
Tablo 3.1 DJI Phantom 4 RTK hava aracı teknik özellikleri.....	56
Tablo 3.2. DJI Phantom 4 RTK kumandası teknik özellikleri.....	58
Tablo 3.3. Kamera teknik özellikleri	59
Tablo 3.4. Ölçülen noktalara ait veriler ve noktaların kesin koordinatları	65
Tablo 3.5. Agisoft Metashape'te YKN'lerin ortalama karakök (RMSE) hata değerleri .	70
Tablo 3.6. Agisoft Metashape'te kontrol noktasının ortalama karekök (RMSE) hata değerleri	70
Tablo 3.7. Agisoft Metashape'te YKN'lerin ortalama karekök (RMSE) hata değerleri .	73
Tablo 3.8. Agisoft Metashape'te kontrol noktasının ortalama karekök (RMSE) hata değerleri	73
Tablo 3.9. Pix4DMapper'da YKN'lerin ortalama karekök (RMSE) hata değerleri	77
Tablo 3.10. Pix4DMapper'da kontrol noktasının ortalama karakök (RMSE) hata değerleri	77
Tablo 3.11. Pix4DMapper'da YKN'lerin ortalama karekök (RMSE) hata değerleri (orta hassasiyet için).....	80
Tablo 3.12. Pix4DMapper'da kontrol noktasının ortalama karekök (RMSE) hata değerleri (orta hassasiyet için)	80
Tablo 4.1. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Pix4D yüksek için).....	93
Tablo 4.2. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Pix4D orta için)	95
Tablo 4.3. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Agisoft yüksek için).....	97
Tablo 4.4. Hacim tahmini için çoklu doğrusal analiz sonuçları (Agisoft orta için)	99

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Fotogrametride ilk İHA uygulamasında kullanılan Hegi firmasına ait araç	4
Şekil 1.2. Yer örnekleme aralığının hesaplamasında kullanılan parametreler	7
Şekil 1.3. Elektromanyetik spektrum bölgeleri	10
Şekil 1.4. MicaSense firmasına ait RedEdge-P multispektral kamera	10
Şekil 1.5. Multispektral ve hiperspektral görüntülemenin karşılaştırılması	11
Şekil 1.6. Han ve ark. (2021) tarafından İHA ile çekilen meyve ağaçlarının termal görüntüsü	11
Şekil 1.7. Lynnhaven Inlet, Virginia'ya ait lidar haritası	12
Şekil 1. 8. CCD (sol) ve CMOS (sağ) sensörleri örneği	12
Şekil 1. 9. Bir hava aracına etkiyen kuvvetler	13
Şekil 1.10. Quadcopter motorları dönüş yönleri	14
Şekil 1.11. DJI firmasına ait bir uçuş kontrolcüsü	14
Şekil 1.12. Westoby ve ark. (2012)'a göre hareketten yapı tekniğinin gösterimi	16
Şekil 2.1. Reid ve ark. (2016)'nın hesapladığı EG ve GCC renk indeksleri gösterimi ..	19
Şekil 2.2. VOL-LAIC ile $H_{simulated}$ ve V_{canopy} elde etme adımları	20
Şekil 2.3. Gil-Docampo ve ark. (2018) tarafından yoğunluk faktörü kullanılarak yerüstü biyokütlesinin hesaplanmasının gösterimi	21
Şekil 2.4. Caruso ve ark. (2019)'nın multispektral görüntülerden NDVI hesaplama için takip ettikleri iş akışı	24
Şekil 2.5. Caruso ve ark. (2019)'nın kanopi hacmini elde etme işlem adımları	25
Şekil 2.6. Lussem ve ark. (2019)'nın yürüttükleri çalışmada deney alanında meydana gelen bozulmaların gösterimi a) aşırı büyüme sonucu saplarda bükülme b) kemirgen etkisi	28
Şekil 2.7. Maimaitijiang ve ark. (2019)'nın biyokütle tahmini için CVMVI oluşturmada takip ettikleri işlem adımları	30
Şekil 2.8. Ouyang ve ark. (2020)'nın çalışmalarında kullandıkları RGB ve multispektral görüntüleri işlemede takip ettikleri prosedür	35
Şekil 2.9. Karl ve ark. (2020)'nın çalışma metodolojisi a) İHA görüntülerinin elde edilmesi, b) SfM ile 3D nokta bulutu üretmek için görüntülerin işlenmesi c) söğütlerin nokta bulutundan çıkarılması d) kanopi hacminin belirtilen 2 teknikle hesaplanması ...	37

Şekil 2.10. Colwell ve ark. (2021)'nin SfM algoritması yardımıyla patatesten kanopi yapısı hakkında nicel verilerin elde edilmesi için uyguladıkları iş-akış şeması	43
Şekil 2.11. Mao ve ark (2021)'a göre CV ve AGV arasındaki farkın gösterimi. (a) kanopi hacmi (b) toprak üstü bitki dokusu hacmi.....	45
Şekil 2.12. Sinha ve ark. (2022)'nin asmalarda farklı uçuş yükseklikleri için oluşturdukları mahsul yüzey modellerinin karşılaştırılması (sırasıyla 15 m, 30 m, 45 m)52	
Şekil 3.1. Uygulama için seçilen çalışma alanının Google Earth görüntüsü	53
Şekil 3.2. Arazi üzerinde ekili olan maydanoz bitkisi	54
Şekil 3.3. DJI Phantom 4 RTK insansız hava aracı	55
Şekil 3.4. DJI Phantom 4 RTK kumandası	57
Şekil 3.5. DJI Phantom 4 RTK kamerası	59
Şekil 3.6. South S82-V Sabit GNSS alıcısı	64
Şekil 3.7. 2 ve 1 numaralı yer kontrol noktaları	65
Şekil 3.8. Çalışma sahasında YKN'lerin ölçülmesi.....	66
Şekil 3.9. Araziye tesis edilen YKN'lerin çalışma sahasına dağılımı	66
Şekil 3.10. Fotoğraf alımı amaçlı yapılan uçuş planlaması	67
Şekil 3.11. Agisoft Metashape'e görüntülerin eklenmesi.....	68
Şekil 3.12. Görüntülerin hizalanması	69
Şekil 3.13. YKN'lerin programa aktarılması.....	69
Şekil 3.14. YKN'lerin Agisoft yazılımında görüntü üzerinde işaretlenmesi.....	70
Şekil 3.15. Agisoft'ta oluşturulan Sayısal Yüzey Modeli	71
Şekil 3.16. İHA görüntüleri kullanılarak Agisoft'ta üretilen ortofoto	72
Şekil 3.17. Fotoğrafların Pix4DMapper'a aktarılması.....	73
Şekil 3.18. Görüntü özelliklerinin seçilmesi.....	74
Şekil 3.19. Çıktı koordinat sisteminin seçilmesi.....	74
Şekil 3.20. Process şablonundan 3D Maps sonuç ürünlerinin seçilmesi	75
Şekil 3.21. Nokta yoğunluğunun seçilmesi	75
Şekil 3.22. İndeks hesaplayıcıdan kırmızı, yeşil ve mavi renk indekslerinin seçilmesi .	76
Şekil 3.23. 5 numaralı Yer Kontrol Noktasının fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi	76
Şekil 3.24. Pix4DMapper'da üretilen Sayısal Yüzey Modeli.....	78
Şekil 3.25. Pix4DMapper'da üretilen ortomozaik	79
Şekil 3.26. Çalışma alanının kırmızı, yeşil ve mavi bant görüntüsü (sırasıyla)	81
Şekil 3. 27. QGIS'te Excess Green Index'in raster hesaplayıcı aracılığıyla hesaplanması82	

Şekil 3.28. QGIS’te oluşan Aşırı Yeşil İndeks katmanı	82
Şekil 3.29. Eşik katmanı oluşturmada kullanılan eşitlik.....	83
Şekil 3.30. Aşırı yeşil indeks kullanılarak oluşturulan eşik katmanı.....	83
Şekil 3.31. Eşik katmanının yakın görüntüsü	84
Şekil 3.32. Toprak piksellerinin maskelenmesiyle elde edilen katman	84
Şekil 3.33. Çalışma alanının alt parsellere bölünmesi	85
Şekil 3.34. Oluşturulan alt parsellerin yakın görüntüsü.....	85
Şekil 3.35. 135 nolu alt parsel ve hesaplanılan değerler.....	86
Şekil 3.36. Sadece bitki pikselleri içeren bir katman üretmek için uygulanan eşitlik	87
Şekil 3.37. Sadece toprak pikselleri içeren bir katman üretmek için uygulanan eşitlik .	87
Şekil 3.38. Bölgesel istatistik aracıyla hesaplanılan değerlerden bazıları	88
Şekil 3.39. Bölgesel istatistik aracıyla toprak yüksekliği belirlemek için hesaplanılan değerlerden bazıları.....	88
Şekil 4.1. En yüksek kanopi hacmine sahip 104 numaralı parsel	91
Şekil 4.2. En yüksek ikinci kanopi hacmine sahip 99 numaralı parsel.....	92
Şekil 4.3. 4 ve 9 numaralı parseller	92
Şekil 4.4. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Pix4D yüksek için).....	94
Şekil 4.5. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği	94
Şekil 4.6. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Pix4D orta için).....	96
Şekil 4.7. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği	96
Şekil 4.8. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Agisoft yüksek için).....	98
Şekil 4.9. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği	98
Şekil 4.10. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Agisoft orta için)	100
Şekil 4.11. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği	100

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGE ve KISALTMALAR

A	İki Komşu Uçuş Hattı Arasındaki Mesafe
B	Baz Uzunluğu
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
cm	Santimetre
CH_{max}	Maksimum Kanopi Boyu
CH_{mean}	Ortalama Kanopi Boyu
CH_{min}	Minimum Kanopi Boyu
CH_{std}	Kanopi Boyu Standart Sapması
CVM_{VI}	Bitki Örtüsü Ağırlıklı Kanopi Hacim Modeli
f	Kamera Odak Uzaklığı
F_m	Model Alanının Zeminde Kapladığı Alan
h	Yükseklik
H_{crop}	Mahsul Yüksekliği
$H_{simulated}$	Nokta Bulutundan Türetilen Yükseklik
H_g	Yer Seviyesinden Uçuş Yüksekliği
h_{min}	Minimum Yükseklik
h_{max}	Maksimum Yükseklik
Kg	Kilogram
m_b	Ölçek Faktörü
m^2	Metrekare
m/sn	Metre/Saniye
$\%p$	Boyuna Bindirme Oranı
$\%q$	Enine Bindirme Oranı
S	Görüntü Çerçevesinin Zeminde Kapladığı Uzunluk
S'	Görüntü Çerçevesinin Bir Kenarının Uzunluğu
SH_{mean}	Ortalama Çim Yüksekliği
SH_{p90}	90. Yüzdelik Çim Yüksekliği
t	Fotoğraf Çekim Süresi

v	Hava Aracının Hızı
V	Kanopi Hacmi
V_{canopy}	Kanopi Hacmi
ABD:	Amerika Birleşik Devletleri
AGB:	Above Ground Biomass
AGV:	Above Ground Volume
ANOVA:	Analysis Of Variance
ARVI:	Atmospherically Resistant Vegetation Index
BÖHHBÜY:	Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
CBS:	Coğrafi Bilgi Sistemi
CC:	Canopy Coverage
CCD:	Charge Couple Device
CHM:	Canopy Height Model
CI:	Chlorophyll Index
CMOS:	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CSM:	Canopy Surface Model
CSM:	Crop Surface Model
CVM:	Canopy Volume Model
DCM:	Digital Canopy Model
DEM:	Digital Elevation Model
DN:	Digital Number
DOM:	Digital Orthophoto Map
DSM:	Digital Surface Model
DTM:	Digital Terrain Model
ESC:	Electronic Speed Controller
ExG:	Excess Green Index
FAO:	Food and Agriculture Organization
G%:	Green Percentage Index
GCC:	Green Canopy Cover
GCC:	Green Chromatic Coordinate
GLI:	Green Leaf Index

GNSS: Global Navigation Satellite System
GPS: Global Positioning System
GRRI: Green Red Ratio Index
GRVI: Green-Red Vegetation Index
ICAO: International Civil Aviation Organization
IDW: Inverse Distance Weighting
IMU: Inertial Measurement Unit
İHA: İnsansız Hava Aracı
KN: Kontrol Noktası
LAI: Leaf Area Index
LAIC: Leaf Area Index Calculator
LGO: Leave-Group-Out
LIDAR: Light Detection and Ranging
LNC: Leaf Nitrogen Concentration
LOOCV: Leave-One-Out Cross-Validation
LWA: Leaf-Wall-Area
MGRVI: Modified Green Red Vegetation Index
MPSE: Mean Percent Standard Error
MSAVI: Modified Soil-Adjusted Vegetation Index
MVS: Multi-View Stereo
NATO: North Atlantic Treaty Organization
NDI: Normalized Difference Indices
nDSM: Normalize edilmiş DSM
NDREI: Normalized Difference Red Edge Index
NDVI: Normalized Difference Vegetation Index
NDYI: Normalized Difference Yellowness Index
NGRDI: Normalized Green-Red Difference Index
NIR: Near Infrared
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NRI: Normalized Redness Intensity
OBIA: Object Based Image Analysis
OSAVI: Optimized Soil Adjusted Vegetation Index
PA: Precision Agriculture
PAI: Plant Area Index
PH: Plant Height
PIF: Pseudo-Invariant Features
PNOA: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
QGIS: Quantum GIS
RDVI: Ratio Difference Vegetation Index
REIP: Red-Edge Inflection Point
RF: Random Forest
RFR: Random Forest Regressor
RGB: Red-Green-Blue
RGB-D: Red-Green-Blue-Depth
RGBVI: Red-Green-Blue Vegetation Index
RMSE: Root Mean Square Error
ROI: Region Of Interest
RPAS: Remotely Piloted Aerial Systems
RRMSE: Relative Root Mean Squared Error
RTK: Real Time Kinematic
SAM: Sayısal Arazi Modeli
SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index
SfM: Structure from Motion
S.O.D.A.: Sensor Optimised for Drone Applications
SVR: Super Vector Regressor
SVM: Super Vector Machine
SYM: Sayısal Yükseklik Modeli
SYM: Sayısal Yüzey Modeli

TGI: Triangular Greenness Index

TRV: Tree-Row-Volume

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

UAS: Unmanned Aerial System

VARI: Visible Atmospherically Resistant Index

VI: Vegetation Index

VTOL: Vertical Take-Off and Landing

YKN: Yer Kontrol Noktası

YÖA: Yer Örnekleme Aralığı



GİRİŞ

Tarım insanlar var oldukça önemini kaybetmeyecek bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya nüfusunun her geçen gün artmasına karşın var olan toprakların arttırılamaması geleceğin en önemli problemleri arasında gösterilmektedir. Topraksız tarım gibi alternatif yöntemlerin geliştirilmesine karşın var olan toprak potansiyelini arttırmak, toprağı en verimli şekilde kullanmak esastır. FAO'ya göre, 2050 yılında yaklaşık olarak 10 milyarlık bir nüfusu beslemek için gıdanın üretiminden tüketimine kadarki tüm evrelerin yerel, bölgesel ve küresel çapta radikal bir biçimde değiştirilmesi zorunludur (Anonim, 2022). Bu bağlamda karşımıza "hassas tarım" (Precision Agriculture- PA) kavramı çıkmaktadır. Eskiden basit insan gücü ve ilkel sayılabilecek aletlerle yapılan tarım uygulamaları özellikle de teknolojiye yaşanan çığır açan gelişmeler ışığında günümüzde yerini hassas tarım uygulamalarına bırakmıştır. Tarım ile teknolojiyi harmanlayan bu yenilikçi yaklaşım, tarım alanlarının yönetimini optimum bir şekilde sağlarken, üreticiye düşük maliyet, yüksek gelir ve verim elde etme imkanı sunmaktadır. Sulama, gübreleme ve ilaçlama miktarları hassas tarım ile belirlenebildiği için aynı zamanda çevreci bir yaklaşım olarak da nitelendirilebilmektedir.

İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin kullanımının git gide yaygınlaşması İHA'ların hassas tarım uygulamalarında da yer etmesine olanak sağlamıştır. Özellikle gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan bu sistem ile ölçmeler daha hassas bir şekilde yapıp çeşitli yazılımlar ile değerlendirilerek daha sağlıklı sonuçlar üretilebilmektedir.

Xiang ve Tian (2011), uzaktan algılama sistemlerinin tarımsal uygulamalar için düşük uzaysal ve zamansal çözünürlüğe sahip olduğuna, hava koşullarına bağlı olarak kullanımının sınırlı ve yüksek maliyetli olduğuna; İHA'ların ise bulut örtüsü altında çalışabilme yeteneğine sahip olduğuna, düşük ağırlıkta, hızlı ve tekrar tekrar kullanılabilir olduğuna, pilotlu sistemlere kıyasla daha az maliyetli ve daha güvenilir olduğuna ve elde edilen görüntü çözünürlüğünün çok yüksek olduğuna değinmiştir.

Zhanc ve Kovacs (2012), İHA sistemlerinin bu denli yaygınlaşmasına sebep olarak; yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin maliyetlerinin yüksek olmasına karşın, İHA sistemlerinin düşük işletme maliyetleri, yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlükler

sağlaması, görüntü elde etmede esneklik ve kolaylık sağlamada iyi bir alternatif olması gösterilebilir.

Bu çalışmada, kullanımı giderek yaygınlaşan ancak ülkemizde henüz istenilen düzeyde kullanılmayan İHA'lar ile hassas tarım uygulamaları için kanopi boyu, kanopi alanı gibi yapısal parametrelerden faydalanılarak kanopi hacminin hesaplanması amaçlanmıştır. Yapısal parametreler, bitki sağlığı ve büyümesiyle yakından ilişkilidir ve kanopi yönetimi uygulamaları, fenotipleme, verim tahmini, ilaçlama, biyokütle, bitki alanı indeksi (PAI), yaprak alanı indeksi (LAI) tahmini gibi pek çok çalışmada kullanılmıştır. Bendig ve ark. (2014), çalışmalarında 18 çeşit ve 2 farklı nitrojen uygulamasına tabi tutulmuş arpa bitkisinin RGB İHA görüntülerinden elde ettikleri çok zamanlı ve çok yüksek çözünürlüklü CSM'lerden (Canopy Surface Model) bitki boyunu (PH) kullanarak yaş ve kuru arpa biyokütlesini tahmin etmişlerdir. CSM'lerden elde ettikleri bitki boyu ile yaş ($R^2= 0.81$) ve kuru ($R^2= 0.82$) biyokütle arasında yüksek korelasyon bulmuşlardır. Yaş biyokütle için farklı nitrojen uygulamaları arasındaki biyokütle modellemesi $R^2= 0.71$ ile en iyi sonucu vermiştir.

Pádua ve ark. (2018), çeşitli kanopi yönetimi uygulamalarının yapıldığı üzüm bağında önemli büyüme dönemlerinde elde ettikleri çok zamanlı RGB-İHA görüntülerinden bitki örtüsünde yaşanan değişimleri karakterize etmeye çalışmışlardır. Fotogrametrik veri işleme sonucunda elde ettikleri DSM'den DTM'yi çıkararak CSM elde etmişlerdir. Ayrıca ortomozaik görüntülerden normalize edilmiş yeşil bant değerini hesaplayarak yeşil vejetasyon örtüsünü çıkarmışlardır. Ardından Otsu methoduna göre bir eşik değeri uygulayarak ikili görüntü elde etmişlerdir. CSM'yi h_{min} ve h_{max} değerleri için filtrelemiş, daha sonra kanopi alanı ve hacmini hesaplamışlardır. Sonuçta, asma hacmi düşük hata oranıyla (RMSE= 0.13, yükseklik belirleme için korelasyon katsayısı 0.78) belirlenmiş, asma tespitinde yüksek doğruluk oranıyla (%94.40) başarılı olunmuştur. Bu yöntemin etkili ve operasyonel bir teknik olma potansiyeline sahip olduğu ve kanopi yönetimi operasyonlarından potansiyel olarak faydalanabilecek asma alanlarının tahminine izin verdiği belirtilmiştir.

Wan ve ark. (2019), RGB-multispektral tabanlı İHA'dan farklı nitrojen uygulaması altındaki pirinç mahsulünün tüm büyüme dönemlerindeki görüntülerinden spektral ve yapısal bilgileri füzyonlayarak tahıl verimi tahminini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda kanopi yüksekliği, kanopi kapsamı, bitki indeksleri çıkarılmıştır. Çıkarılan bu

bilgileri kullanarak rastgele orman (RF) tahmin modelleri geliştirmişlerdir. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), NDYI (Normalized Difference Yellowness Index), kanopi boyu ve kanopi kapsamının birleşiminin determinasyon katsayısı (R^2) 0.85 ile tane verimini en iyi şekilde tahmin ettiğı görülmüştür. Çalışma sonunda kanopi spektral ve yapısal bilgilerinin birleştirilmesinin dane verimi doğruluğunu iyileştirebileceğini, ürün büyüme ve gelişme dönemlerini izlemede dinamik bir şekilde kullanılabileceğini, tarımsal açıdan yüksek zamansal ve mekânsal hassas yönetim için fikir sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Caruso ve ark. (2021), çalışmalarında 8 farklı zeytin çeşidi arasındaki geometrik ve spektral kanopi özelliklerindeki farklılıkları, budama hacmini ve NDVI ile verim arasındaki ilişkiyi İHA yardımıyla araştırmışlardır. Sonuçta, İHA'ların hareketten yapıya (Structure from Motion) dayalı olarak kanopi hacmi, kanopi alanı gibi geometrik kanopi özelliklerini tahmin etmede başarılı olduğunu, farklı çeşitler arasındaki verimin erken ayrımını yapmada faydalı olduğunu, budama ve ilaçlama uygulamalarında kullanılabilir olduğunu ve bahçe yönetiminde maliyet ve zaman bakımından avantajlar sağlayabileceğini ortaya koymuşlardır.

Bu gibi çalışmalar “Literatür Araştırmaları” bölümünde daha detaylı bir şekilde irdelenecektir.

1. TEORİK TEMELLER

1.1. İnsansız Hava Aracı Sistemleri

İHA, İngilizce Unmanned Aerial Vehicle/System (UAV/UAS) kelimesinden gelmektedir. İnsansız Hava Aracı/Sistemi olarak dilimizde yer etmiştir.

Fotogrametrik amaçlı ilk İHA uygulaması 1979 yılında, uzaktan elle kontrol edilen Şekil 1’de gösterilen Hegi firmasına ait sabit kanatlı bir uçakla 150 m yüksekten arkeolojik bir alan üzerinde 11 m/sn hızla gerçekleştirilmiştir (Eisenbeiß, 2009).



Şekil 1.1. Fotogrametride ilk İHA uygulamasında kullanılan Hegi firmasına ait araç (Eisenbeiß, 2009)

İHA’lar önce 1. Dünya Savaşında daha sonra da 2. Dünya Savaşında sınırlı olarak askeri amaçlı kullanıma sunulmuştur. ABD ordusu İHA Sistemlerini Vietnam Savaşında ve Çöl Fırtınası Operasyonlarında kullanmışlardır. 2. Dünya Savaşından sonra İHA’lar hobi amaçlı kullanılmak üzere bir pazar haline dönüşmüştür (Canis, 2015).

Özellikle 2000 yılından sonra sivil kullanımı yaygınlaşan İHA’lara bugün sivil, askeri ve bilimsel amaçlar başta olmak üzere pek çok konuda başvurulmaktadır. Günümüzde İHA’ların en çok kullanıldığı alanlar arasında haritacılık, uzaktan algılama, fotogrametri, tarım, emlak, film, fotoğrafçılık, savunma ve güvenlik, afet yönetimi, madencilik, arama – kurtarma, takip ve izleme vb. gösterilebilir.

İHA kelimesinin literatürde pek çok tanımı bulunmaktadır. Federation of American Scientist (2005)’e göre ise İnsansız Hava Aracı tanımı şu şekildedir; “Bir insan operatörü taşımayan, aerodinamik kuvvetleri kullanan, otonom olarak uçabilen veya

uzaktan kumanda edilebilen, harcanabilir, ölümcül veya öldürücü olmayan bir yük taşıyabilen motorlu hava aracıdır.”

ICAO (2011)’ya göre İnsansız Hava Aracı Sistemleri (UAS) ise; “Uçakta pilot olmadan işletilen bir hava aracı ve ilgili unsurları” olarak açıklanmıştır. Yine ICAO, İnsansız Hava Aracı Sistemlerinin bir parçası olarak Uzaktan Pilotlu Hava Sistemleri (Remotely Piloted Aerial Systems- RPAS) kavramını tanıtmıştır. ICAO (2011)’ya göre bu kavram, “Uçuş operasyonu sırasında herhangi bir noktada, uzaktan kumanda edilen bir hava aracı, ilgili uzak pilot istasyonu/istasyonları, gerekli komuta ve kontrol bağlantıları ve gerekli olabilecek diğer sistem öğelerinden oluşan bir dizi yapılandırılabilir öğe” anlamına gelmektedir.

İHA’ların en bilinen kullanımlarından birisi de drone (erkek arı) kelimesidir. Bu kelimenin kökeni, 2. Dünya Savaşından önceye dayanmaktadır. İngiliz Kraliyet Donanması insansız hedef uçaklarına (Unmanned Target Aircraft) “kraliçe arı” adını vermiştir, buna karşılık ABD Donanması da hedefleri için hiçbir iş yapmayan erkek arı anlamına gelen “drone” kelimesini kullanmıştır (Nicas, 2014).

Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü’nün hazırladığı Sivil Havacılık Talimatı (2016)’na göre İHA, “İnsansız Hava Aracı Sistemi’nin bir bileşeni olarak işletilen, aerodinamik kuvvetler aracılığıyla sürekli uçuş yapma yeteneğinde olan, üzerinde pilot bulunmaksızın uzaktan İHA pilotu tarafından kontrol edilerek veya otonom operasyonu İHA pilotu tarafından planlanarak uçurulan ya da havada kalabilen hava aracı” olarak tanımlanmıştır.

Torun (2017)’a göre ise İHA; “Pilotsuz hava aracı sistemi, uzaktan pilotaj kontrol sistemi ve bu ikisi arasında komuta-kontrol iletişim ortamı olmak üzere üç temel bileşenden oluşan entegre sistemler bütünüdür.”

1.2. İHA’ların Sınıflandırılması

İHA’ların kullanımının ve kullanım alanlarının artmasıyla birçok İHA çeşidi ortaya çıkmıştır. İHA’lar kullanım amaçları, ağırlıkları, kanat sayısı vb. gibi bir çok başlık altında sınıflandırılabilir. İHA’lar kullanım amaçlarına göre sivil (hobi, lojistik, bilimsel araştırmalar vb.) ve askeri (çatışma, keşif, yem vb.) olmak üzere 2 grupta incelenmektedir.

NATO (2009)'ya göre İHA'lar ağırlıklarına göre 3 grupta sınıflandırılmıştır. 1. Sınıfta ağırlığı 150 kg'dan küçük olan İHA'lar, 2. Sınıfta ağırlığı 150 ile 600 kg arasında olan İHA'lar, 3. Sınıfta ise ağırlığı 600 kg'dan büyük olan İHA'lar bulunmaktadır. Tablo 1.1'de gösterildiği gibi bu sınıflar kendi içlerinde yine alt kategorilere ayrılmıştır.

Tablo 1.1. NATO'ya göre insansız hava araçlarının sınıflandırması (NATO, 2009)

Class	Category	Normal employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius	Primary Supported Commander	Example platform
CLASS I (less than 150 kg)	SMALL >20 KG	Tactical Unit (employs launch system)	Up to 5K ft AGL	50 km (LOS)	BN/Regt, BG	Hermes 90 Luna
	MINI 2-20 kg	Tactical Sub-unit (manual launch)	Up to 3K ft AGL	25 km (LOS)	Coy/Sqn	Aladin DH3 DRAC Eagle Raven Scan Skylark Strix T-Hawk
	MICRO <2 kg	Tactical PI, Sect, Individual (single operator)	Up to 200 ft AGL	5 km (LOS)	PI, Sect	Black Widow
CLASS II (150 kg to 600 kg)	TACTICAL	Tactical Formation	Up to 10,000 ft AGL	200 km (LOS)	Bde Comd	Aerostar Hermes 450 iView 250 Ranger Sperwer
CLASS III (more than 600 kg)	Strike/ Combat	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theater COM	
	HALE	Strategic/National	Up to 65,000 ft	Unlimited (BLOS)	Theater COM	Global Hawk
	MALE	Operational/theater	Up to 45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)	JTF COM	Predator B Predator A Harfang Heron Heron TP Hermes 900

Korchenko ve Illyash (2013), İHA'ları kullanım alanına (sivil/askeri), kontrol sisteminin tipine, uçuş kurallarına, hava sahası sınıflandırılmasına, hava aracının tipine, kanat tipine (sabit/döner kanatlı), kalkış-iniş yönüne, kalkış-iniş türüne, motor tipine (motorlu/motorsuz), yakıt sistemine, yakıt tankı türüne, yakıt sisteminden istifade sayısına göre, genel kategorize (ağırlık ve maksimum uçuş yüksekliğine göre), uçuş yarıçapına, uçuş irtifasına ve fonksiyonlarına göre 16 grupta sınıflandırmıştır.

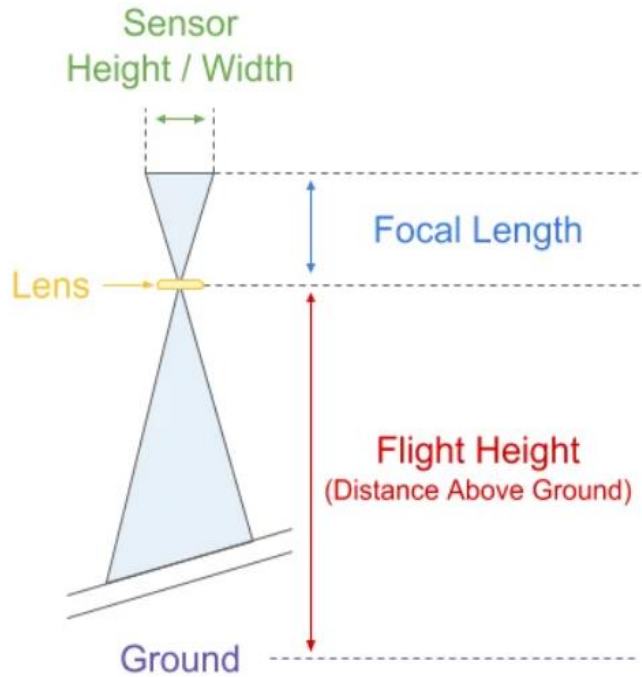
İnsansız Hava Aracı Sistemlerinin Tescil, Operasyon, Seyrüsefer, Bakım ve Uçuşa Elverişlilik Usul ve Esaslarına İlişkin Talimat (2016)'ın 2. Bölüm 5. Maddesine göre ise İHA'lar azami kalkış ağırlıkları baz alınarak 4 sınıfa (İHA0 (500 gr – 4 kg aralığında), İHA1 (4 kg dahil – 25 kg aralığında), İHA2 (25 kg dahil – 150 kg aralığında), İHA3 (150 kg dahil ve üstü)) ayrılmıştır.

1.3. Uçuş Planlaması ve Parametreleri

Uçuş planı hazırlanırken uçuş yüksekliğini en iyi şekilde belirlemek şarttır. Kullanılacak kameranın hangi yükseklikten kaç cm Yer Örnekleme Aralığında (YÖA) görüntü aldığı ve projenin ne kadar konumsal çözünürlüğe sahip dataya gereksinimi olduğunun tespiti çalışmada elde edilecek sonuç ürünler açısından oldukça önemlidir (Şen, 2018). Yer örnekleme aralığını iki ardışık pikselin merkezleri arasındaki mesafe olarak tanımlamak mümkündür. Daha kolay bir ifadeyle, yerdeki bir pikselin boyutu da denilebilir. Yer örnekleme aralığını hesaplayabilmek için çeşitli parametrelerin bilinmesi şarttır (Şekil 1.2). Bir piksel zemine yansıtıldığında tam bir kare şeklinde olmaz, bu yüzden aşağıdaki eşitliklerle (1) iki farklı hesaplama yapılır ve bu hesaplamalardan elde edilen en büyük (en kötü) değer yer örnekleme aralığı değeri olarak alınır (Anonim, 2021). Ayrıca bu değeri hesaplamak için çeşitli programlar da kullanılabilir.

$$YÖA_H = \frac{\text{uçuş yüksekliği} \times \text{sensör yüksekliği}}{\text{odak uzaklığı} \times \text{görüntü yüksekliği}} \quad (1)$$

$$YÖA_w = \frac{\text{uçuş yüksekliği} \times \text{sensör genişliği}}{\text{odak uzaklığı} \times \text{görüntü genişliği}}$$



Şekil 1.2. Yer örnekleme aralığının hesaplamasında kullanılan parametreler (Anonim, 2021)

Uçuş güzergahını belirlemek için gerekli olan diğer parametreler ise şunlardır (Eisenbeiß, 2009);

Görüntü ölçek faktörü (m_b), yer seviyesinden uçuş yüksekliği (H_g) ve kamera sisteminin odak uzaklığı (f) dikkate alınarak eşitlik (2)'deki gibi hesaplanabilir:

$$m_b = \frac{H_g}{f} \quad (2)$$

Bir görüntü çerçevesinin zemin kapladığı uzunluk (S), görüntü çerçevesinin bir kenarının uzunluğu (S'), uçuş yüksekliği ve kameranın odak uzaklığı baz alınarak eşitlik (3)'teki gibi bulunur:

$$S = \frac{S' \times H_g}{f} \quad (3)$$

%p boyuna bindirme oranıyla çekilen komşu iki görüntü merkezi arasındaki baz uzunluğunun gerçek karşılığı (B) eşitlik (4) yardımıyla hesaplanır:

$$B = S \times \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (4)$$

%q enine bindirmeli olarak çekilen görüntüde iki komşu uçuş hattı arasındaki mesafe (A) eşitlik (5) ile bulunur:

$$A = S \times \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (5)$$

Model alanının zeminde kapladığı alan (F_m) ise eşitlik (6) ile hesaplanabilir:

$$F_m = S^2 - S \times B \quad (6)$$

Kameranın ne kadar sürede (t) bir fotoğraf çekeceği ise baz uzunluğunun (B) hava aracının hızına (v) bölünmesiyle elde edilebilir.

$$t = \frac{B}{v} \quad (7)$$

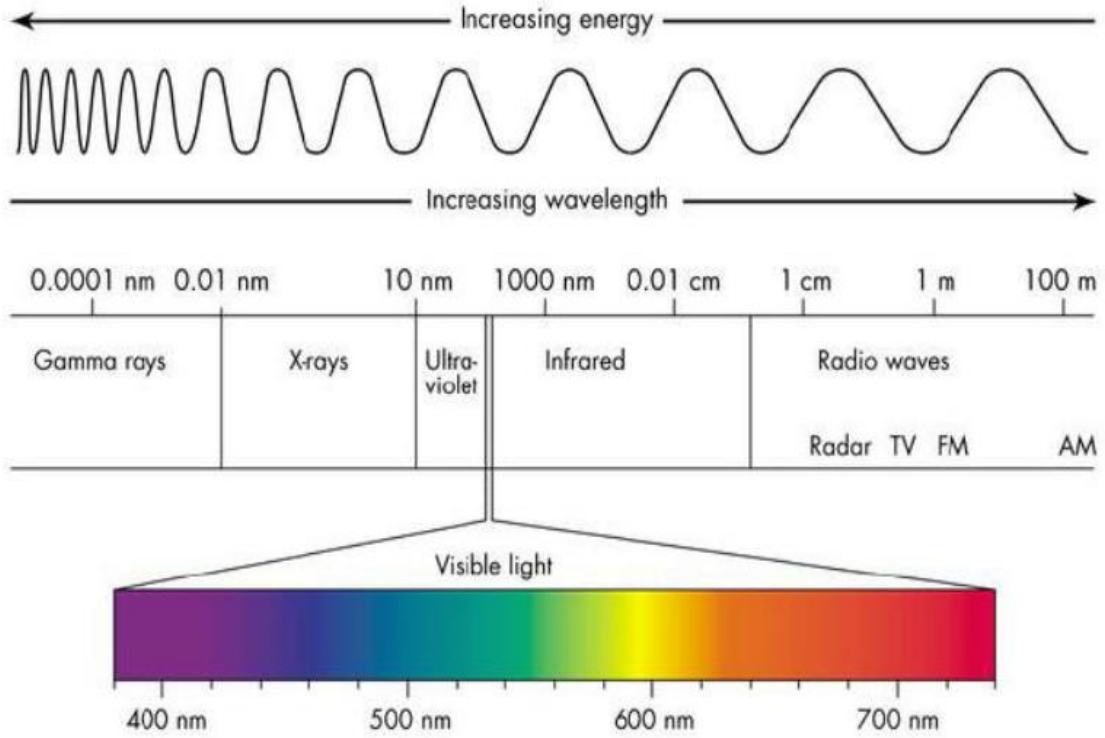
İHA'lar ile gerçekleştirilen uçuşlar otonom ya da pilot kontrolünde yapılabilir. Otonom olarak gerçekleştirilen uçuşlarda çalışmada istenilen çözünürlüğe göre topoğrafya göz önüne alınarak bir uçuş planı hazırlanır, uygulanacak bindirme oranları belirlenir. Yer kontrol noktaları tesis edilecek ise bunların da sayısı ve dağılımı plana göre yapılır. Bu noktaların homojen bir şekilde alana dağıtılması elde edilecek fotogrametrik ürünlerin doğruluğunu bizzat etkilemektedir.

İHA'ların sahip oldukları GPS/IMU sistemleri sayesinde görüntü koordinatlarını belirlemek ve görüntüleri çekerken meydana gelen dönüklükleri saptamak mümkündür. Yer Kontrol Noktaları (YKN) ile görüntü koordinatlarının gerçek jeodezik koordinatlara karşılık gelmesi sağlanmaktadır. Kapıcıoğlu ve ark. (2018), yaptıkları çalışma sonucunda YKN'lerin sayısından çok dağılımının fotogrametrik ürünlerin doğruluğunu etkilediğini, özellikle de YKN'lerin topoğrafik yapıda en çok değişimin gözlemlendiği yerlere yeleştirilmesinin konum doğruluğunu en üst düzeye çıkardığını belirtmişlerdir. Fotogrametrik ürünlerin doğruluğunu hava durumu, uçuş planı, YKN'lerin sayısı ve dağılımı, kamera özellikleri ve kullanılacak SfM algoritmaları gibi bir çok faktör etkilemektedir. İHA'lar ile cm düzeyinde hassasiyetle sonuçlar üretebilmek mümkündür.

1.4. İHA Sensörleri ve Özellikleri

İHA'lar 1) ana gövdeyi oluşturan iskelet, kanat, pervane, motor ve batarya, 2) kontrol birimini oluşturan elektronik algılayıcılar, haberleşme elektroniği, GNSS (Global Navigation Satellite System) ve 3) sensör, kamera vb. algılayıcılar ile İHA planlama, uçuş ve yönetimi amaçlı haberleşme, yazılım ve donanım gibi 3 temel bileşenden meydana gelmektedir (Torun, 2017). İHA sistemleri ilaç tankı, batarya, dijital/video kamera, gimbal, pervane kilidi gibi çeşitli bileşenlerle donatılmıştır. Bu bileşenlere “faydalı yük” denilmektedir. Faydalı yük ağırlığı sınırlı olduğu için yapılacak çalışmanın kapsamı ve amacına yönelik olarak bu bileşenler seçilip entegre bir şekilde kullanılabilirler.

İHA'larda kullanılan kamera sistemleri RGB (red, green blue), multispektral, termal ve hiperspektral ve LIDAR özellikte olabilirler. RGB kameralar ile insan gözünün algılayabildiği dalga boylarında (400-700 nm) görüntüler elde edilmektedir (Şekil 1.3). RGB sensörleri, çalışma alanının sadece görselleştirilmesini sağlamaz; yaprak rengi, bitki boyu, kanopi örtüsü ve 3 boyutlu bitki yapısı gibi nokta bulutu verilerinden bitki gelişimini etkileyen özelliklerin değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır (Colwell ve diğerleri, 2021). RGB kameralar diğer kamera sistemlerine göre oldukça ucuz ve verilerinin işlenmesi kolay olduğu için literatürde bir çok çalışmada kullanılmıştır.



Şekil 1.3. Elektromanyetik spektrum bölgeleri (Baier, 2012)

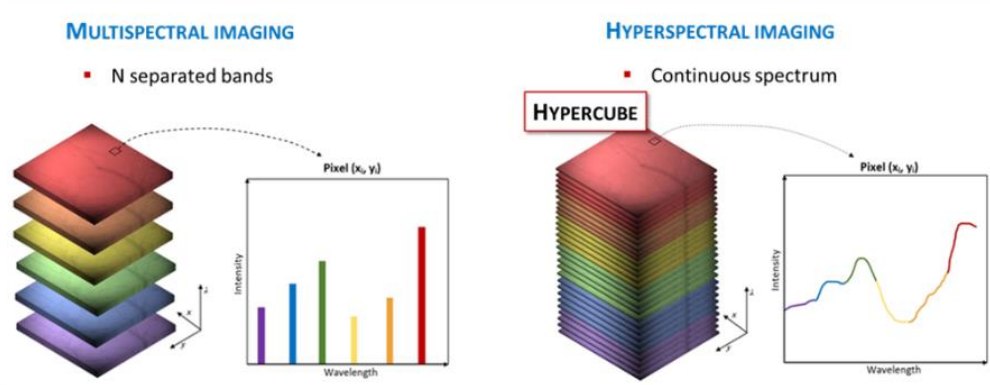
Multispektral kameralar (Şekil 1.4) ise kırmızı, mavi, yeşil, kırmızı kenar (red edge), yakın kızıl ötesi (NIR) gibi çeşitli bantlarda aynı anda görüntü alabilmektedir. Özellikle NDVI analizinde sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 1.4. MicaSense firmasına ait RedEdge-P multispektral kamera (Anonim, 2014)

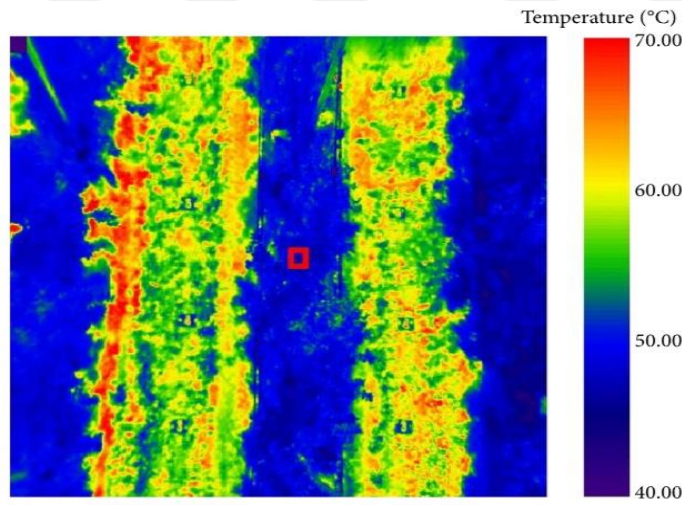
Hiperspektral kameralar ise multispektral kameralardan çok daha fazla banda sahiptir, ultra yüksek çözünürlükte çok daha fazla bilgi sağlamaktadır (Singhal ve diğerleri, 2018). Nesne yüzeylerinden yansıyan enerjiyi dar ve bitişik birçok dalga boyunda ölçtüğü için veri küpü yada hiperküp (Şekil 1.5) olarak da nitelendirilebilirler. Bu

yüzden elde edilen verileri işleme diğer kamera sistemlerine göre çok daha zordur, ayrıca bu tür kameralar oldukça pahalıdır.



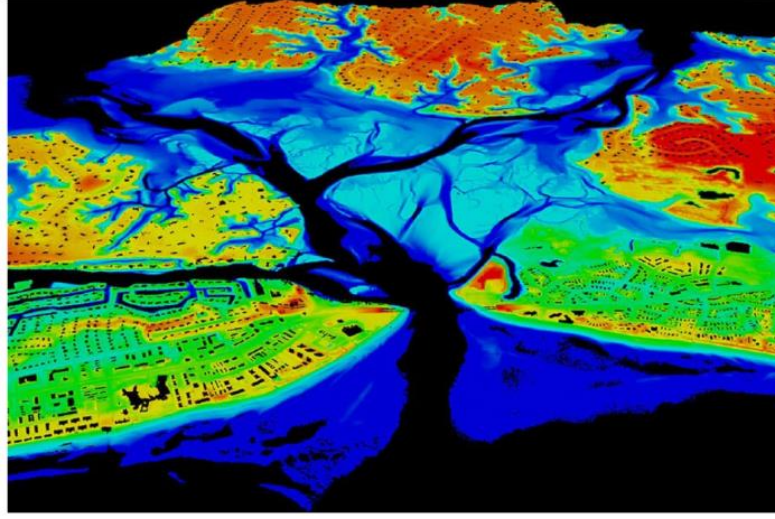
Şekil 1.5. Multispektral ve hiperspektral görüntülemenin karşılaştırılması (Anonim, 2018)

Termal kameralar ise adından da anlaşılacağı üzere, kızılötesi aralıkta yayılan termal enerjiyi yani ısıyı algılar. Termal kameraların literatürde özellikle bitki su stresi tespitinde kullanıldığı görülmüştür (Şekil 1.6).



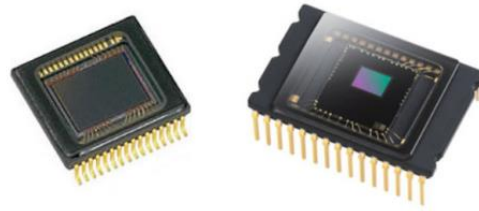
Şekil 1.6. Han ve ark. (2021) tarafından İHA ile çekilen meyve ağaçlarının termal görüntüsü

National Oceanic and Atmospheric Administration (2021)'a göre LIDAR (Light Detection and Ranging), nesnenin dünyaya olan değişken mesafelerini ölçmek için darbeli lazer biçiminde ışık kullanan bir uzaktan algılama yöntemi olup dünyanın şekli ve yüzey özellikleri hakkında kesin, üç boyutlu bilgiler üretir (Şekil 1.7). Temel bir Lidar, özel bir GPS alıcısı, lazer ve tarayıcıdan meydana gelmektedir. Havasal ve karasal Lidar olmak üzere 2 kısımda incelemek mümkündür.



Şekil 1.7. Lynnhaven Inlet, Virginia'ya ait lidar haritası (Anonim, 2021)

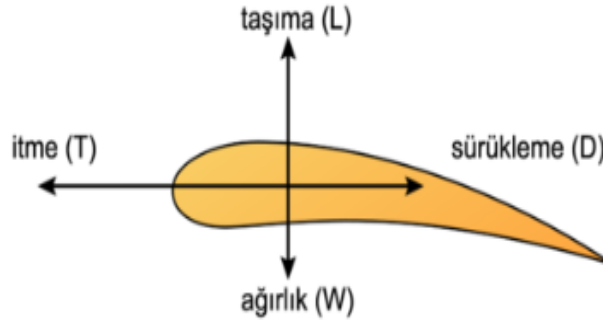
Piksellerden ve bu piksellerin renk değerlerinden oluşan sayısal bilgilerin tümü dijital (sayısal) resim olarak adlandırılır. Kamera sistemlerindeki sensör yapısı fotocell ve mikrochipten meydana gelir. Platforma düşen ışık ışınları pikselleri oluşturan fotosel hücrelerin elektrik enerjisi üretmesini sağlar ve ardından bunu mikrochipe aktarır. Mikrochip gelen bu enerji ile her piksel için sayısal bir değer üretir ve bu değerleri harddiske iletir. Böylece dijital resim elde edilmiş olur. Dijital resim elde etme işlemleri CCD (Charge Couple Device) ve CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor) algılayıcıları (Şekil 1.8) tarafından yapılmaktadır (Ergün, 2010). Her iki sensör de ışığı yakalar ve elektrik sinyallerine dönüştürür.



Şekil 1.8. CCD (sol) ve CMOS (sağ) sensörleri örneği (Anonim, 2021)

1.5. İHA Aerodinamiği ve Mekanikliği

Aerodinamik temel olarak, bir hava aracının uçuş süresi boyunca hava aracına etkiyen kuvvetlere karşı gösterdiği tepki olarak adlandırılabilir. Bir hava aracı uçuşunu 4 temel kuvvet etkisinde sürdürür. Bu kuvvetler taşıma (lift), drag (sürüklenme), thrust (itme) ve weight (ağırlık) (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Bir hava aracına etkiyen kuvvetler (Anonim, 2021)

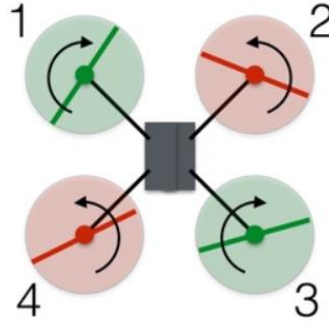
İHA'ları genel olarak sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere 2 başlıkta inceleyebiliriz. Sabit kanatlı İHA'lar havada asılı kalamazlar, dikey bir şekilde iniş kalkış yapamadıkları için piste ihtiyaçları vardır. Ancak havada kalma süresi ve taşıyacağı yük kapasitesi bakımından oldukça avantajlıdır. Döner kanatlı İHA sistemlerinin ise en önemli avantajları havada asılı kalabilmeleridir. Çok rotorlu İHA'ların en önemli dezavantajı ise taşıyabilecekleri faydalı yük miktarının sınırlı olması ve havada kalma sürelerinin kısa olmasıdır (Tablo 1.2) (Çakıcı & Shabani, 2016).

Tablo 1.2. Çeşitli İHA platformlarının karşılaştırılması (Çakıcı & Shabani, 2016)

Kabiliyet (+:iyi, o:nötr, -:kötü)	İHA Platform Tipi			
	Çok-rotorlu 	Helikopter 	Uçak 	Döner Kanat Hibrit 
VTOL	+	+	-	+
Havada asılı kalma	+	+	-	+
Düz uçuş	-	-	+	+
Mod değiştirme	-	-	-	+
Havada kalma süresi	-	-	+	o
Uçuş mesafesi	-	-	+	+
Faydalı yük kapasitesi	-	o	+	o

Multikopterler pervane sayılarına göre bu sayının latince karşılığı kullanılarak adlandırılır. Örneğin 4 kanatlı bir multikopter quadcopter, altı kanatlı bir multikopter ise hexacopter olarak adlandırılmaktadır. Örneğin 4 kanatlı bir multikopterde 2 kanattaki motor saat yönünde (Şekil 1.10, 1-3), diğer iki motor da saat yönünün tersinde (Şekil

1.10, 2-4) aynı hızda dönerler. Böylece tork ve momentum sıfır değerine eşit olur ve İHA dengelenmiş olup havada kalır. İHA'lar temel olarak 3 eksende hareketlerini gerçekleştirirler. Bunlar pitch, roll ve yaw eksenleridir. Roll (yuvarlama) ile İHA sağa ve sola hareket eder. Pitch (yunuslama) ile ileri ve geri yönde hareketini sağlar. Yaw (sapma) ile de kendi eksenini etrafında dönüş hareketini yapar.



Şekil 1.10. Quadcopter motorları dönüş yönleri (Allain, 2017)

İHA uçuşlarındaki en önemli bileşenlerden biri de uçuş kontrol kartıdır. Uçuş kontrol kartı üzerinde jiroskop -İHA'nın 3 ekseninde dönüş hızını ölçmeye yarar-, accelerometer (ivmeölçer), barometre, manyetometre, ultrasonik sensör ve GPS, IMU (eylemsizlik hesaplama ünitesi) gibi sensörler bulunur. Bu sensörler ile uçuş kontrol kartı sürekli iletişim halinde olup, uçuş kontrol kartı bu sensörlerden elde ettiği bilgiler ve telemetri bilgileri sayesinde İHA'nın hareket etmesini sağlar. Bu bağlamda İHA sistemlerini temel olarak “gövde, uçuş kontrolcüsü (Şekil 1.11), elektronik hız kontrolcüsü (ESC), pervane, motor, batarya, gimbal, kumanda sistemi ve sensör/algılayıcılardan meydana gelen bir sistemler bütünü” olarak adlandırmak mümkündür.

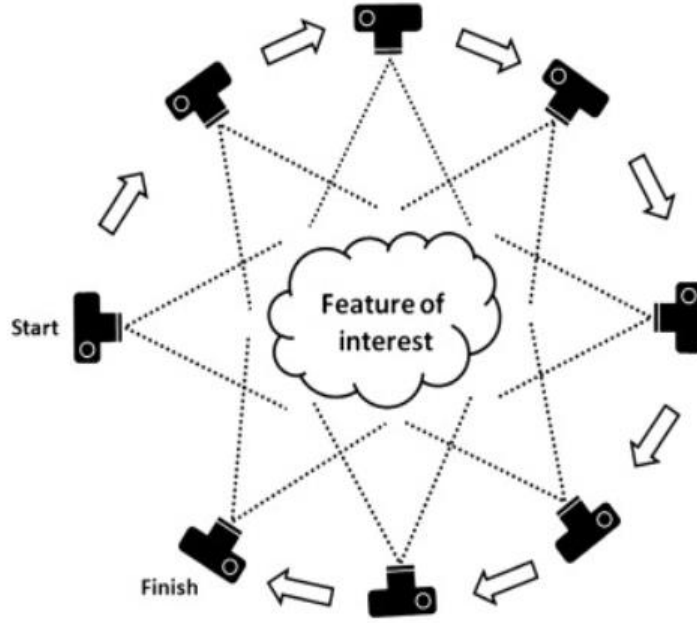


Şekil 1.11. DJI firmasına ait bir uçuş kontrolcüsü (Anonim, 2022)

1.6. Structure From Motion Tekniği

Structure from Motion yani “Hareketten Yapı” tekniği, 2 boyutlu görüntülerden 3 boyutlu sonuç ürünler üretmeye yarayan, hareket halindeki bir sensörden fotogrametriye uzanan bir yaklaşım olarak tanımlanabilir (Şekil 1.12). SfM, uçak, İHA, VTOL gibi platformlardan belirli bir enine/boyuna bindirme oranı ile farklı açı ve konumlardan çekilen görüntülerde ortak noktaları eşleştirir. Bu eşleşen özelliklerin konumlarını ise fotoğraf çekim aşamasındaki kamera ve sahne geometrisini doğru olarak tahmin etmek için kullanır. Eşleşen özelliklere dayalı olarak bir demet-blok ayarlaması yaparak kamera konumu ve sahne geometrisini eş zamanlı ve otomatik olarak çözer. Teknik, bu özellikleri görüntüden görüntüye izler, kameranın konumunun ve nesne koordinatlarının kabaca ilk tahminlerini yapar ve veritabanından birden fazla çözüm elde edildiği için bunları doğrusal olmayan en küçük kareler minimizasyonu ile tekrarlamalı olarak iyileştirir (Snavely, 2008).

Westoby ve ark. (2012)’a göre bu teknikte, tek bir stereo çifti yerine, özellik çıkarma ve 3 boyutlu yeniden yapılandırma algoritmalarına girdi olması amacıyla birden fazla ve örtüşen fotoğraf gereklidir. Klasik fotogrametride kamera konumu, yer kontrol noktaları tarafından sağlanan ölçek ve yöneltmelerden bulunur ancak SfM tekniği bundan yoksundur. Bu teknikte 3 boyutlu nokta bulutları, gerçek dünya 'nesne-uzay' koordinat sistemine hizalanması gereken görel bir 'görüntü-uzay' koordinat sisteminde üretilir. SfM koordinatlarının mutlak bir koordinat sistemine dönüştürülmesi için nesne-uzay koordinat sisteminde bilinen yer kontrol noktalarına dayalı olarak bir 3D benzerlik dönüşümü yapılmalıdır. Bu noktalar hem nokta bulutunda hem de sahada belirgin bir şekilde görülmelidir. Koordinatları ise zemin etüdüyle elde edilerek post-hoc türetilir. Fakat pratikte, sahada görüntüleri elde etmeden önce yüksek kontrastta ve açıkça tanımlanmış bir merkez noktasına sahip hedef noktalarının yerleştirilmesi daha kolaydır. SfM rekonstrüksiyonunda doğrusal olmayan yapısal hataların değerlendirilmesini, sahada güvenilir ve homojen dağıtılmış bir hedef ağı oluşturulmasını sağlar.



Şekil 1.12. Westoby ve ark. (2012)'a göre hareketten yapı tekniğinin gösterimi

Carrivick ve ark. (2016) hareketten yapı tekniğinde, standart kompakt kameralardan ve YKN ağından alınan görüntüler yardımıyla hiper ölçekli yer biçimi modellerinin elde edildiğini, bu yöntemin zamansal frekansla sınırlı olmadığı için diğer yöntemlere kıyasla üretilen nokta bulutu verilerinin çok düşük maliyetlerle yüksek doğruluk ve yoğunluk sağladığını, topografyayı eşsiz ayrıntılarla karakterize ettiğini ve çok zamanlı görüntülerle yükseklik, konum ve hacimsel değişimleri tespit etmeyi sağlayan eşsiz bir teknik olduğunu belirtmişlerdir.

Seren ve Demirel (2016), bu teknikteki amacın yeniden oluşturmaya dayandığını belirterek, bu tekniğin haritalamadan çok 3D görselleştirme için kullanıldığını bildirmişlerdir.

Iglhaut ve ark. (2019) hareketten yapının, çoklu görünüm stereo algoritmaları (Multi-view Stereo Algorithms) ile birleştirildiğini (SfM-MVS), fakat genellikle SfM şeklinde kısaltılarak kullanıldığını ve geleneksel stereofotogrametrinin aksine kamera konumu, oryantasyonu, kamera kalibrasyonu ve incelenen referans noktaları hakkında ön bilgilere ihtiyaç duyulmaksızın 3D bilginin üst üste binen görüntülerden hesaplandığını, böylelikle bu tekniğin, hem havasal hem de karasal uygulamalarda maliyeti düşük platformların kullanılmasına izin verdiğini bildirmişlerdir.

Sefercik ve ark. (2020), SfM'nin iki boyutlu görüntü dizilerinin birleşiminden üç boyutlu yapıları kestirebilmek için geliştirildiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada

İHA kullanarak elde ettikleri görüntüleri Agisoft, Pix4D ve VisualSFM yazılımlarını kullanarak işlemiş, 3 boyutlu dijital yüzey modelleri üretmiş, Agisoft'ta ürettikleri modeli baz alarak ürettikleri yüzey modellerini istatistiksel ve görsel yaklaşımlarla karşılaştırmışlardır. Kullandıkları yazılımların temelde aynı prensipte (hareketten yapı tekniği ile) çalıştığını ancak kullanıcıdan bağımsız olarak bir takım gömülü parametreler içerdiği için yazılımlar tarafından üretilen sonuç ürünlerin farklı özellikler ve distorsiyonlar içerdiğine vurgu yapmışlardır.

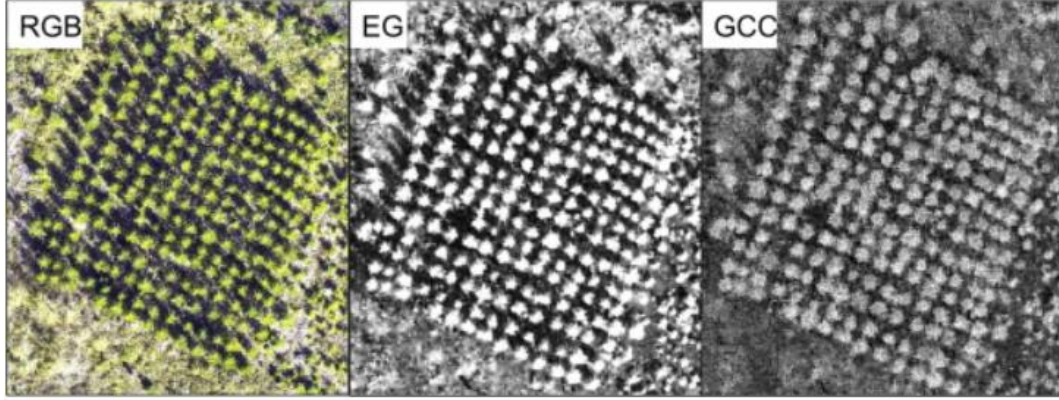


2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Woebbecke ve ark. (1995), çalışmalarında bitkiyi toprak ve diğer bitki olmayan arka kısımlardan ayırt etmek için RGB tabanlı indeksleri incelemişlerdir. İnceledikleri indekslerden Değiştirilmiş Renk Tonu, Aşırı Yeşil İndeks ve Yeşil Kromatik Koordinat (Green Chromatic Coordinate) indekslerinin bitkiyi bitki olmayan arka plandan ayırt etmede daha başarılı olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca bu indekslerin hem gölge hem de aydınlık koşullarda iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Gitelson ve ark. (2002) çalışmalarında buğdayda bitki örtüsü fraksiyonunu nicel olarak tahmin etmek için spektrumun yalnızca görünür bölgesini kullanmayı önermişlerdir. Kırmızı ve yeşil bantları yeni indeksler geliştirmek amacıyla kullanmışlardır. Visible Atmospherically Resistant Index (VARI) bulunmuş, atmosferik etkilere minimum düzeyde duyarlı olacak şekilde %10'dan daha az bir hatayla bitki örtüsü fraksiyonunu tahmin etmişlerdir. Önerdikleri bitki indekslerin orta ve yüksek bitki örtüsü fraksiyonu değerlerine duyarlılığını NDVI'dan çok daha yüksek olarak bulmuşlardır. Ayrıca önerdikleri bitki indekslerinin NDVI, ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) gibi bilinen indeksler için tamamlayıcı rol üstleneceğini bildirmişlerdir.

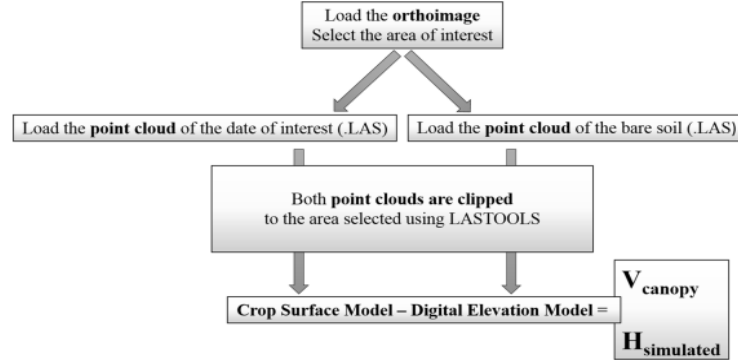
Reid ve ark. (2016), çalışmalarında çam ağaçlarının sağlık metriklerindeki farklılıkları değerlendirmek amacıyla farklı renk indeksleri kullanmanın fizibilitesini test etmişlerdir. Bu bağlamda, Aşırı Yeşillik (Excess Greenness- EG) ve Yeşil Kromatik Koordinat indeksini (GCC) hesaplamışlardır (Şekil 2.1). Hava aracından aldıkları görüntülerden hesapladıkları indeksleri zemin bazlı ölçümler ile kıyaslamış, bu indekslerin zemin bazlı ölçümler ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Bu indekslerin araştırma projelerinde meşcere sağlığını kontrol altında tutmak için eşik değeri belirlemede kullanılabileceğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.13. Reid ve ark. (2016)'nın hesapladığı EG ve GCC renk indeksleri gösterimi

Ballesteros ve ark. (2018), yüksek çözünürlüklü RGB tabanlı İHA kullanarak farklı büyüme aşamalarındaki soğan biyokütlesini tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu amaçları doğrultusunda yeşil kanopi örtüsü (Green Canopy Cover- GCC), kanopi hacmi (V_{canopy}), mahsul yüksekliği (H_{crop}), nokta bulutu verisinden türetilen yükseklik ($H_{simulated}$), kuru yaprak biyokütlesi ve kuru soğan biyokütlesi gibi değişkenleri incelemişlerdir. Farklı zamanlarda İHA'dan elde ettikleri görüntüleri Agisoft programında işleyerek 3D nokta bulutu, DEM (Digital Elevation Model), ortomozaik gibi dijital ürünler elde etmişlerdir. Ayrıca GCC'yi belirlemek için Leaf Area Index Calculation (LAIC) yazılımını kullanmışlardır. MATLAB'da geliştirdikleri VOL-LAIC yazılımı ile kanopi hacmini ve yüksekliğini belirlemişlerdir (Şekil 2.2). Bu yazılımı toprağın kolaylıkla ayırt edilebileceği bir yer için uygulamışlardır. Tohumlamadan hemen sonra çıplak toprak üzerinde uçuş gerçekleştirerek DEM elde etmişlerdir. Diğer uçuşların ardından CSM elde edilmiş, maksimum, ortalama ve medyum kanopi yüksekliği ve kanopi hacmini karşılaştırmışlardır. Hacim, seçilen alan için CSM ve DEM arasındaki ortalama fark olarak belirlenmiştir. Yükseklik değerleri ise her piksel için CSM ve DEM arasındaki fark olarak hesaplanmıştır. Ardından ortalama, maksimum, minimum ve yükseklik frekans histogramları elde edilmiştir. Pearson's korelasyon analizi sonucunda kanopi hacmi ile kuru soğan biyokütlesi arasında güçlü ilişkiler bulmuşlardır. Kuru yaprak biyokütlesini en iyi tahmin eden $H_{simulated}$ (0.76) ve V_{canopy} (0.74) olduğunu görmüşlerdir. Kuru soğan biyokütlesini ise en iyi tahmin eden değişkenin $R^2_{adj} = 0.95$ ile V_{canopy} olduğu sonucuna varmışlardır. Gerçek zamanlı biyokütle tahmininin yabancı ot tespiti ya da çeşitli mantar enfeksiyonları hakkında bilgi sağlayabileceği gerçeği üzerinde durmuşlardır. İHA'ların yüksek uzaysal ve

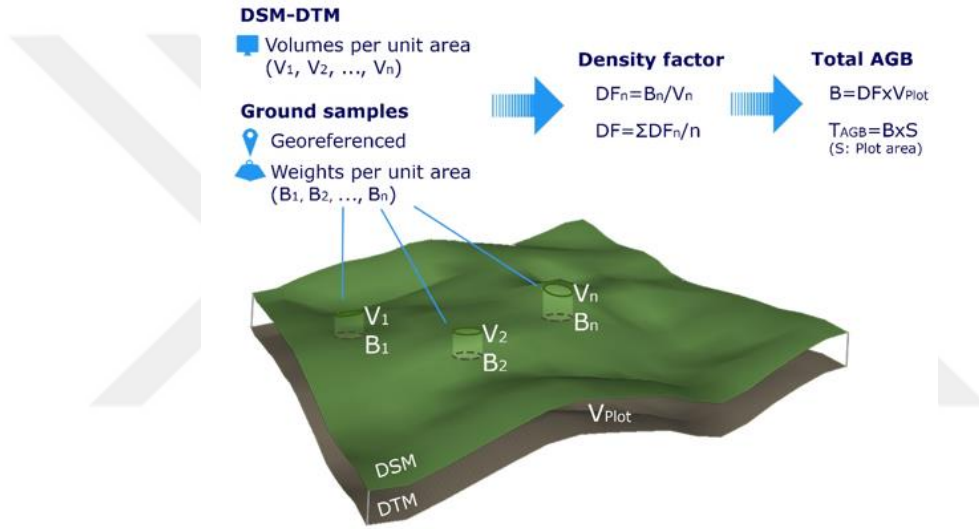
zamansal çözünürlüğe sahip olduğundan biyokütle belirlemede diğer sensör ve platformlara iyi bir alternatif olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.2. VOL-LAIC ile $H_{simulated}$ ve V_{canopy} elde etme adımları (Ballesteros ve ark., 2018)

Gil-Docampo ve ark. (2018), geleneksel optik kameralar ve SFM fotogrametrisinden faydalanarak otsu mahsul biyokütlesinin tahmini için yarı otomatik bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşım DTM ile DSM arasındaki farka göre hacmin belirlenmesi mantığına dayanmaktadır. Önerdikleri yaklaşımda, tarla boyunca bitki yoğunluğunun eşit şekilde dağıldığı varsayılmıştır. Tarladan alınan örneğin ağırlığını her bir örnekleme noktasındaki bitki örtüsü hacmi ile ilişkilendiren bir yoğunluk faktörü tanımlamışlardır, böylece AGB (Above Ground Biomass) ile hacim arasındaki ilişki tüm tarla boyunca kolayca genelleştirilebilir olmuştur. Çalışmalarında kullandıkları LIDAR tabanlı DTM'yi Ulusal Hava Ortofotografçılığı Planı'ndan (PNOA- Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) elde etmişlerdir. Mahsul örnekleme için basit rastgele örnekleme uygulanmış ve her uçuştan hemen sonra örnekler toplanmıştır. Her numune noktası için yüzey alanı ($0.25 m^2$) bilinen bir halka atılmış ve halka içindeki bitkilerin toprak üstü kısımları hasat edilmiştir. Kökleri kırılmış ve taze biyokütle ölçümü elde etmek için numuneler aynı gün temizlenmiş ve ayrı olarak tartılmıştır. Numuneler $70 ^\circ C$ 'de 5 gün kurutulduktan sonra her numune ayrı ayrı tartılarak kuru biyokütle değerleri elde edilmiştir. Çalışma kapsamında VTOL ve sabit kanatlı İHA olmak üzere 2 farklı platform kullanılarak çok yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmiştir. Ayrıca her uçuş için arazi modelleri üretmek amacıyla farklı sayıda yer kontrol noktaları kullanılmıştır. DSM ve DTM modelleri arasında bir z-koordinat düzenlemesi yapılmıştır. Böylece hem DSM'de hem de DTM'de bitki örtüsü olmayan 30 homolog

nokta tanımlanmıştır. ZDSM ve ZDTM arasındaki farkın ortalama değeri, DSM'nin z-koordinatını düzeltmek ve hassas bağlantı sağlamak için kullanılmıştır. Toplam bitki hacmi ise, yüzey farkı yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Global Mapper'da DTM ve DSM'yi kullanarak, “Yüzeyler arasındaki hacmi ölç” aracı ile hacim verilerini hesaplamışlardır. Her örnekleme noktasındaki biyokütleyi, birim yüzey alanı başına hacmi, birim yüzey alanı başına ağırlıkla ilişkilendiren “yoğunluk faktörünü” hesaplayarak tahmin etmişlerdir. Toplam yer üstü biyokütleyi ise birim alan başına biyokütle ile toplam parsel alanını çarparak hesaplamışlardır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Gil-Docampo ve ark. (2018) tarafından yoğunluk faktörü kullanılarak yerüstü biyokütlesinin hesaplanmasının gösterimi

Sonuç olarak, DTM-DSM arasındaki ilişki için 0.23 m'den küçük RMSE Z değerleri elde etmişlerdir. Biyokütle alanı verileri, verim-biyokütle tahmininin ($R^2 = 0.88$ ve 1.12 kg/ha) daha çok tek tip bitki örtüsüne sahip parsellerde uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır. Önerdikleri yaklaşımı, farklı platformlar ve sensörler kullanarak gerçekleştirmiş ve farklı ekilebilir ürünlere uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, önerdikleri yöntemin uyarlanabilir ve ölçeklenebilir olduğunu göstermiştir. En yüksek uzaysal çözünürlüğe sahip modelleri genellikle VTOL platformları ile elde etmişlerdir. Ancak en iyi drone tipi/sensör kombinasyonunu, 18 megapiksel kameralı sabit kanatlı bir İHA oluşturmuştur. Sabit kanatlı drone kullanımı ile daha büyük parselleri tek bir uçuşta ölçmenin mümkün olduğunu ve alt parsel oluşturma ihtiyacını ortadan kaldırdığını belirtmişlerdir. Dahası, sabit kanatlı platformların maliyetinin hem saha hem de masaüstü çalışmaları açısından önemli ölçüde düşük olduğunu bildirmişlerdir.

Ayrıca termal, Lidar, hiperspektral gibi sensörlerin yer üstü biyokütle tahminini iyileştirmede kullanılabilirliğinin araştırılması gerektiğini söylemişlerdir.

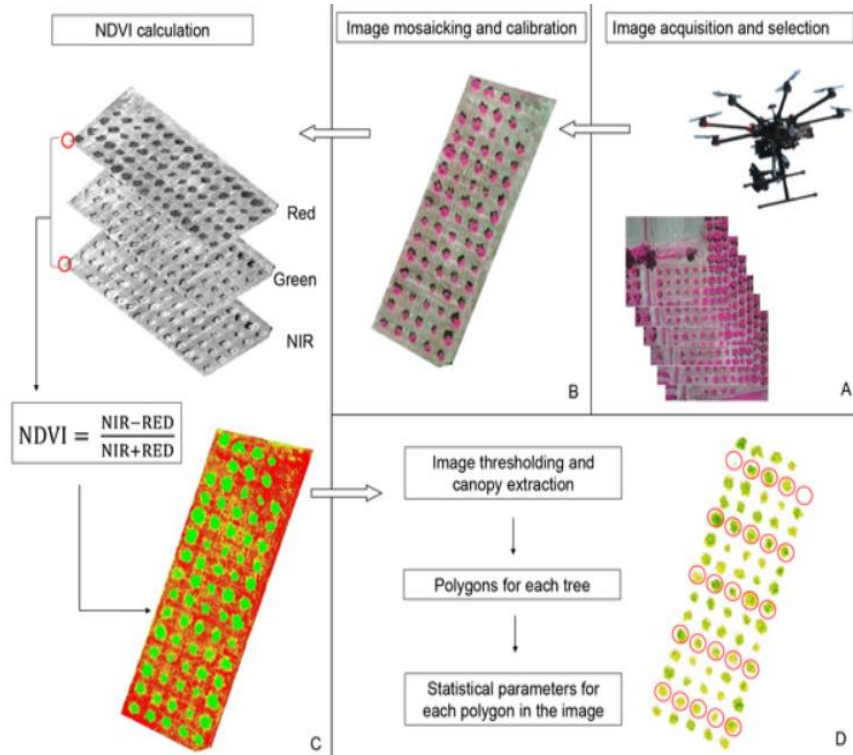
Moeckel ve ark. (2018), İHA'lerden elde edilen görüntülerin işlenmesiyle üretilen 3D nokta bulutlarının analiz edilerek türetilen mahsul fenotipik özellikleriyle ilgili olan uzamsal bilgilerin, nokta bulutlarından elde edilemeyen taze biyokütle verimi gibi diğer bilgilerin elde edilmesinde kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, biyokütle elde etmek için karmaşık bir kanopi yüzeyine sahip üç sebzenin (patlıcan, domates ve lahana) mahsul yüksekliği bilgilerini üretmek için RGB tabanlı İHA görüntülerini kullanmayı amaçlamışlardır. Ayrıca tahmini boy ile tarlada ölçülen mahsul boyu arasındaki ilişkide mahsul gelişme aşamasının etkisini incelemişlerdir. Deney alanı farklı nitrojen ve gübre uygulamasına tabi tutulmuş, S-parcel (biyokütle hasadı gibi yıkıcı ölçümler için) ve H-parcel (spektral örnekleme gibi yıkıcı olmayan ölçümler için) alt parsellerinden oluşan toplam 36 alt parsel bölünmüştür. Mahsul büyüme aşamasında boy ve biyokütle üç sebze türü için beş farklı tarihte ölçülmüştür. Ortalama mahsul yüksekliğini hesaplamak için her H ve S parselinde 30 bitkinin boyunu cetvel kullanarak ölçmüşlerdir. Biyokütleyi ölçmek için ise tüm S parsellerinde zeminden 5 cm yukarıda rastgele seçtikleri üç bitkiyi hasat etmişlerdir ve tarlada ağırlıklarını tartarak her parsel için ortalama değerini hesaplamışlardır. İHA görüntülerinden Agisoft SfM algoritması ile nokta bulutu verileri üretmişlerdir. Ardından nokta bulutlarına karşılık gelen S ve H parsellerine bölmüşlerdir. Toprakta bitki örtüsünü spektral olarak ayırt etmek için GRVI (Green-Red Vegetation Index) indeksini hesaplamışlardır. Tüm parseller ve örnekleme tarihleri için ayrı ayrı, denetimsiz bir k-ortalamlar algoritması kullanarak tüm noktaları GRVI değerine dayalı olarak zemin veya bitki örtüsü olarak sınıflandırmışlardır. Sınıflandırılan zemin noktaları Delaunay üçgenlemesi kullanılarak DEM üretiminde kullanılmıştır. Her z değerinden karşılık gelen DEM değeri bitki örtüsü noktalarının yükseklik bilgilerini hesaplamak için çıkarılmıştır. Nokta bulutlarından totalde 14 ürün yüksekliği metriği elde etmişlerdir. Gübre uygulamasının ve numune alma zamanının mahsul yüksekliğine etkisini ANOVA ile test etmişlerdir. Sebze mahsul yüksekliğinin tahmin modellerini oluşturmak için makine öğrenme yöntemlerini (RFR, SVR gibi) kullanmışlardır. Sonuçta, tüm büyüme sezonu boyunca mahsul boyunun İHA ile izlenmesinin üç mahsul türü için de boy ve biyokütlenin kesin ve ayrıntılı tahmin değerleriyle sonuçlandığı

görülmüştür (R^2 , 0.87 ile 0.97 arasında, sapma ise -0.66 ile 0.45 cm arasında değişmiştir). Mahsul gelişme aşamasının öngörülen mahsul boyu üzerindeki etkisinin önemli olduğunu (örneğin, patlıcan için medyan sapma %1'den %20'ye çıkmıştır), nokta bulutu metrikleri ile mahsul boyu tahminleri arasındaki ilişkinin gücünü ve tutarlılığını etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri sonuçlar, RGB görüntülerden SfM algoritması ile üretilen nokta bulutlarının daha geniş alanlarda mahsul biyokütlesini etkin bir şekilde tespit etmede kullanılabileceğini göstermiştir (sırasıyla patlıcan, domates ve kabak için bağıl hata = %17.6, %19.7, %15.2). Ek olarak ölçülen mahsul boyuna dayalı olarak üretilen biyokütle tahmin modellerinin bu üç tür sebze için benzer doğruluk sergilemiştir (patlıcan, domates ve lahana için sırasıyla bağıl hata = %21.6, %18.8 ve %15.2). Sonuç olarak, yüksek uzaysal çözünürlüklü İHA tabanlı RGB görüntüler ile farklı formlara sahip sebze türlerinin sahip olduğu küçük yapısal detayların bile başarılı bir şekilde ayırt edilebilir olduğu görülmüştür.

Yeom ve ark. (2019), çalışmalarında, çok zamanlı İHA verilerinden ve RGB-NIR bitki indekslerinden faydalanan pamuk ve sorgum bitkileri için toprak işlemenin bitki sağlığı ve büyümeye etkisi üzerinde durmuşlardır. Bu kapsamda RGB ve multispektral kameralı İHA'lar ile 10 farklı tarihte çeşitli uçuşlar gerçekleştirmişlerdir. Ardından elde ettikleri görüntülerden Agisoft programını kullanarak RGB ve MS ortomozaikler üretmişlerdir. Toprak işleme yapılan (CT) ve yapılmayan (NT) yerlerde karşılaştırma yapmak amaçlı RGB tabanlı 5, NIR tabanlı 8 olmak üzere toplamda 13 bitki indeksini hesaplamışlardır. Ayrıca bitki indekslerinin toprak işleme yapılan ve yapılmayan yerlerdeki farklılaşmasının istatistiksel olarak sağlanması için 0.05 anlamlılık seviyesi kullanılarak tek kuyruklu z testi yapmışlardır. Sonuçta CT ve NT arasındaki NIR tabanlı bitki indeksleri farklılıkları RGB'ye kıyasla sezon boyunca daha tutarlı sonuçlar göstermiş, özellikle modifiye edilmiş toprak ayarlı bitki örtüsü indeksi (MSAVI-Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) ve optimize edilmiş toprak ayarlı bitki örtüsü indeksi (OSAVI) toprak işleme uygulamalarında niceliksel fark ölçümleri ve Z testi açısından daha iyi performans sergilediği sonucuna varmışlardır. Ek olarak NIR bitki indeksleri, RGB bitki indeksleri tarafından tespit edilemeyen sorgum ekili alanlarda toprak işleme uygulamalarındaki farklılıkları tespit etmiştir. Ayrıca değiştirilmiş yeşil kırmızı bitki örtüsü indeksinin (MGRVI- Modified Green Red Vegetation Index) ve

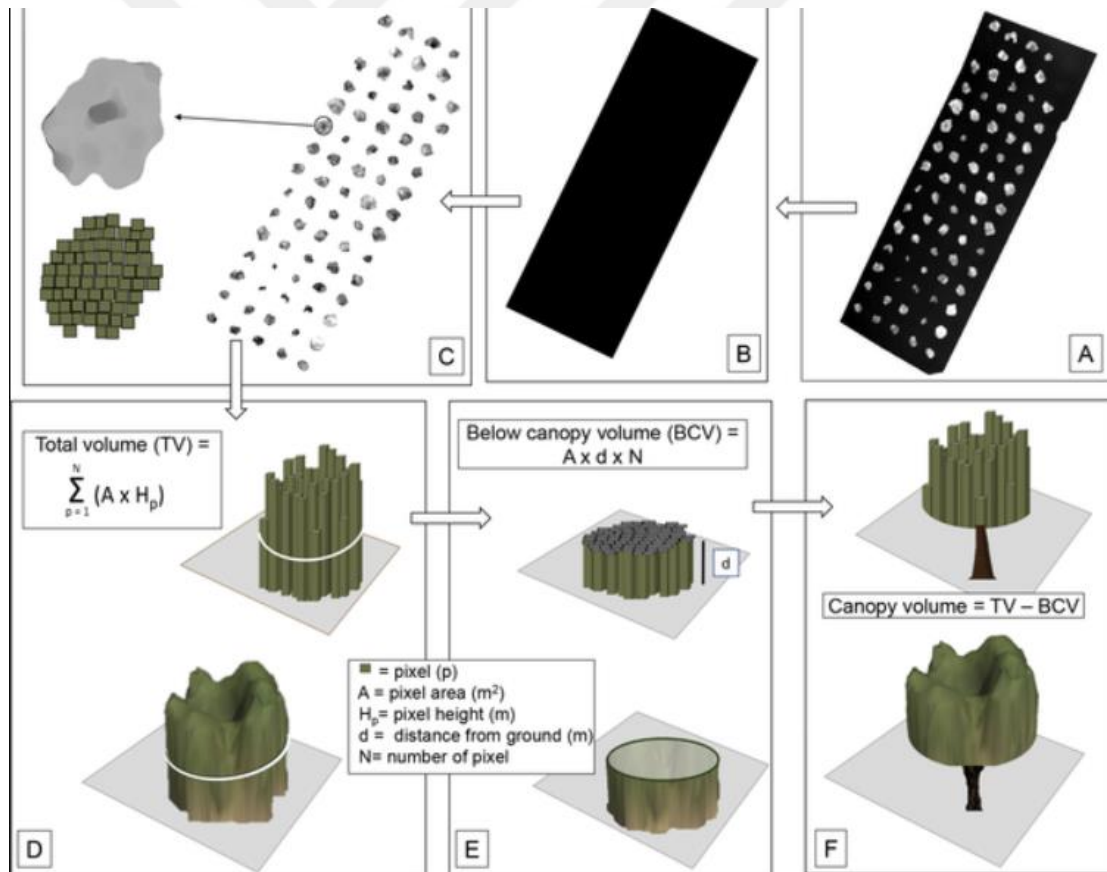
aşırı yeşil indeksin tarımsal uygulamalarda daha ekonomik bir yöntem olarak potansiyele sahip olduğu üzerinde durmuşlardır.

Caruso ve ark. (2019), çalışmalarında RGB ve NIR tabanlı İHA kullanarak çeşitli sulama rejimleri altındaki bir zeytin bahçesinde yaprak alanı indeksi (LAI), ağaç yüksekliği, taç çapı ve kanopi hacmini belirlemeye çalışmışlardır. Bu bağlamda İHA tabanlı ölçümler (ağaç kanopi hacmi, yüksekliği, çapı ve NDVI) ile yer tabanlı ölçümleri (LAI, ağaç kanopi yüksekliği, çapı ve hacmi) karşılaştırmışlardır. Özellikle düşük maliyetli RGB raster görüntülerinden DTM ve DSM hesaplayarak ağaç hacmini belirlemek için SfM yöntemine bağlı bir metodoloji önermişlerdir. Çalışma kapsamında sulanan ağaçlara haftada 4-5 gün uygulama yapılırken, yağmur suyuyla beslenen ağaçlara stres faktörünü azaltmak amacıyla tek bir uygulama yapmışlardır. İHA uçuşlarını tek bir uçuş hariç (yer seviyesinden 50 m yukarıda) yerden 70 m yukarıda gerçekleştirilmişlerdir. Kanopi hacmi elipsoidal bir şekil sayılarak taç çapları, ağaç yüksekliği ve yer seviyesinden en düşük kanopi yüksekliği baz alınarak hesaplanmıştır. Multispektral görüntülerden NDVI, harita cebiri tekniği (Map Algebra) ile ArcGIS yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Caruso ve ark. (2019)'nın multispektral görüntülerden NDVI hesaplama için takip ettikleri iş akışı

Pix4D yazılımında otomatik havai nirengi, demet blok dengelenmesi ve kamera kalibrasyon yöntemleriyle elde edilen DSM'den (Şekil 2.5-A) 3 boyutlu ağaç kanopi hacmi, kanopi yüksekliği ve çapı elde edilmiştir. Ayrıca DSM ArcGIS'te DTM elde etmek üzere işlenmiştir (Şekil 2.5-B). Yalnızca ağaç kanopisi içeren normalleştirilmiş DSM (nDSM), raster calculator kullanılarak DTM'nin DSM'den çıkarılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 2.5-C). Her pikselin hacmi, zeminden maksimum kanopi yüksekliğine kadar, alanların ilgili yükseklik değerlerinin çarpılmasıyla elde edilmiştir. Her ağacın total hacmi, tüm kanopi piksellerinin eklenmesiyle hesaplanmıştır (Şekil 2.5-D). Alt kanopi hacminin (zemin ile kanopinin en alt kısımları arasındaki hacim) hesaplanmasının ardından (Şekil 2.5-E), net kanopi hacminin hesaplanması için her ağacın total hacminden alt kanopi hacmi çıkarılmıştır (Şekil 2.5-F).



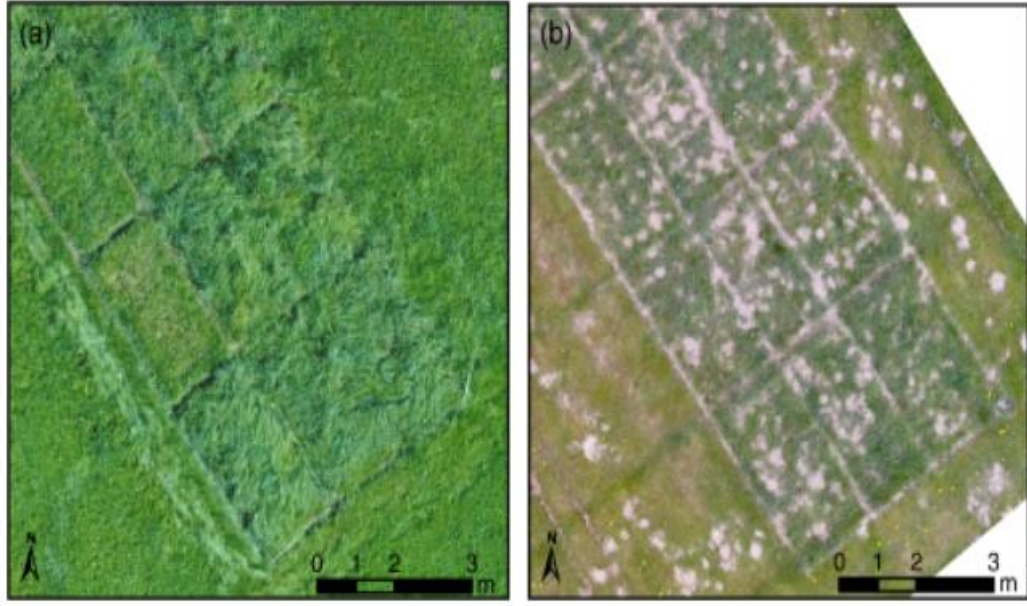
Şekil 2.5. Caruso ve ark. (2019)'nın kanopi hacmini elde etme işlem adımları

Otomatik nesne tabanlı bir yöntem kullanarak her ağaç için gölgelik yüksekliği ve çapı çıkarılmıştır. Ağaç taçlarının arka plandan ayrılması için hem eşikleme yöntemi hem de ikilileştirme tekniklerini kullanmışlardır. Görüntü segmentasyonu ile DSM otomatik

olarak yüksekliğe göre birden çok bölgeye bölünmüştür, böylece tekli ağaç taçları tanımlanmıştır. Yükseklik, her bir ağacı çevreleyen arazinin ortalama yüksekliği ve her ağacın maksimum yüksekliği kullanılarak hesaplanmış olup, ikisinin farkı alınarak mutlak yükseklik elde edilmiştir. Çap, yukarıdan görülen ağaç yüzeyinin daireselliği varsayılarak hesaplanmıştır. Ağacın biyofiziksel ve geometrik parametrelerinin RGB-NIR tabanlı İHA ile tahmin edilme yeteneğini ölçmek için lineer regresyon analizi yaparak yer ölçümlerine göre kıyaslamışlardır. Ağaç su durumu ve kanopi hacmi artışı arasındaki ilişki için ise çift doğrusal regresyon analizi yapmışlardır. Çalışmada elde ettikleri sonuçlar ise şu şekildedir: 130. günde tahmin edilen NDVI aynı günde ölçülen LAI ($R=0.78$) ve yaprak klorofili ($R=0.80$) ile doğrusal olarak bağlantılıdır. Yer ölçümleriyle ve RGB İHA ile ölçülen kanopi hacimleri arasındaki korelasyon 0.71 ile 0.86 arasında bir değer sergilemiştir. Ayrıca kanopi yüksekliği tahmini için elde edilen en yüksek doğruluk ($RMSE= 0.16$ m) İHA irtifasının 50 m olduğunda bulunmuştur ($R= 0.87$). 130 ve 244. günler arasındaki tahmin edilen hacim artışının yağmur suyuyla beslenen ağaçların günlük su stresi integrali ($R= 0.99$) ile yüksek oranda ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak kanopi hacminin RGB İHA tekniği ile belirlenmesinde yer kontrol noktalarının kullanımının sergilediği performansın yer kontrol noktalarının kullanılmadığında sergilediği performansla benzer sonuçlar sergilediği sonucuna varmışlardır. Kanopinin yerden yüksekliğini ortalama olarak sabit bir değer almayla her ağaç için ölçülen gerçek yükseklik değeri olarak almanın ölçülen ve tahmini kanopi hacmi arasındaki ilişkiyi açık bir şekilde etkilemediğini belirtmişlerdir.

Lussem ve ark. (2019), çalışmalarında otlak biyokütlesinin bir göstergesi olan ot yüksekliğini izlemek için İHA kullanarak oluşturdukları çok zamanlı CSM'lerin ve RGB tabanlı bitki indekslerinin potansiyelini değerlendirmeyi, sözü geçen bu yöntemleri plaka ölçer ve spektrometre tabanlı dar bant bitki indeksleri gibi biyokütle izlemede kullanılan diğer yöntemlerle karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Deney alanında yonca, karahindiba gibi başka birçok tür mevcuttur ve deney alanını 6 gübre seviyesinde 162 alt parselden oluşturmuşlardır. 5. gübre seviyesinde R2 alanında kuvvetli büyüme nedeniyle otların saplarının büküldüğü, R1'de ise kemirgen aktivitesi olduğu görülmüştür (Şekil 2.6). Sıkıştırılmış ot yüksekliğinin referans verilerini plaka ölçer kullanarak almışlardır. Her bir biyokütle örneklemeinden önce parsel başına 5 ölçüm almış, bu ölçümlerin ortalamasını alarak ortalama sıkıştırılmış ot yüksekliğini

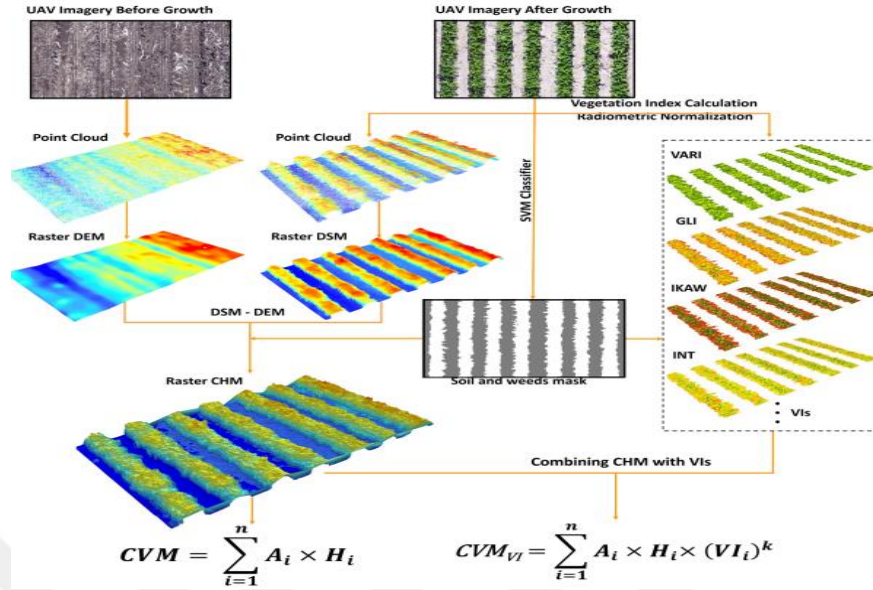
elde etmişlerdir. Her uçuştan sonra hasat edilen parsellerde taze biyokütle ağırlığını, parsel başına kırpılmış biyokütleyi tartarak hesaplamışlardır. Taze biyokütleyi 65 °C’de kurutmuş ve tartmış, böylelikle kuru biyokütleyi elde etmişlerdir. Parsel boyutları farklı olduğu için ortomozaikleri kullanarak parsel alanlarını hesaplamış ve doğru ölçeklendirme faktörünü belirlemek için şerit metre ile deney alanında 2 kere kontrol etmişlerdir. İHA görüntülerini 25 m irtifada almış, deney alanında 12 adet yer kontrol noktası kullanmışlardır. Kanopi yansımaları ise spektoradyometre kullanarak ölçmüşlerdir. İHA görüntüleri Agisoft yazılımında işlemiş, nokta bulutu, DSM, ortomozaik gibi fotogrametrik ürünler üretmişlerdir. CSM’lerden ortalama çim yüksekliği (SH_{mean}) ve 90. Yüzdelik çim yüksekliği (SH_{p90}) değerlerini çıkarmışlardır. Her örnekleme tarihinin ortomozağini kullanarak 4 adet bitki indeksini (RGBVI, ExG, VARI ve NGRDI) hesaplamışlardır. Ek olarak 2 bileşik indeksi hesaplamışlardır. Spektoradyometrenin yakın kızılötesi bölgesini kullanarak NDVI, RDVI, OSAVI, REIP ve NDREI gibi bitki indekslerini türetmişlerdir. Her özelliğin hassasiyetini Pearson Korelasyon Katsayısı kullanarak test etmişlerdir. Biyokütle tahmini için bitki indeksleri ve yükseklik özelliklerinin doğruluğunu iki ve çok değişkenli regresyon modellerinin çapraz doğrulamasıyla gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri bulgular ise şu şekildedir: CSM’ler ve ortomozaikler gübre uygulamalarıyla iyi bir uyum sergilemiş, ot yüksekliğinin ayrıntılı bir temsilini sağlamış fakat deney alanındaki heterojen çim yapısı biyokütle tahmininde değişkenliğe sebep olmuştur. CSM’lerden türetilen ortalama yükseklik, plaka metreden türetilen yüksekliğe kıyasla daha yüksek bir değer aralığı ve standart sapma değeri ile sonuçlanmıştır. SH_{p90} , kuru ve taze biyokütle ile SH_{mean} ’e göre biraz daha iyi bir korelasyon sergilemiştir. Yükseklik özelliklerine göre biyokütle tahmininde çapraz doğrulama kuru biyokütle için $R^2 = 0.57-0.73$, taze biyokütle için $R^2 = 0.43-0.79$ arasında sonuçlar göstermiştir. Ancak plaka metreyle dayalı referans ölçümlerinin biyokütle tahminleri ile çok daha iyi bir uyum gösterdiği görülmüştür. RGB bazlı bitki indeksleri ve spektoradyometre bazlı bitki indeksleri, biyokütle tahmini için değişken doğruluk ve uyum sağlamıştır. Otlakların dünya kara yüzeyinin yaklaşık %40’ını kapladığını, karbon tutma gibi önemli ekosistemsel görevleri yerine getirdiğini, et, süt ve biyoyakıt üretiminde önemli bir etken olduğunu ve elde ettikleri sonuçların değişkenlik göstermesine rağmen, otlak biyokütle izlemede kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.6. Lussem ve ark. (2019)'nın yürüttükleri çalışmada deney alanında meydana gelen bozulmaların gösterimi a) aşırı büyüme sonucu saplarda bükülme b) kemirgen etkisi

Maimaitijiang ve ark. (2019), çalışmalarında soya fasulyesinin yer üstü biyokütlesini tahmin etmek için RGB tabanlı İHA görüntülerinden elde edilen spektral, yapısal ve hacimsel bilgiler ile bitki örtüsü indeksi ağırlıklı bir kanopi hacim modelinin (CVM_{VI}) potansiyelini araştırmışlardır. Düşük maliyet ve yüksek doğrulukta biyokütle tahmininin hassas tarım ve yüksek verimli fenotipleme için oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir. Sahada kanopi yüksekliği çeşitli tarihlerde ölçülmüştür. Ayrıca biyokütle belirlemek için yaş örnekler toplanmış, ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra bunlar fırında ağırlıkları stabilize olana kadar kurutulmuştur. Zemin ölçümleriyle eş zamanlı olarak İHA görüntülerini santimetre altı piksel çözünürlüğünde toplamışlardır. Çıplak toprak yüksekliğini belirlemek için mahsul ekiminden hemen sonra bir uçuş gerçekleştirmiş ve Pix4DMapper'ın SfM algoritmasıyla Sayısal Yükseklik Modelini (SYM) yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak üretmişlerdir. Üretilen ortomozaiklere radyometrik normalizasyonu gerçekleştirmek için “sözde değişmez öznitelikler yöntemini (PIF- Pseudo-Invariant Features)” uygulamışlardır. Fotogrametrik yöntemlerle üretilen ortomozaiklerden ise bitki indeksleri (VARI, GLI, ExG gibi) hesaplanmış ve raster katmanları üretilmiştir. ENVI yazılımını kullanarak yüksek yoğunluklu nokta bulutları için gürültü filtrelemesi uygulamışlardır. Filtrelenmiş bu veri seti ArcGIS'te Ters Mesafe Ağırlık enterpolasyon (IDW- Inverse Distance Weighting)

yöntemi kullanılarak raster katmanlarına dönüştürülmüş ve boşluk doldurma modu daha doğru modeller oluşturmak için kullanılmıştır. DSM ve DEM arasındaki piksel bazında fark hesaplanarak Kanopi Yükseklik Modeli (Canopy Height Model- CHM) elde edilmiştir. Bu modeldeki toprak ve yabani ot içeren pikseller destek vektör makinesinin (Support Vector Machine- SVM) sınıflandırıcı olarak kullanıldığı ortorektifiye edilmiş RGB görüntülerden oluşturulan ikili maskeler kullanılarak çıkarılmıştır. CH_{mean} , CH_{max} , CH_{min} , CH_{std} gibi kanopi yapısına dayalı metrikler CHM'lerden üretilmiştir. Her biyokütle örnekleme noktasının kanopi hacmi, CHM'lerden hesaplanmıştır. Kanopi spektral bilgisinden çıkarılan mahsul için bir yoğunluk faktörü tanıtmışlardır. Yoğunluk faktörünü, biyokütle tahmini için bir gösterge olarak kullanılan vejetasyon indeksi ağırlıklı gölgelik hacmi modelini (CVM_{VI}) oluşturmak kullanılmışlardır (Şekil 2.7). Spektral indeksler ve yapısal metrikler yer üstü biyokütle (AGB) ile arasındaki korelasyon Spearman's ve Pearson korelasyon analizleri ile araştırılmıştır. AGB tahmini için girdi verileri olarak CH_{mean} , BA, CVM ve CVM_{VI} kullanılarak linear, logaritmik, polinomsal gibi çeşitli regresyon modelleri uygulanmıştır. Model eğitimi ve doğrulaması için “Birini Dışarda Bırakan Çapraz Doğrulama (Leave-One-Out Cross-Validation- LOOCV)” yöntemini uygulamışlardır. Çalışma kapsamında şu sonuçlara ulaşmışlardır: Kanopi yüksekliği ve bazal alanı gibi 2 boyutlu yapısal metrikler bitki indekslerine kıyasla daha yüksek korelasyon sergilemişlerdir. Ancak kanopi hacim modeli (Canopy Volume Model- CVM) gibi 3 boyutlu metrikler, AGB tahmini için CH gibi 2 boyutlu metriklerle kıyasla daha iyi tahmin sağlamışlardır ($R^2 = 0.849$; $RRMSE = \%18.7$; $MPSE = \%20.8$). Ancak hem spektral hem de hacimsel bilgileri içeren CVM_{VI} , diğer tüm bitki indeksi ve metriklerle kıyasla en iyi sonucu vermiştir ($R^2 = 0.893$; $RRMSE = \%16.3$; $MPSE = \%19.5$). Ek olarak, CVM_{VI} , yüksek verimli soya fasulyesi biyokütle tahmini potansiyelini gösteren farklı genotipler için eşit tahmin gücü göstermiştir. Ayrıca CVM_{VI} tabanlı bir tek değişkenli regresyon modeli, çok değişkenli karmaşık regresyon modelleriyle karşılaştırılabilir yer üstü biyokütle tahmin yeteneği göstermiştir. Bu çalışmada soya fasulyesi için oluşturulan CVM_{VI} 'nin AGB tahmin etmede basit ama etkili bir yöntem olduğunu gösterilmiştir. Bu yöntemin yüksek verimli fenotipleme ve hassas tarımsal ekolojik uygulamalar ve kanopi yönetimi için uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.7. Maimaitijiang ve ark. (2019)'nın biyokütle tahmini için CVM_{VI} oluşturmada takip ettikleri işlem adımları

Rueda-Ayala ve ark. (2019), çalışmalarında dijital çim modelleri kullanarak çim alanlarını karakterize etmeyi, hacim, biyokütle ve bitki boyunu gereksiz tahribatlardan kaçınarak tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda hava (RGB kameralı İHA) ve yer tabanlı (RGB-D Microsoft Kinect) iki sistem kullanmışlardır. Çalışma kapsamında kullandıkları RGB-D Microsoft Kinect, 1 adet RGB kamera, 1 adet derinlik kamerası, 1 adet kızılötesi kamera ve bir dizi mikrofondan oluşmuştur. Doğrulama amaçlı zemin verilerini 1 m^2 'lik 10 parselde manuel ve yıkıcı (kesim) olarak elde etmişlerdir. Bu 10 parseli, 1 m^2 'lik alan içerisindeki değişimi gözlemlemek için 4 çeyrek parçaya bölmüşlerdir. Çalışma alanlarını biri timothy baskın ve diğeri çavdar otu baskın olacak şekilde toplam 2 alan olarak örneklemişlerdir. Her örneklem parselinde gerçek yükseklik verilerini mezura kullanarak ölçmüşlerdir. Ek olarak her örneklem parselinin ortalama yüksekliğini temsil eden sıkıştırılmış ot yüksekliği değerini, bir diskmetre kullanarak belirlemişlerdir. Daha sonra örneklem parsellerindeki tüm bitkileri zemin seviyesinde keserek 48 saatte 80°C 'de kurutmuş ve kuru biyokütleyi ölçmüşlerdir. Merada hasattan önce ve hemen sonra RGB-D Kinect ile 3 boyutlu modeller oluşturulmuş ve bu iki model üst üste bindirilmiş, aralarındaki farktan bitki boyunu tahmin etmişlerdir. Aynı 3D noktalar kümesini kapsayacak şekilde farklı alfa değerleri için farklı alfa şekilleri oluşturmuşlardır. Hacim değerlerini bu alfa şekillerinden ilgili fonksiyon kitaplığını kullanarak hesaplamışlardır. Agisoft

programında ise İHA'dan elde edilen görüntüleri işlemiş nokta bulutu, DSM, katı model ve ortomozaik üretmişlerdir. DSM ve ortomozaik 4 bantlı çok katmanlı bir dosya oluşturmak üzere birleştirilmiştir. Bu dosyayı nesne tabanlı görüntü analizi (Object Based Image Analysis- OBIA) kullanarak işlemişlerdir. Görüntü segmentasyonu ve sınıflandırması için Otsu algoritması kullanmışlardır. Mahsul piksellerinin katı bir nesne olarak birleştirilmesiyle hacim değerini hesaplamışlardır. Bitki boyu ve kuru biyokütlenin gerçek saha ölçüm verilerini, İHA ve RGB-D Kinect tabanlı ölçümler ile karşılaştırmışlardır. Basit doğrusal regresyon, Pearson korelasyonu ve R^2 katsayısı kullanılarak tüm ilişkilerde test edilmiştir. Her iki alan arasındaki farklar, ANOVA ve linear regresyon modelleri için uyumsuzluk testleri ile belirlenmiştir. Sonuçta, İHA tabanlı tahminler, RGB-D tabanlı tahminler ve her iki alandaki manuel yükseklik ölçümleri arasında yüksek uyum gözlemişlerdir. RGB-D yöntemi, her iki alanda da bitki yüksekliğinin zemin doğrulama verileriyle $R^2 > 0.80$ ile ve yalnızca timothy alanında kuru biyokütle ile $R^2 = 0.88$ ile yüksek korelasyon göstermiştir. Ayrıca çavdar otunun baskın olduğu mera için RGB-D tabanlı hacim, parsel başına ölçülen ve ortalaması alınan bitki boyu ile $R^2 = 0.87$ ile yüksek bir korelasyon sergilemiştir. İHA tabanlı sistemin bitki boyu ve kuru biyokütle tahmininde daha zayıf bir tahmin yeteneğine ($R^2 < 0.6$) sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak RGB-D kameralar ile ayrıntılı modeller üretilmesine karşın, İHA sistemleri ekonomik, kolay kullanımlı ve daha geniş alanlarda etkili ve tahribatsız bir ölçme sağladığı için İHA'ların tercih edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak çim bitkileri için detayların hassas bir şekilde tanımlanmasının gerekli olmadığını belirtmiş, bu sebeple hava platformlarının mera alanlarında daha iyi bir seçenek olacağını bildirmişlerdir.

Abd-Elrahman ve ark. (2020), çalışmalarında raster görüntü analizini kullanarak çilek kanopilerinin tanımlamayı ve boyut metriklerini otomatik olarak çıkarmayı ve çıkardıkları metrikleri çilek kuru ağırlığının istatistiksel modellemesinde kullanmayı amaçlamışlardır. Çalışma sahası, her parselde 17 farklı bitki genotipi içeren yükseltilmiş yataklara dikilmiş toplam 34 çilek parselinden meydana gelmiştir. Çalışma kapsamında kullandıkları görüntüleri traktöre monte ettikleri 2 kameradan (RGB ve IR) elde etmişlerdir. Ayrıca görüntülerde görülebilecek şekilde ve cm düzeyinde doğrulukta yer kontrol noktaları da oluşturmuşlardır. Görüntüleri çilek yetiştirme mevsimi (16 hafta)

boyunca haftalık olarak çekmişlerdir. Agisoft'ta SfM tekniği ile 1 mm yer örnekleme aralığında RGB/IR ortogörüntüleri ve 2 mm DSM fotogrametrik ürünlerini üretmişlerdir. Ortogörüntüleri, kamera eğimi ve sahne topografisi varyasyonlarının etkilerini gidermek için düzeltilmiş, planimetrik ölçümler elde etmek için kullanmışlardır. NDVI, gölge oranı, ton-yoğunluk-doygunluk renk modelinin doygunluk değeri gibi indeksleri raster katmanı olarak üretmişlerdir. Doygunluğu 0.4'ten (eşik değeri) büyük, NDVI'sı 0'dan büyük ve gölge oranı 0'dan küçük pikselleri bitki örtüsü olarak sınıflandırmışlardır. Sınıflandırılan bu pikselleri ise kanopi tasviri ve metrik çıkarma için bitki ve toprak alanları ayırt etmek amacıyla maske olarak kullanmışlardır. Her görüntü alımından birkaç saat sonra yıkıcı yöntemlerle her yataktan birer tane olmak üzere rastgele seçtikleri iki parselden aldıkları örnekleri beş gün boyunca 65 °C'de kurutmuş, kuru biyokütle ağırlığını elde etmişlerdir. ArcGIS'te kanopi tasviri için 4 farklı model üretmişlerdir. DTM ve DSM arasındaki farka dayalı olarak CHM üretmişlerdir. Otomatik olarak tanımlanan ve görsel olarak yorumlanan kanopiler kullanılarak dört kanopi boyutu metriğini (alan, hacim, ortalama yükseklik ve yükseklik standart sapma) çıkarmış ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Çilek bitkisi kuru biyokütlesini, bağımsız değişkenler olarak görüntüden türetilen kanopi boyutu metriklerini kullanan çoklu regresyon analizinde bağımlı değişken olarak kullanmışlardır. LOO (Leave-One-Out) ve LGO (Leave-Group-Out) analizlerini çapraz doğrulama için uygulamış ve RMSE değerlerini hesaplamışlardır. Sonuç olarak, otomatik bir iş akışıyla tanımlanan ve görsel olarak yorumlanan kanopiler arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Otomatik olarak üretilen ve görsel olarak yorumlanan modellerin R^2 değerleri sırasıyla 0.77 ve 0.76 olarak bulunmuştur. İki modelin LOO çapraz doğrulama RMSE değeri ise sırasıyla 9.2 g ve 9.4 g olarak bulunmuştur. Tüm bu sonuçlar bitki fenotipleme uygulamalarını desteklemek için kanopi tasviri ve kanopi metriklerinin çıkarılması için otomatik raster tabanlı jeo-uzamsal analiz yöntemleri kullanmanın fizibilitesini göstermiştir. Geliştirdikleri yöntemin iyileştirildiği, drone görüntülerinin kullanıldığı ve çoklu regresyon modelleri yerine daha karmaşık modelleme algoritmalarının kullanıldığı daha fazla araştırmanın yapılmasını önermişlerdir.

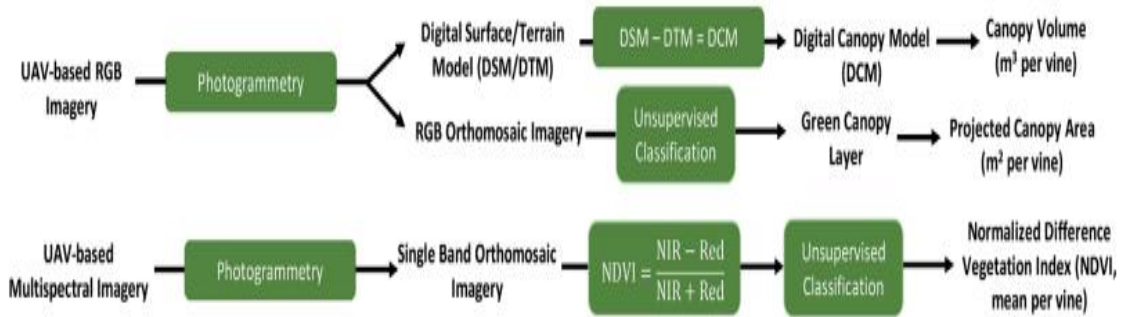
Chang ve ark. (2020), narenciye yeşillenme hastalığına sahip olan ve olmayan portakal ağaçlarının özelliklerini daha iyi anlayabilmek ve ağaçların fenotipik özelliklerini

çıkarabilmek için İHA tabanlı multispektral görüntüler kullanarak kanopi şekli ve bitki indekslerini karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Narenciye yeşillenme hastalığı, tedavisi olmayan bir hastalıktır ve bu hastalığa sahip ağaçların belirlenmesi, izlenmesi, hastalık ilerlemeden önce hastalığa maruz kalmış ağaçların yok edilmesi ve değiştirilmesi bu sebeple kritik bir önem taşımaktadır. Çalışma sahasında hastalıkla ilgili bir deney yürütüldüğü için, bu alanda en etkili yöntemi bulabilmek adına bloklara rastgele 9 tedavi dağıtılmıştır. Her bloğun ortasındaki 6 ağacı İHA tabanlı verilerin doğrulanması amacıyla kullanmışlardır. Taç çapı, kanopi hacmi, göğüs yüksekliği çapı gibi ağaç yapısı bilgilerini zeminde ölçmüşlerdir. Çalışma kapsamında bir İHA yardımıyla yüksek kaliteli multispektral görüntüleri 50 m irtifada toplamış ve radyometrik olarak kalibre edilmiş ortomozaik ve yükseklik modeli oluşturmak için işlemişlerdir. Ağaç yüksekliği ve kanopi hacmini tahmin etmek için DTM'nin DSM'den çıkarılmasıyla kanopi yükseklik modeli (CHM) üretmişlerdir. DTM'yi ise ortomozaikler üzerindeki yer noktalarını manuel olarak sayısallaştırarak oluşturmuşlardır. Hastalığı tek tek ağaç düzeyinde incelemeyi amaçladıkları için NDVI ve CHM kullanarak bir ağacı tanımlamak için bir algoritma önermişlerdir. NDVI için eşik değerini 0.6 olarak seçmiş, pikselleri bitki örtüsü içeren ve içermeyen şeklinde sınıflandırmışlardır. İHA verilerini toplarken, ağaç olmayan pikselleri elimine etmek için 30cm'lik bir eşik kullanarak CHM değeri eşik değerinden küçük olan pikselleri filtrelediler. Eşikleme ve morfolojik filtrelemeye ek olarak benek gürültüsünü gidermek ve boşlukları doldurmak için açma ve kapama işlemleri uygulamışlardır. Tekil ağaç sınırlarını bir dikdörtgen kullanarak belirlemişlerdir. Kanopi hacmi ve kanopi yüksekliği gibi kanopi şekli özelliklerini tekil ağaç sınırlarını kullanarak CHM'lerden hesaplamışlardır. Bu sınır içindeki maksimum CHM değerini ağaç yüksekliği olarak kabul etmişlerdir. Kanopi hacmini ise ağaç sınırı içindeki piksellerin hacminin toplamı (piksel alanı*piksel yüksekliği şeklinde) olarak ve İHA görüntülerinden elde ettikleri ağaç yüksekliği, taç çapı gibi verileri allometrik bir denklemde kullanarak iki farklı şekilde hesaplamışlardır. Sağlıklı ve hastalıklı ağaçlar arasındaki spektral farklılıkları gözlemleyebilmek için NDVI, NDRE, MSAVI ve CI (Chlorophyll Index) gibi 4 adet bitki örtüsü indeksini hesaplamışlardır. Bireysel ağaç kanopilerindeki ortalama bitki örtüsü indeksi değerleri, her ağacın temsili bitki örtüsü indeksleri olarak hesaplanmıştır. Sonuçta, ağaç yapısal parametrelerinin İHA ve yer tabanlı ölçümlerle güçlü bir korelasyon sergilediğini görmüşlerdir. İHA ve yer

ölçümleri arasındaki ağaç yüksekliği ve taç çapı korelasyon katsayılarını sırasıyla 0.7 ve 0.8 olarak bulmuşlardır. İHA tabanlı kanopi hacminin de yer ölçümleriyle yüksek oranda ($R^2 > 0.9$) uyum gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle allometrik eşitliğe dayanan kanopi hacminin regresyon çizgisini 1'e yakın olarak bulmuşlardır. Çalışmalarında sağlıklı olan ağaçların her zaman daha yüksek bitki örtüsü indeksi değeri gösterdiğini belirtmişlerdir. Ancak kırmızı kenar ile ilgili bitki örtüsü indekslerinin, narenciye hastalıklarının izlenmesi için daha iyi bir seçenek olduğu bildirmişlerdir. Sağlıklı ağaçların kanopi hacimlerinin, enfekte ağaç kanopi hacimlerinin 2 katından daha fazla olduğu görmüş, bu sonuçla, hastalığın izlenmesinde kanopi hacminin kullanılabilir olduğunu kanıtlamışlardır. Ayrıca başarılı bir CHM oluşturulabilirse sadece multispektral sensörlerle değil, RGB sensörlerle de hastalığın izlenebileceğini bildirmişlerdir.

Ouyang ve ark. (2020), çalışmalarında üzüm bağında uyguladıkları 4 farklı uygulamadan (budama, yaprak seyreltme vb. gibi) sonra meydana gelen değişimleri İHA ile gözlemek ve bu gözlem sonuçlarını değerlendirmek için elde ettikleri görüntüleri analiz etmeyi amaçlamışlardır. Uyguladıkları işlemlerin etkilerini ölçmek için hem yer hem de İHA tabanlı ölçümler yapmışlardır. Zemin görüntülerini akıllı telefonun ön kamerası (RGB) yardımıyla kaydetmişlerdir ve bu görüntüleri kullanarak bir akıllı telefon uygulaması yardımıyla bitki alanı indeksini (PAI) hesaplamışlardır. Ayrıca PAI'yi yaprak alanı indeksine karşı da kalibre etmişlerdir. İHA görüntülerini ise hem RGB hem de multispektral sensörlü İHA kullanarak elde etmişlerdir. Pix4DMapper'da RGB görüntülerden ortomozaik ve DSM elde etmişlerdir. Multispektral görüntülerden ise her spektral bandın görüntüsünden tek bantlı ortomozaikler elde etmişlerdir. ArcGIS yazılımında ise özelleştirilmiş Processing prosedürü kullanarak DCM (Digital Canopy Model) rasterlarını oluşturmak için DSM normalize edilmiştir. Matlab'da ise "image processing toolbox" kullanarak, RGB ortomozaikteki yeşil kanopi pikselleri, yansıtılan kanopi alanı hesaplaması için kanopi katmanı oluşturmak üzere Lab renk uzayı profiline göre çıkarmıştır. Daha sonra tek bant ortomozaiklerden NDVI rasterı hesaplamışlardır. Hesapladıkları bu NDVI rasterı kullanarak ArcGIS'te denetimsiz sınıflandırma yaparak raster görüntüyü arka plan ve bitki olmak üzere iki sınıfa ayırmışlardır. Bitki içeren sınıf, asma başına ortalama NDVI hesaplanması için sınıflandırılmış NDVI olarak çıkarılmıştır. Dijital kanopi modelinden

tek asma rasterları kullanarak asma başına kanopi hacmini hesaplamışlardır (Şekil 2.8). Asma başına öngörülen kanopi alanını ise RGB yeşil katmanda tek kanopi piksel alanının toplamı kullanılarak hesaplamışlardır. Asma başına ortalama NDVI, çıkarılan tüm kanopiye ait sınıfın piksellerinin ortalama NDVI değerlerinden hesaplanmıştır. Tüm çalışmalarının sonucunda İHA tabanlı ölçümlerin kanopi yapısında meydana gelen değişiklikleri tespit ettiğini ve kanopi yönetimi uygulamalarında kullanımının büyük bir potansiyele sahip olduğunu görmüşlerdir. Yer tabanlı PAI'nin salkım inceltmesinin neden olduğu iç kanopi yapısı değişikliklerini İHA tabanlı ölçmelere kıyasla etkili bir şekilde tespit eden tek teknik olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca İHA ile kıyasladıklarında yer tabanlı PAI ölçümlerinin daha hızlı elde edilebilir ve işlenebilir olduğunu belirtmişlerdir. Kanopi hacmi ve PAI'nin NDVI ve öngörülen kanopi alanına göre kanopi yapısındaki varyasyonları daha iyi tespit ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Kanopi hacmi ve alanı gibi kanopi özelliklerinin bilinmesinin ilaçlama, gübreleme, su yönetimi gibi diğer kanopi yönetimi uygulamalarına da katkı sunabileceği üzerinde görüş bildirmişlerdir (Llorens ve diğerleri, 2011).



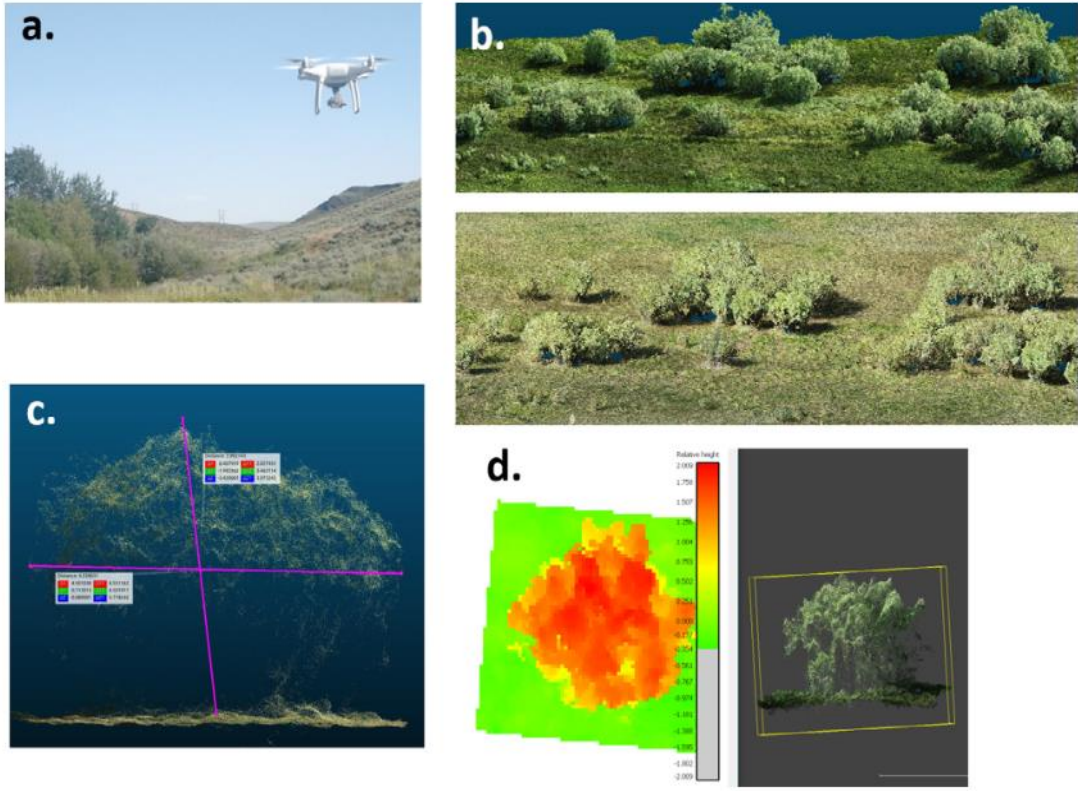
Şekil 2.8. Ouyang ve ark. (2020)'nın çalışmalarında kullandıkları RGB ve multispektral görüntüleri işlemede takip ettikleri prosedür

Karl ve ark. (2020), güney Idaho nehir kıyısındaki bir alanda otlatma öncesi ve sonrası söğüt kanopi hacminin RGB tabanlı İHA ölçümlerinin saha ölçümlerine ne kadar uyumlu olduğunu belirlemeyi amaçlamışlardır. Söğütler (n=58) mera alanında rastgele seçilmiştir. Meraya ait otlatma öncesi ve sonrası yem biyokütlesi, her otlatma eyleminde mera boyunca rastgele beş yerde belirlenmiştir. Hesaplanan otlatma öncesi ve sonrası değerler kuru madde bazında sırasıyla 6379 ve 3630 kg/ha'dır. Çalışmalarında elde ettikleri otlatma öncesi ve sonrası İHA görüntülerini Agisoft SFM

metoduyla işlemiş, nokta bulutu, DSM ve ortomozaik üretmişlerdir (Şekil 2.9). Söğüt kanopi hacmi gerçek zemin ölçümleri bilinmeden 3 boyutlu nokta bulutlarından tahmin edilmiştir. CloudCompare’de 2 farklı teknik ile kanopi hacmini belirlemişlerdir. 1. teknikte Thorne ve ark. (2002) tarafından değiştirilen elipsoid hacminin formülünü (eşitlik 9) kullanmışlardır. Bu eşitlikte nokta bulutlarında bitkinin boyu (h) bitkinin tabanından en üst noktasına kadar olan mesafe olarak alınmıştır ve bu yüksekliğin %50’sinde ise çalı genişliğinin ortogonal ölçümleri (A, B) yapılmıştır.

$$V = \frac{2}{3} \pi h \left(\frac{AB}{2} \right) \quad (9)$$

İkinci teknikte ise “yüzey örtüsü” tekniğini kullanarak kanopi hacmini belirlemişlerdir. Nokta bulutunu bir yüzey yükseklik modeline genelleştiren ve yüzey modeli ile sabit bir zemin yüksekliği arasındaki fark temelinde hacmi hesaplayan CloudCompare’in “2.5D Hacim Hesaplama Aracını” kullanarak hacmi hesaplamışlardır. Bu teknik için raster çözünürlüğünü 15 cm olarak ayarlamış ve nokta bulutundaki en alçak noktayı kullanarak her çalı için zemin kotunu belirlemişlerdir. İHA tahminleri ile saha tahminleri arasında lineer regresyon analizi yapılmıştır. Ek olarak, saha ve İHA bazlı tahminler arasındaki tutarsızlıkların kaynağını belirleyebilmek için söğüt yükseklik ve genişlik ölçümleri lineer regresyon yoluyla karşılaştırılmıştır. Sonuçta, her iki tekniği de kullanan nokta bulutu kanopi hacmi tahminleri hem otlatma öncesi hem de otlatma sonrası için sahada tahmin edilen hacim ile yüksek düzeyde doğruluk ($R^2 > 0.8$) göstermiştir. Nokta bulutlarından tahmin edilen yükseklikler, saha ölçüm yüksekliği ile otlatma öncesi $R^2 = 0.944$, otlatma sonrası $R^2 = 0.927$ ile iyi bir uyum göstermiştir. Bununla birlikte, kanopi genişliğinin nokta bulutu ve saha ölçümlerinin uygunluğu, yükseklik verisine göre otlatma öncesi için $R^2 = 0.89$, otlatma sonrası için $R^2 = 0.776$ ile daha düşük bir doğruluk sergilemiştir. Sığırların gezinmesinin ve sahanın çiğnenmesinin söğüt kanopi hacmini azaltabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca drone tabanlı ölçümlerde, görüntülerin alınması ve işlenmesi dahil olmak üzere, örnekleme olayı başına (yani, otlatma öncesi, otlatma sonrası) yaklaşık 4 saat sürerken, saha tabanlı ölçümler ise örnekleme olayı başına yaklaşık 10 saat sürmüştür. Bu sonuçlar, nehir kıyısındaki odunsu bitki örtüsünü ölçmek ve izlemek için İHA tabanlı ölçümlerin saha tabanlı ölçümlere kıyasla iyi ve etkili bir alternatif olacağını göstermektedir.



Şekil 2.9. Karl ve ark. (2020)'nın çalışma metodolojisi a) İHA görüntülerinin elde edilmesi, b) SfM ile 3D nokta bulutu üretmek için görüntülerin işlenmesi c) söğütlerin nokta bulutundan çıkarılması d) kanopi hacminin belirtilen 2 teknikle hesaplanması

Starý ve ark. (2020), çalışmalarında şerbetçi otu bitkisi için RGB indeksleri hesaplamaya ve bahçenin spesifik yapısına göre kanopi alanı hesaplaması için hangi indeksin daha iyi olduğunu belirlemeye çalışmışlardır. Şerbetçi otunun ve benzer şekilde üzüm bağlarının sıra ve kanopi yapısının bitkiler tarafından üretilen gölgeler, sıralar arası farklı bitki türlerinin varlığı gibi çeşitli etkenlerden dolayı uzaktan algılama ile belirlenmesinin çok zor olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında S.O.D.A. kamerayla (Sensor Optimised for Drone Applications) donatılmış sabit kanatlı İHA ve multispektral kamera ile donatılmış sabit kanatlı VTOL İHA olmak üzere toplam 2 adet İHA'yı hasat öncesi kozalakların fenolojik olgunluk aşamasındaki görüntülerini toplamak için kullanmışlardır. Pix4DMapper yazılımında görüntü kalibrasyonu, yoğun nokta bulutu ve ortomozaikler her bir veri setinden hesaplanmıştır. 7 adet bitki indeksi (ExG, VARI, TGI, GLI, NGRDI, RGBVI, G%) RGB ve multispektral görüntülerin her ikisinden de türetilmiştir. Bitki indekslerinin her birinden Otsu Metoduna dayalı olarak ikili modeller türetildi ve yeşil bitki örtüsünü saptayabilmek için bir eşik değeri belirlendi. Çalışmalarında 1 değeri vejetasyonu, 0 değeri ise çıplak toprağı temsil

etmiştir. Bu ikili rasterlar alan olasılıklarını hesaplamak amacıyla vektör modeline (poligon şekil dosyası) dönüştürüldü. Bir sonraki görüntü analizinde ExG ve TGI indeksleri diğerler indekslere kıyasla şerbetçiotu bahçesi alanındaki bitki örtüsü tahminini en doğru şekilde gösterdikleri için kullanılmışlardır. ArcGIS'te Map Algebra aracı kullanarak her bir veri seti için ExG ve TGI indeksleri vejetasyon alanı hesaplamasının doğruluğunu bulmak amacıyla birbirinden çıkarılmıştır. Daha sonra Fuzzy Overlay aracını her iki modelin rasterlarını birleştirmek için kullanmışlardır. Sonuç olarak, her iki İHA da bitki örtüsünü büyük ölçüde tanımlamıştır. Ancak kameraların farklı spektral ve uzamsal çözünürlüğü ve her iki İHA tipinin tasarım ve uçuş parametrelerine dayalı olarak şerbetçi otu bahçesini S.O.D.A. kameralı İHA daha iyi tanımlamıştır. Ek olarak bu farklılığın; yasa kısıtlamalarına bağlı olarak iki İHA uçuşunun eş zamanlı yapılamamasından kaynaklı şerbetçi otu kanopi gölgeliklerinin farklı uzunluk ve/veya konumlarından kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. ExG ve TGI indekslerinin, kullanılan her iki kamera için şerbetçiotu bahçesi kanopi alanı tahmininde en yüksek uyuma sahip olduğunu görmüşlerdir. Ancak bu iki indeks arasında bazı farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların gölge alanlardaki renk tonu değişiminden ve kanopinin alt kısımlarındaki farklı renkte (çoğunlukla sarı) yaprakların varlığından meydana gelmiş olabileceğini söylemişlerdir. Ayrıca oluşturdukları Fuzzy modelleri, ExG ve TGI bitki örtüsü endeksleri için yeşil kanopi alanı tahminini yüksek doğrulukla yapmıştır. Bu iki indeks, %4'ten daha az bir sapma ile mahsul alanını tespit etmiştir. Bu indeksleri ve yaprak alanını, şerbetçi otu bahçelerinde ve muhtemelen de üzüm bağlarında elde etmek için pahalı multispektral kameralar yerine yüksek çözünürlüklü standart RGB kameraların kullanılabileceğini söylemişlerdir.

Stateras ve Kalivas (2020), çalışmalarında zeytin ağacı geometrisini tanımlamak için yeni teknolojileri kullanılmayı ve engebeli araziye dikilmiş doğrusal olmayan bir zeytinlikte yıllık üretimin bir tahmin modelini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Sahada 210 verimli ağaç arasından rastgele 93 tanesini seçerek ölçümler gerçekleştirmiş, taç çapı, ağaç yükseklikleri ve taç alt noktasının zeminden yüksekliklerini ölçmüşlerdir. Özellikle ağaç kanopi çapını bir ölçüm bandı kullanarak 2 yönde ölçmüşlerdir. Taç çapının ölçüldüğü noktada tepenin alt noktasının zemine olan mesafesini ve mezura ile ağaç kanopisinin en alt noktasının zemine olan düşey mesafesini ölçmüş, ortalamalarını almış ve bu sonucu zeytin ağacının taç hacmini (zemin hacmi) hesaplamak için

kullanmışlardır. Her ağacın yüksekliğini ise topografik lazer kullanarak ölçülmüşlerdir. Her ağacın üretimini hasat döneminde ölçmüş, hasat edilen meyveleri tartmış ve üretim sonucunu kilogram olarak kaydetmişlerdir. Çalışma sahasını topografyaya göre 5 farklı İHA uçuş bölgesine ayırmış ve her spektrumundan toplam 670 görüntü olacak şekilde RGB, G, R, R-edge ve NIR bantlarında görüntüleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri multispektral görüntüleri Pix4D yazılımında işlemiş, nokta bulutu, DTM, DSM, ortomozaik, NDVI tematik haritası oluşturmuş ve rasterlarını dışarı aktarmışlardır. Her zeytin ağacı için eCognition Developer yazılımıyla, Nesne Tabanlı Görüntü Analizi (OBIA) kullanarak ayrı ayrı poligonlar oluşturmuşlardır. Red ve NIR bantlarının ortomozaiklerine iki kere çok çözünürlüklü bölütleme algoritması uygulamış, toprak, gölge ve ağaç taçlarının büyük ve homojen nesnelerini bu ilk bölütlemeyle belirlemişlerdir. Nesneleri toprak, ağaç tacı, kaya ve gölge olmak üzere 4 sınıfa ayırmışlardır. Daha homojen sonuçlar elde edebilmek için ikinci olarak nesneleri zeytin ağacı tacı ve diğer özellikler olarak ayırmışlardır. Fakat OBIA algoritması birbirine yakın olan ağaçları ayrı olarak tanımlayamadığı için araştırmacılar manuel olarak düzeltmişlerdir. Zeytin ağacının hacmini hem zemin ölçümlerinden hem de hava ölçümlerinden hesaplamışlardır. ArcMap'te her bir ağaç poligonu için değişkenleri "Zonal Statistics" komutunu kullanarak hesaplamış ayrıca arazi eğimi ve yönünü DTM kullanarak çıkarmışlardır. SPSS yazılımında tanımlayıcı istatistikler (ort, min, max, CV, standart sapma, aralık), korelasyon (Pearson korelasyon katsayısıyla) ve çoklu regresyon analizi yapmışlardır. Tüm değişkenleri en iyi uyum ve sonuç için test etmiş, verim tahmin modeli oluşturmak için üretimin ağaç başına 21 kg ve daha fazla olduğu ağaçları dikkate almışlardır. Sonuçta 210 ağaçtan 205'i otomatik olarak sınıflandırılmış, ağaç taçlarının hizalanmasında nesne tabanlı görüntü analizinin etkinliğini mükemmele yakın bulmuşlardır. Ağaç tacı poligonlarını çıkarmak için DSM'den DTM'nin çıkarılması yöntemi 210 ağaçtan yalnızca 83'ünü sınıflandırarak daha kötü sonuçlar vermiştir. NDVI indeksine kıyasla DSM'de ağaç taçları daha belirgin olarak görülmüştür. Zemin ölçümleri güvenilir yükseklik verileri sağlamış, ancak taçların mültepleks şeklini tam olarak tanımlayamamıştır. Öte yandan ağaç taç alanı hava verileriyle otomatik olarak yüksek doğrulukta sınıflandırılmıştır. Arazinin topografik yapısından ötürü 5 parçaya bölmeye hata oranlarını azaltmaya çalışsalar da hava verilerinden çıkarılan yükseklik değerlerinin daha düşük doğruluk gösterdiği

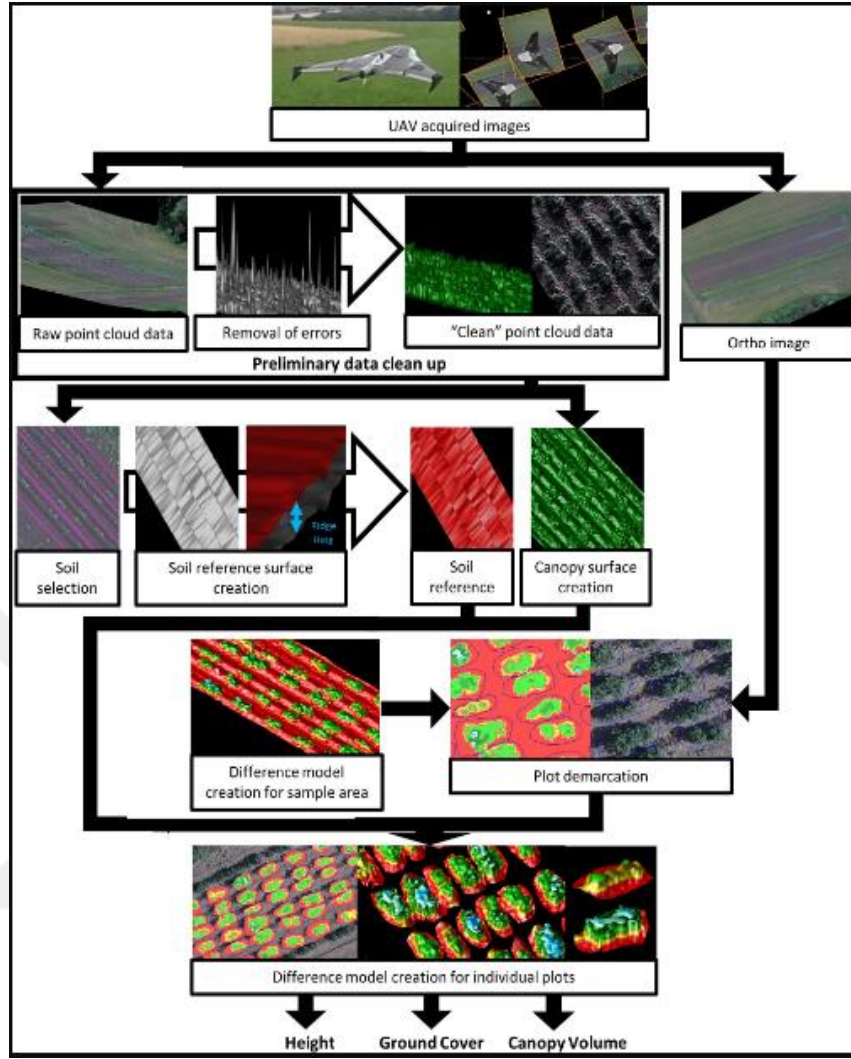
görülmüştür. Verim modeli regresyon analizinin sonucunda, verim ile eğim arasında negatif bir korelasyon görülmüş, havadan hesaplanan hacim ile verim arasında ise pozitif bir korelasyon gözlenmiştir. Ayrıca beklendiği gibi taç hacmi daha büyük olan ağaçlarda daha fazla üretim söz konusu olmuştur. Araştırmacılar, verim tahmin modellerinin çiftçilere çok faydalı olabileceğini, yetiştirme tekniklerinin yönetime katılmasının sulama ve gübreleme gibi uygulamalarda hangi ağaçlara odaklanacaklarını göstereceğini belirtmişlerdir. Çiftçilerin CBS veri tabanlarında verileri saklayarak tekniklerini geliştirmeyi, ekim için zamansal ve mekânsal olarak izlemelerini sağlayacağını bildirmişlerdir.

Chang ve ark. (2021), domates verimini tahmin etmek ve tür seçimi yapmak için çok zamanlı İHA verilerinden fenotipik özellikleri elde etmek amacıyla bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışma kapsamında kullandıkları çok zamanlı görüntüleri RGB (18 uçuş) ve multispektral kamera (8 uçuş) ile elde etmişlerdir. Tüm sezon süresince bu görüntülerden kanopi örtüsü, kanopi hacmi ve bitki örtüsü indeksleri gibi domates özelliklerini tahmin etmişlerdir. Her deneme parselini üç farklı dikim tarihinde, 4 farklı domates, plastik malç örtüleri ve 9 farklı kültivar ile kurmuşlardır. Her çeşidi ekim tarihi ve malç örtüsü başına rastgele dağıtımda üç kez çoğaltmışlardır. Her bir parselden domatesleri 3 kez hasat etmiş ve üç hasadın toplamını verim tahmin modelleri oluşturmada ve değerlendirmede kullanmışlardır. RGB ve multispektral görüntüleri Agisoft programında SfM algoritmasıyla işlemiş, coğrafi konum doğrulukları 1 pikselden az DSM ve ortomozaikler üretmişlerdir. Ürettikleri ortomozaikleri her dikim tarihi için eşit boylarda ve 4 farklı domatesi de içerecek şekilde 81 adet alt parsel bölmüşlerdir. RGB ve multispektral ortomozaik ve DSM'lerden kanopi kapsamı (Canopy Coverage- CC), kanopi hacmi (CV), ExG ve NDVI üretmişlerdir. Kanopi hacmini hesaplamak için nokta bulutlarından ürettikleri DTM'nin DSM'den çıkarılmasıyla bir CHM elde etmişlerdir. CHM'den ürettikleri kanopi hacmini piksel alanı ile çarparak kanopi hacmi verilerini elde etmişlerdir. Çok zamanlı İHA verilerinden zaman serisi özelliklerini çıkarmak amacıyla fenotipik verilerin büyüme zamanını ve hızını gösteren büyüme ve büyüme oranı eğrileri, matematiksel eğriler ve birinci türev denklemlerini kullanmışlardır. Sigmoidal ve polinom fonksiyonlarını girdilere bağlı olarak optimal eğriye uyması için benimsemişlerdir. Farklı fenotiplerin uygun eğrilerinden toplamda 22 adet fenotipik özellik çıkarılmıştır. Daha değerli

fenotipik özellikleri analiz etmek için faktör analizi uygulamışlardır. 81 domates çeşidinde verimi tahmin etmek için doğrusal regresyon kullanmışlardır, bağımlı değişken olarak gerçek domates verimini, bağımsız değişken olarak ise çok zamanlı fenotipik özellikleri seçmiş ve tahmin modelleri oluşturmuşlardır. Ek olarak, iki farklı öznelik seçim yaklaşımını (boş bir modelden başlayan ileriye dönük öznelik seçim yaklaşımı ve tam bir modelden başlayan geriye dönük öznelik eleme yaklaşımı) öznelikleri otomatik olarak seçmek ve daha anlamlı modeller geliştirmek için kullanmışlardır. Faktör analizi ile, yüksek verimli çeşitlerle ilgili “mahsul büyüme hızı” ve “mahsul büyüme zamanlaması” olmak üzere 2 faktör belirlemişlerdir. Faktör analizinin sonuçları, büyüme zamanlaması, süresi ve büyüme hızının domates verimini etkileyen ana faktörler olduğunu ve ıslah çalışmalarında çeşit geliştirme için hangi ürün özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Çalışma sonucunda, tüm verim tahmini modellerinin gerçek ve tahmini verimler ile yüksek bir korelasyon (>0.7) sergilediği görülmüştür. Geriye dönük eleme yöntemi birçok değişkene uyma eğilimi sergilediğinden, ileriye dönük öznelik seçme yönteminin daha basit ve verimli olabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca NDVI ve ExG benzer bir eğilim göstermiş, RGB görüntülerden türetilen fenotipik özelliklerin verim tahmini için daha etkili olduğu belirtilmiştir. Elde ettikleri bulgular, düşük performans sergileyen domates çeşitlerinin başarılı bir şekilde seçilmesini mümkün kıldığını göstermektedir. Çalışma sonuçlarının, yüksek verimli ve dirençli çeşitlerin seçilmesi amacıyla bitki ıslah çalışmalarında ve araştırma çiftliklerinde faydalı olabileceğini belirtmişlerdir.

Colwell ve ark. (2021), çalışmalarında düşük maliyetli bir İHA'dan elde edilen görüntülerden üretilen nokta bulutu verilerinin bitki örtüsünün 3 boyutlu yüzey modellerini oluşturmak için nasıl kullanılabileceğini göstermişlerdir. Bu anlamda, doğal alan koşullarındaki patatesten bitki büyümesi ve gelişmesini incelemek için elde ettikleri veri kümelerini modeller geliştirmek, doğrulama yapmak, büyüme parametrelerini ölçmek ve kanopi değişkenliğini değerlendirmek için kullanmışlardır. Bitki boyunu, İHA verileri toplanırken aynı günde rastgele seçilen parsellerde bir cetvel kullanarak ölçmüşlerdir. Her parseldeki 3 bitkinin her biri için bitkinin en yüksek noktasını baz almışlardır. Sahada ölçülen maksimum yükseklik verileri, İHA ile elde edilen maksimum yükseklik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Yaprak Alanı İndeksi (LAI) verilerini bir septometre kullanarak ölçmüşlerdir. Nokta bulutlarından, rüzgar kaynaklı

bitki örtüsü hareketi, yetersiz örtüşme ve gürültü gibi çeşitli sebeplerle oluşan hatalı noktaları manuel olarak temizlemişlerdir. TBC yazılımında bu nokta bulutu verilerini toprak referans yüzeyi ve kanopi yüzeyi oluşturmak için kullanmışlardır. Toprak referans yüzeyi, patatesin yerleştirildiği sırt kısımlar ve bitki örtüsü hariç tutularak oluşturulmuştur. Bu yüzeydeki her noktanın yüksekliği, yükseltilmiş bir yüzey oluşturmak için bloktaki tüm sırt kısımların ortalama yüksekliği kadar artırılmıştır. Yüzeyler oluşturulduktan sonra, her deneysel blok için fark modelleri oluşturulmuştur. Fark modellerini oluşturmak için “Tüm üçgenleri izle” ve “kesilme çizgilerini izle” gibi 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Oluşturulan bu fark modelleri, parselleri doğru bir şekilde sınırlamak için ortomozaik görüntü ile birlikte kullanılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan yüzeyler, her bloktaki alt parsellerde de kullanılmış, böylece her alt parsel için de fark modellerinin elde edilmesi sağlanmıştır (Şekil 2.10). Böylece yükseklik, zemin örtüsü ve kanopi hacmi özellikleri çıkarılmıştır. Spearman'ın sıralama korelasyon katsayısı kullanılarak alt parsel hacminin hesaplamaları karşılaştırılmıştır. Sonuçta, nokta bulutu verilerinin temizlenmesinin manuel ölçümler ile İHA verileri arasındaki tutarlılığı arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak düşük irtifa uçuşlarının daha doğru yükseklik bilgileri ürettiği üzerinde durmuşlardır. 3 tür içinde ortalama yükseklik değerlerinin maksimum yükseklik değerlerine kıyasla kanopi yükseklik dağılımını daha iyi temsil ettiğini ve daha tutarlı sonuçlar sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, fark modelleri oluşturmada kullandıkları iki yöntem arasında belirgin bir fark gözlememiş, ancak “tüm üçgenleri izleme” yöntemi daha uzun sürdüğü için “kırılma çizgilerini izleme” yönteminin kullanılmasının daha uygun olduğuna karar verilmiştir. Yaprak alanı indeksinin kanopi hacmi ve kanopi yer örtüsü ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu bulmuşlardır (Korelasyon katsayısı sırasıyla 0.50, 0.39). İHA uçuşlarından elde edilen kanopi boyutu ve şekline ilişkin birleşik bilgilerin, kanopi büyümesi ve gelişiminin modelini ve bitki büyümesinin mevcut aşamasının daha iyi anlaşılmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında seçtikleri 3 tür içinden Nadine'in tüm büyüme sezonu boyunca topladıkları verilere göre hızlı bir büyüme, olgunlaşma ve yaşlanma süreci geçiren bir çeşit olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca bu çalışmada toprak referans yüzeyi oluşturmada kullandıkları yöntem, patates gibi sırtlı mahsullere uygulanma ve değerlendirme açısından ilk çalışma olma özelliği taşımaktadır.



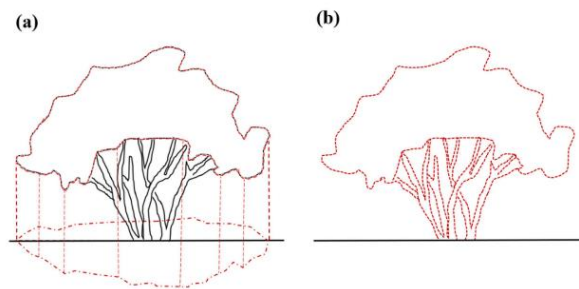
Şekil 2.10. Colwell ve ark. (2021)'nin SfM algoritması yardımıyla patatesten kanopi yapısı hakkında nicel verilerin elde edilmesi için uyguladıkları iş-akış şeması

Lu ve ark. (2021), çalışmalarında nokta bulutlarında en uygun yüzdelik yüksekliği seçerek yazlık mısır bitkisinde bitki boyunu tahmin etmeyi, nokta bulutlarından kanopi kapsamını çıkarmayı, bitki örtüsü indeksi (VI) ile bitki boyu (PH) ve kanopi kapsamının (CC) kombinasyonunun yaprak nitrojen konsantrasyonunun (Leaf Nitrogen Concentration- LNC) tahmin doğruluğunu nasıl etkileyeceğini belirlemeyi amaçlamışlardır. 2018, 2019 ve 2020'de dane dolum aşamasındaki mısır bitkisinde RGB tabanlı İHA kullanarak üç sulama ve dört nitrojen seviyesinde uygulamaya tutulan tarlaların görüntülerini 30 m irtifada elde etmişlerdir. Elde edilen görüntüleri birleştirmek ve nokta bulutu üretmek için Pix4DMapper'dan faydalanmışlardır. ENVI yazılımını kullanarak veri çıkarma ve analiz yapmışlardır. Uçuşlardan sonra, her parselden rastgele 3 bitki toplayarak cetvel yardımıyla boylarını ve yaprak alanlarını ölçmüşlerdir. LAI'yi

ve CC'yi çeşitli eşitlikleri kullanarak hesaplamışlardır. Yaprak numunelerini ise sabit bir ağırlığa gelene kadar kurutmuş ve öğütmüşlerdir. LNC'yi Kjeldahl yöntemi ile belirlemişlerdir. Bitki boyu için nokta bulutunun yüzde 99.9'luk ve 99.5'luk kesitini seçmişlerdir. CC'yi ise 2 farklı yöntem ile belirlemişlerdir. İlk yöntemde, maksimum olabilirlik yöntemi ile bitki örtüsü ve diğer nesneleri sınıflandırmışlardır. Diğer yöntemde ise, nokta bulutunun 0-30 cm'lik aralığında yabancı otlar gibi diğer nesnelerin var olduğunu saymış, CC'yi 30 cm'nin üzerindeki nokta bulutlarının sayısının toplam nokta bulutu verisine oranı olarak almışlardır. Her temsili alanın dijital değerlerini görüntülerden çıkarmışlardır. Hava ve iklimden kaynaklanan farklılıklar, R, G, B kanalların dijital değerleri (Digital Number- DN), bir referans beyaz tahtadan karşılık gelen DN değerine bölünerek elimine edilmiştir. Çalışma kapsamında GRVI, GRRI, NRI ve ARVI gibi 4 adet bitki örtüsü seçmişlerdir. LNC'yi daha iyi tahmin etmek amacıyla NRI, PH ve CC'nin farklı 4 adet kombinasyonunu (bütünleştirici bitki indeksleri) da oluşturmuşlardır. 2018 ve 2019'da elde ettikleri verileri kullanarak bitki indeksleri ve LNC arasındaki ilişkiyi incelemek için linear modelleri kullanmışlardır. Sonuç olarak, görüntü tabanlı nokta bulutu yönteminin CC'yi daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini bulmuşlardır. NRI'nın LNC'yi tahmin etmede $R^2 = 0.474$ ile GRRI, GRVI ve ARVI'ya göre daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Oluşturdukları bütünleştirici bitki indekslerinden ise NRI_{CCH} 'ın mısır LNC'si ile en yüksek korelasyonu ($R^2 = 0.716$) sergilediğini görmüşlerdir. 2020 yılının bağımsız verilerini ise LNC tahmin modellerinin fizibilitesini değerlendirmek için kullanmış, LNC tahminini doğru bir şekilde ($R^2 = 0.758, RMSE = 0.147\%$) gerçekleştirdiğini gözlemlemişlerdir. UAV tabanlı RGB görüntülerinden mahsul agronomisi değişkenlerini ve bitki indekslerini birleştirmenin LNC'yi tahmin etme potansiyeline sahip olduğunu bildirmişlerdir. Mahsul bitki boyu, kanopi kapsamı ve yaprak nitrojen konsantrasyonunun hızlı bir şekilde izlenmesinin, sulama ve gübrelemenin hassas yönetimi için esas olduğunu belirtmişlerdir.

Mao ve ark. (2021), çalışmalarında çöl çalı topluluklarında yer üstü biyokütle ve hacmi belirlemek için RGB kameralı İHA'dan yararlanarak DTM üretmek ve arka plan etkisini kaldırarak 3 tür metrik özellik (spektral indeksler, yapısal ve dokusal metrikler) çıkarmak için bir yaklaşım geliştirmişlerdir. RGB görüntülerden fotogrametrik yöntemlerle Sayısal Ortofoto Haritası (Digital Orthophoto Map) ve Sayısal Yüzey

modeli elde etmişlerdir. Kanopi yüksekliğini hesaplamakta kullacakları DTM'yi ise DOM ve DSM'ye dayalı olarak ikili sınıflandırma ve vejetasyon alanlarının zemin yüksekliği enterpolasyonu şeklinde oluşturmuşlardır. Zemin hacim ölçümleri ve 3D model arasındaki tutarlılığı belirlemek için Concordance korelasyon katsayısı hesaplanmıştır. Çalışmalarında ilk kez bilinmeyen bitki örtüsü alanlarının zemin yüksekliğinin elde edilmesi için ENVI Landsat Gap-fill aracı tanıtılmıştır. Kanopi yüksekliği daha önceki çalışmalarda da olduğu gibi DSM'den DTM'nin çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında 21 adet bitki inseksi, sekiz adet dokusal metrik ve 5 adet kanopi yapısal metrik özellikleri çıkarılmıştır. Çıkardıkları bu metriklerle göre tek ve çok değişkenli regresyon modelleri oluşturmuşlardır. Kanopinin piksel bazında hacmi için, kanopi yüksekliği ve piksel alanıyla çarpılarak elde edilmiştir. Kanopi hacminin boşluk ve bitki dokularının bir birleşimi olduğunu ancak yer üstü hacim değerinin ise bitki dokusu hacmi yansıttığını belirtmişlerdir (Şekil 2.11). Sonuçta önerilen modelde, spektral, yapısal ve dokusal metriklerin çalı AGV (Above Ground Volume) modellerine katkısı sırasıyla %86.68, %7.08 ve %6.24 olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu metriklerin AGV'nin tek boyutlu değişimini yansıttığını, hesapladıkları kanopi hacminin ise AGV'nin değişiminde ve modellemesinde önemli payı olduğunu gözlemlemişlerdir ($R^2 = 0.928$, bağıl RMSE = %26.8). Bulgular, önerdikleri yaklaşımın doğru, düşük maliyetli ve verimli bir yaklaşım olduğunu, çalı AGV'sinin izlenmesi için uygun bitki örtüsü özelliği ölçütlerinin belirlenmesinde kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 2.11. Mao ve ark. (2021)'a göre CV ve AGV arasındaki farkın gösterimi. (a) kanopi hacmi (b) toprak üstü bitki dokusu hacmi

Zeng ve ark. (2021), çalışmalarında termal, yapısal, hacimsel metrikler ve zeminde gözlemlenen yaprak alanı indeksi ve klorofil içeriği gibi çok kaynaklı gözlemlerle İHA

tarafından toplanan görüntüleri karşılaştırarak, kış buğdayı verim tahmini için RGB görüntülerin potansiyelini araştırmışlardır. Bu doğrultuda, İHA'dan türettikleri renk indekslerinin uygulanabilirliğini, verim tahmini için mahsul döngüsü boyunca LAI ve klorofil içeriğinin su stresi olmadan nitrojene tepkisini değerlendirmeyi, verim tahmini için en uygun fenolojik evreyi belirlemeyi amaçlamışlardır. Tüm nitrojen uygulamaları için tek bir aşamada gözlemlenen LAI ve bitki indeksleri arasındaki ilişkiyi ve bitki indeksleri ile tane verimi arasındaki ilişkiyi birlikte değerlendirmişlerdir. Ek olarak, çiçeklenme aşamasında elde ettikleri termal, yapısal ve hacimsel metrikler ile tane verimi arasındaki ilişkiyi de incelemişlerdir. Farklı aşamalarındaki nitrojen uygulamaları ve genotipler boyunca, LAI, renk indeksleri, kuru madde içeriği ve klorofil içeriğindeki varyasyonları nihai tane verimindeki varyasyonlarla karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Ek olarak, nitrojen uygulamaları ve genotipler boyunca tane verimi ve çoklu zamansal renk indeksleri arasındaki ilişkileri de analiz etmişlerdir. Deney alanını 48 alt parselden oluşturmuş, 3 farklı buğday çeşidi kullanmış (0.22 m arayla ekilmiş), dört tekrarlı nitrojen uygulamasına tabii tutmuşlardır. Kanopi yüksekliği (ortalama alınarak), LAI, nihai verim, kuru madde birikimi gibi alan ölçümlerini farklı büyüme aşamalarında gerçekleştirmişlerdir. İHA RGB ve termal görüntülerini ise kilit büyüme döneminde, 50 m irtifada toplamışlardır. Görüntüleri coğrafi olarak referanslandırmak için 15 adet yer kontrol noktası tesis etmiş, RTK diferansiyel GNSS cihazı ile konumlarını ölçmüşlerdir. Elde ettikleri görüntüleri Agisoft'ta işlemiş, sonuç ürünler üretmişlerdir. RGB görüntülerden elde ettikleri dijital sayı değerlerini yansıma verilerine dönüştürmüş, RGB görüntüleri kalibre etmek için beyaz tahta (referans paneli) kullanmışlardır. Termal görüntülerden elde ettikleri dijital sayı değerlerini üretici tarafından sağlanan denklemi kullanarak kanopi sıcaklığı değerlerine dönüştürmüşlerdir. İHA tarafından toplanan termal verilerle bir radyometreden elde ettikleri verileri kıyaslamış, $R^2 = 0.935$ değeri ile İHA sonuçlarının güvenilir olduğunu kanıtlamışlardır. DEM ve DSM üretmiş, aralarındaki piksel bazında farkı alarak her örnekleme günü için CHM elde etmişlerdir. CHM'ye dayalı olarak piksel bazında kanopi hacmini, piksel alanı ile İHA'dan elde edilen kanopi piksel yüksekliğini çarparak hesaplamışlardır. Ayrıca bir yoğunluk faktörü tanıtarak, bitki örtüsü indeksi ağırlıklı bir CVM_{VI} önermişlerdir. Görüntülerden türetilen bitki boyu, piksel alanı ve yoğunluk faktörü olarak bitki indekslerini çarparak CVM_{VI} 'yı hesaplamışlardır. RGB ortomozaiklerden ise biyokütle

ve verim tahmini için bir dizi ortak renk indeksini (17 adet) hesaplamışlardır. SVM'ye dayalı olarak toprak arka plan etkilerini kaldırmış, "Zonal Statistics" aracını kullanarak her nokta ve tarih için buğday kanopisinin ortalama indekslerini elde etmişlerdir. Doğrusal regresyon kullanarak görüntü değişkenleri ve mahsul parametreleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Sonuç olarak, sapa kalkma, çiçeklenme ve erken olgunlaşma aşamalarında toplanan bazı renk indekslerinin tane verimi ile yüksek korelasyon ($R^2 = 0.76 - 0.93$) sergilediğini görmüşlerdir. Özellikle GRVI (analizler için seçilen), GRRI, NDI, ExR ve VARI tane verimiyle ortalama olarak $R^2 = 0.7$ ile en yüksek korelasyonu göstermiştir. En yüksek tahmin değeri ($R^2 = 0.92 - 0.93$), dört farklı seviyedeki nitrojen uygulaması altındaki çiçeklenme aşamasında elde edilmiştir. Kanopi sıcaklığı, hacimsel metrikler ve klorofil içeriği gibi diğer ölçümler tane verimiyle daha düşük korelasyon ($R^2 = 0.52 - 0.85$) sergilemiştir. Hacimsel metriklerin renk indeksleri ile birleştirilmesinin tane verim tahminini çok az iyileştirdiği görülmüştür. LAI, çiçeklenme aşamasında aynı seviyede nitrojen uygulaması için tane verimi tahmininde renk indekslerine göre daha düşük korelasyon ($R^2 = 0.00 - 0.40$ ve $R^2 = 0.55 - 0.68$) sergilemiştir. Renk indeksleri, tüm nitrojen seviyelerinde çiçeklenme aşamasındaki LAI'den biraz daha iyi verim tahmini sağlamıştır. Araştırmacılar bu çalışma ile, renk indekslerinin tahmin yeteneği vurgulamış, İHA'lerden elde edilen RGB görüntülerle hassas tarım uygulamalarında verim tahmini için maliyeti düşük bir yöntem sunmuşlardır.

Qiao ve ark. (2022), çalışmalarında LAI tahmininin doğruluğunu arttırmak amacıyla mısır bitkisinin altı büyüme aşamasındaki morfolojik bilgilerinin (kanopi hacmi, boyu ve kapsama alanı) ve spektral bilgilerinin beraber incelenmesi ve morfolojik özellikler, bitki indeksleri ve LAI arasında en uygun modelin belirlenmesi üzerinde durmuşlardır. Çalışma alanında 6 farklı seviyede nitrojen uygulaması yapılmıştır. İHA görüntüleri 5 bantlı multispektral kameradan elde edilmiştir. İHA görüntülerinin alınmasıyla eş zamanlı olarak LAI, bitki yüksekliği ve GPS konum bilgileri gibi yersel verileri de elde etmişlerdir. İHA görüntüleri ve yer kontrol noktaları kullanılarak Pix4DMapper'da ortofoto ve DSM üretilmiştir. 5 bantlı ortofotolar üzerinde gürültü giderme, bant kaydı, radyasyon kalibrasyonu ve arka plan çıkarımı yapmışlardır. Mısır ekiminden sonra mutlak toprak yüzeyini temsil etmesi için DEM çıkarmışlardır. Ardından ArcGIS yazılımında DSM'den DEM çıkarılarak kanopi yüksekliği elde etmek amacıyla CSM

(Crop Surface Model) hesaplamışlardır. Ardından tarlada elde ettikleri yükseklik verileriyle hesaplanan yükseklik verilerini karşılaştırmışlardır. Kanopi kapsamını hesaplamak için kanopiye ait pikseller 1 değerine, toprak verisi içeren pikseller ise 0 değerini temsil edecek şekilde ayarlanmıştır. NDVI için eşik değeri olarak 0.5 seçilmiştir. Kanopi kapsamı (CC), vejetasyon içeren piksellerin sayısının bütün görüntü pikseli sayısına oranı olarak hesaplanmıştır. Kanopi hacmi ise kanopi kapsamı ve kanopi boyunun çarpımı olarak hesaplanmıştır. Radyometrik kalibrasyon yapıldıktan sonra spektral görüntünün dijital sayı değeri yansımaya dönüştürülmüştür. Mahsulün ve arka planın spektral yansıtma özelliklerine göre toprak arka planı kaldırılmış ve mısır kanopisinin ortalama yansıma değeri alınmıştır. VARI ve NDVI bitki indeksleri LAI tahmin modeli için hesaplanmıştır. Bitki indeksleri ve morfolojik özellikler birleştirilmiş ve kısmi en küçük kareler regresyon yöntemi sürecini gerçekleştirmek için Matlab kullanılmıştır. Her farklı büyüme dönemi için 72 örnek değer 2/3'ü eğitim veri seti, 1/3'ü ise doğrulama veri seti olarak kullanılmıştır. Karesel ortalama hata ve determinasyon katsayısı tahmin modelin doğruluğunu test etmek için kullanılmıştır. İHA'dan elde edilen kanopi alanı, kanopi boyu ve kanopi hacmi gibi parametrelerin ve kanopi spektral bilgilerinin LAI tahmin etmede başarılı olduğunu kanıtlamışlardır. Ayrıca bu birleşimin LAI tahmin doğruluğunu iyileştirebileceğini ve mahsul büyüme aşamalarında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Sangjan ve ark (2022), çalışmalarında RGB ve beş bantlı multispektral kamera ile donatılan İHA'lar kullanarak kış bezelyesinin yer üstü biyokütlesini 3 yöntem kullanarak tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu yöntemler bitki örtüsü indeksleri, Sayısal Yüzey Modelinden çıkarılan özellikler ve 3 boyutlu modelden çıkarılan özellikler olarak sıralanabilir. Çalışmalarında özellikle toprak yüzeyinden ve yabancı otlardan bitki örtüsü nokta bulutlarını bölümlere ayırmayı, alt parsellerin nokta bulutlarını yeniden oluşturmayı, RGB tabanlı görüntülerden nokta bulutlarını kullanarak dijital özellikleri çıkarmayı ve yer üstü biyokütleyi hesaplamak için 3 farklı tekniğin potansiyelini araştırmayı hedeflemişlerdir. Avusturya kış bezelyesi, tohum verimi için yetiştirilen, örtü bitkisi bezelyesi ise biyokütleyi maksimuma ulaştırmak için özel olarak yetiştirilen genotiplerdir ve bu çalışmada 3 tür bitki yetiştirme denemesi yapılmıştır. İHA uçuş yüksekliğini 10 m ve 20 m olarak seçmiş ve farklı tarihlerde uçuşlar gerçekleştirmişlerdir. Zemin referans verisi oluşturmak amacıyla 3 temsili bitkinin

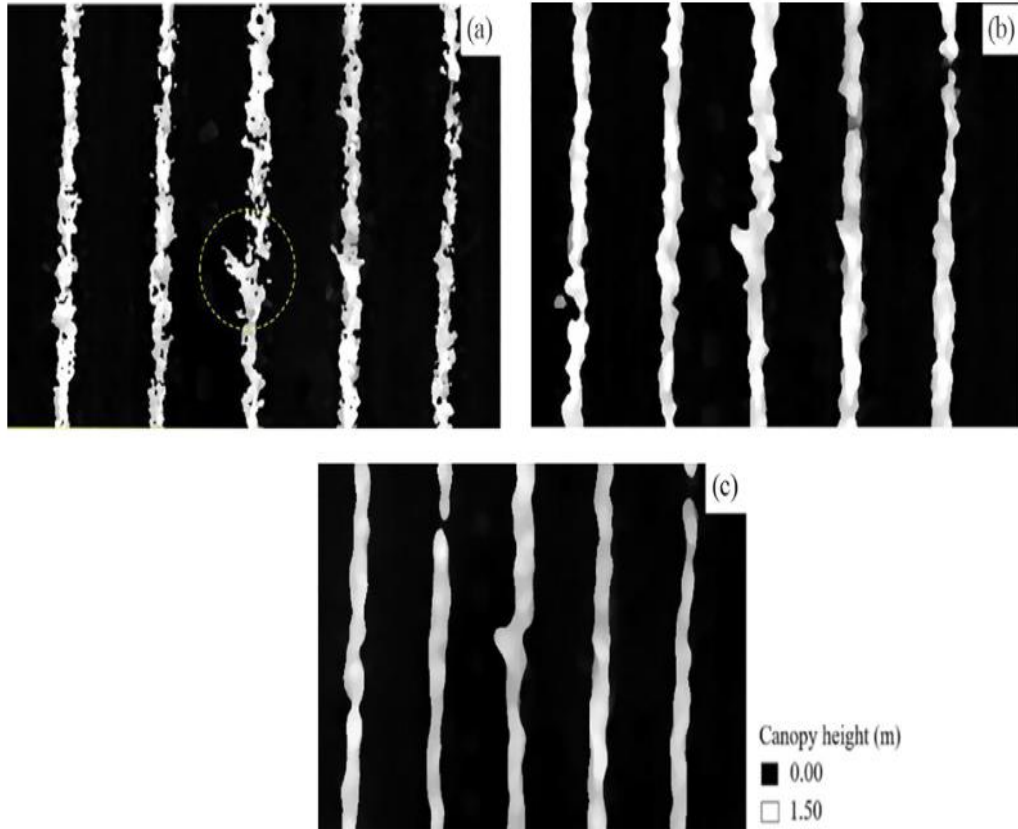
ortalama kanopi yüksekliği ölçölmüş ve bu bitkiler zemin seviyesinde kesilerek taze ağırlıkları tartılmıştır. Ayrıca kuru biyokötle de benzer şekilde bitkinin fizyolojik olgunluk evresinde elde edilmiştir. RGB ve multispektral görüntöler Pix4DMapper’da işlenmiş, DSM, nokta bulutu ve ortomozaikler üretilmiştir. Elde edilen bu 3 ham veri dijital özellikleri çıkarmak için işlenmiştir. 12 adet bitki örtüsü indeksi multispektral görüntölerden yer üstü biyokötleyle hesaplamak için çıkarılmıştır. SAVI indeksini kullanarak toprak maskesi katmanını oluşturmuş, bu katmanı her bitki örtüsü görüntüsünden toprak katmanını çıkarmak için kullanmışlardır. Alt parselleri, kanopi hacminin tahmin edildiği alan ve aynı alandan alınan zemin referans verilerine karşılık gelecek şekilde şekillendirmişlerdir. Daha sonra parsel segmentasyon şekil dosyası geliştirilen algoritmaya aktarılmıştır. Ardından her bir bitki örtüsündeki her alt parsel için ortalama, maksimum, toplam, standart sapma, 95. Yüzdelik, 90. Yüzdelik ve 85. Yüzdelik (95P, 90P ve 85P olarak adlandırılan bitki örtüsü indeksi görüntülerinden toprak çıkarma işleminden sonra verilerin %5, %10 ve %15’i çıkarıldıktan sonra elde edilen en yüksek veri değerleridir), toplam alan ve mahsul alanı gibi görüntü özellikleri çıkarılmıştır. Mahsul kapsama alanı ile görüntü özelliği verilerinin çarpılmasıyla bitki indeksi tabanlı kanopi hacmi verilerini hesaplamış ve taze yer üstü biyokötleyle tahmin etmede kullanmışlardır. RGB tabanlı görüntölerden üretilen DTM’nin DSM’den piksel bazında çıkarılmasıyla Kanopi Yükseklik Modelini (CHM) oluşturmuşlardır. 0.05 m seviyesinde bir eşik katmanı oluşturarak bu değer altında kalan yabancı otları ve diğer güürötlöleri kaldırmışlardır. Parsel segmentasyon şekil dosyasını CHM katmanıyla birlikte kullanarak kanopi yükseklik verilerini elde etmişlerdir. Mahsul alanı ile kanopi yüksekliği verilerini çarparak kanopi hacmini hesaplamışlardır. 3B modelden ise kanopi hacmini hesaplamak için ilk olarak nokta bulutlarından istenmeyen verileri temizlemişlerdir. RGB ortomozaik görüntölere nesne tabanlı görüntü analizi tekniği uygulayarak bezelyelerin sınıflandırılmasını sağlamışlardır. Bezelye görüntüsü üzerindeki nesneleri bölmek ve sınıflandırmak için Havza Bölötleme (Watershed Segmentation) algoritmasını uygulamışlardır. Her parsel için kanopi hacmini hesaplamak için üç tip 3D rekonströksiyon modeli oluşturmuşlardır. Kullanılan 3 teknik ile referans veriler arasında korelasyon analizi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, RGB tabanlı nokta bulutlarından geliştirilen 3D modelden (alfa şekli, $\alpha = 1.5$) tahmin edilen kanopi hacminin, taze yer üstü biyokötle ($r = 0.78 - 0.81, p < 0.001$) ve

kuru yer üstü biyokütlesi ($r = 0.70 - 0.81, p < 0.001$) ile tutarlı ve yüksek korelasyon sağladığını göstermiştir. İki farklı uçuş irtifasında, iki farklı işleme tekniği (DSM ve nokta bulutu) ile elde edilen kanopi yükseklik verilerini zemin referans verileri ile kıyaslamış, DSM tabanlı tekniklerin 95P’de kanopi boyunun zemin referans verileriyle yüksek korelasyon ($r = 0.71 - 0.95, p < 0.001$) sergilediğini görmüşlerdir. Bitki indeksi tabanlı 90P ve ortalama NDRE taze yer üstü biyokütle ile yüksek korelasyon ($r = 0.55 - 0.86, p < 0.001$) sergilemiştir. Ayrıca RGB görüntülerden türetilen nokta bulutlarının sayısı ve doğruluğunun LIDAR’a kıyasla az olduğunu ancak RGB sistemlerin ucuz olduğu için tercih edildiklerini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, RGB görüntülerden türetilen nokta bulutlarının kalitesinin uçuş parametrelerinin optimize edilmesiyle iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Ek olarak biyokütleyi görüntü işleme ve analiz yöntemleriyle doğrudan hesaplayabildikleri için karmaşık makine öğrenme yöntemlerinin yerine kullanılabilir olduğunu vurgulamışlardır.

Sinha ve ark. (2022), çalışmalarında yer tabanlı ölçümlerin kanopi algılama ve öznetelikleri tahmin etmede zahmetli bir yöntem olduğu, saha verilerinin toplanmasının zor ve analizinin karmaşık olması nedeniyle İHA fotogrametrisine dayalı bir yöntemi araştırmışlardır. Bu yöntemde asma ve elma kanopileri için ağaç-sıra-hacmi (Tree-Row-Volume- TRV), yaprak-duvar-alanı (Leaf-Wall-Area- LWA), kanopi hacmi (CV), kanopi kapsamı (CC) özelliklerini tahmin etmeye çalışmış, zemin bazlı ölçümlerle karşılaştırma yapmış, kanopi büyüme ve değişim haritaları oluşturmuşlardır. Çalışma kapsamında RGB sensöre sahip bir İHA kullanmış olup, farklı uçuş irtifalarında verilerini elde etmişlerdir. Zemin ölçümleri için 12 elma ağacını ve 18 asmayı rastgele seçmişlerdir ve kanopi maksimum yüksekliğini ve genişliğini metre kullanarak ölçmüşlerdir. Elde ettikleri değerleri ise TRV ve LWA’yı hesaplamak için kullanmışlardır. Kanopi hacmini hesaplamak için her bir asmayı/elma ağacını küboid şeklinde kabul etmiş ve maksimum kanopi genişliği, maksimum kanopi yüksekliği ve kanopi uzunluğunun çarpımı olacak şekilde kanopi hacmini hesaplamışlardır. Elde edilen İHA görüntüleri Pix4D ile birleştirilmiş, ortomozaik ve DSM’ler üretilmiştir. QGIS yazılımında ise “georeferencer” aracını kullanarak coğrafi referanslama işlemini gerçekleştirmişlerdir. AUTOCAD’de ise “rectangle” komutunu kullanarak elma ağaçları ve asmalar için ROI’ler (Region of Interest) oluşturmuş, ROI uzunluğunu elmalar için 2 m ve asmalar için 1.5 m olarak belirlemişlerdir. CC tahmini için ise ROI

uzunluğunu 3 m olarak belirlemişlerdir. DTM'yi çıplak toprak noktaları üzerindeki yükseklik gözlemlerinin enterpolasyonu şeklinde oluşturmuşlardır. Ardından DSM'den DTM'yi çıkararak CSM elde etmişler ve bunu kanopi yüksekliği, genişliği, kanopi alanı, kanopi hacmi, TRV ve LWA'yı tahmin etmek için kullanmışlardır. Kanopi yüksekliğini elde etmek için kordon yüksekliği CSM'den çıkarılmıştır. Elma yüksekliğini elde etmek için en alttaki telin yüksekliği CSM'den çıkarılmıştır. Her iki mahsul kanopisi için, QGIS'teki "bölgesel istatistikler" aracını kullanarak her bir ROI için ortalama ve maksimum yükseklik değerlerini çıkarmışlardır. Ortalama kanopi yüksekliği değerleri ile CC'yi çarparak kanopi hacmini elde etmişlerdir. Zemin ölçümleri ve İHA tahminleri arasındaki ilişkiyi anlamak için doğrusal regresyon ve korelasyon analizi yapmışlardır. Farklı uçuş irtifaları ve sensör eğimi için ayrı regresyon modelleri kullanmış ve en yüksek R^2 değerine göre en iyi modeli seçmişlerdir. TRV, LWA ve CV için temel haritaları, en yüksek R^2 değerine sahip en uygun modeli baz alarak oluşturmuşlardır. Sonuçta, asma için yer ölçümleri ve hava tabanlı tahminler arasında uçuş yüksekliği 15 m ve 65° sensör eğiminde yükseklik $r = 0.87$ ve genişlik $r = 0.86$ ile yüksek korelasyon gözlemişlerdir. Daha yüksek uçuş irtifaları için korelasyonun azaldığını, ayrıca asmalar için 15 m'deki uçuşun kanopi detaylarını daha iyi yakaladığı görmüşlerdir (Şekil 2.12). TRV ve LWA arasındaki linear ilişki 15 m uçuş yüksekliğinde 65° sensör eğiminde $R^2 = 0.77$ ile en yüksek değeri vermiştir (45 ve 60 m'de $R^2 < 0.15$). Bu sonuçlar, ince dalları veya büyük boşlukları olan mahsuller için havadan görüntüleme yaklaşımlarını kullanarak kanopi büyümesini ölçmek için yüksek çözünürlüklü verilere ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Hava ölçümleri için tahmin edilen kanopi hacmi 15 m irtifada yer ölçümleri ile $R^2 = 0.43$ değeriyle doğrusal olarak ilişkili bulunmuştur. CC'nin hava tahminleri ile zemin ölçümleri arasında ise $R^2 = 0.61$ ile iyi bir uyum gözlenmiştir. Elma ağaçları içinse yer ölçümleri ve hava tabanlı tahminler arasında uçuş yüksekliği 15 m ve 65° sensör eğiminde yükseklik $r = 0.93$ ve genişlik $r = 0.93$ ile yüksek korelasyon sergilemiştir. Genel olarak asma kanopilerine kıyasla elma kanopileri için zemin ölçümleri ile daha yüksek R^2 değerleri gözlenmiştir. Elma kanopileri için 30 m uçuş irtifasında TRV ve LWA için anlamlı bir ilişki gözlemlenmiştir (sırasıyla $R^2 = 0.82$ ve $R^2 = 0.86$). Hava ölçümleri için tahmin edilen kanopi hacmi yer ölçümleri ile $R^2 = 0.64$ değeriyle doğrusal olarak ilişkili bulunmuştur. Asmalara benzer şekilde elma kanopileri için CC'nin hava tahminleri (30

m irtifa) ile zemin ölçümleri arasında $R^2 = 0.68$ ile iyi bir uyum gözlenmiştir. Asma kanopileri için LWA tahmininde 65° sensör eğiminin daha ideal olduğu ancak elma gibi uzun bir mahsulde TRV ve LWA tahmini için daha yüksek bir sensör eğiminin (bu çalışma için 75°) daha iyi tahmin değerleri sağlayabileceğini bildirmişlerdir. Ancak kanopi tahmininin sensör eğimiyle ilgili ilişkisi üzerinde bir araştırma bulunmadığını belirterek bu konu üzerinde durulması gerektiğini bildirmişlerdir. Ayrıca uyguladıkları yöntemin CC ve CV tahmini için kanopide var olan boşlukları dikkate almadığını belirtmişlerdir. Kanopi parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesinin sulama uygulamaları, hassas kimyasal uygulamalar ve mahsul üretim yönetimi çalışmaları (budama vb.) için oldukça önemli olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.12. Sinha ve ark. (2022)'nın asmalarda farklı uçuş yükseklikleri için oluşturdukları mahsul yüzey modellerinin karşılaştırılması (sırasıyla 15 m, 30 m, 45 m)

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Çalışma alanı

Bu tezde çalışma alanı olarak, Antalya ili Kepez ilçesi Gaziler Mahallesi'nde yer alan bir tarım arazisi (Şekil 3.1) seçilmiştir. Seçilen bu arazi Gaziler caddesinde yola cepheli olup etrafında birçok tarım arazisi ve sera bulunmaktadır. Arazi üzerinde maydanoz (*Petroselinum crispum*) bitkisi ekili olup (Şekil 3.2), maydanozlar damla sulama sistemi ile sulanmaktadır ve arazi yaklaşık olarak 3.5 dönümdür. Çalışma yapılmadan önce arazi sahibinin izni alınmış olup, yapılacak uygulama hakkında kendisine bilgi verilmiştir.



Şekil 3.1. Uygulama için seçilen çalışma alanının Google Earth görüntüsü



Şekil 3.2. Arazi üzerinde ekili olan maydanoz bitkisi

3.1.2. DJI Phantom 4 RTK insansız hava aracı

Bu çalışma kapsamında görüntülerin elde edilmesinde kullanılmak üzere DJI Phantom RTK İnsansız Hava Aracı (Şekil 3.3) seçilmiştir. RTK'lı İHA'lardaki temel prensip zemindeki sabit GNSS alıcısı ile İHA'nın eş zamanlı olarak uydu gözlemleri yapması, RTK düzeltmelerinin İHA'ya kesintisiz bir şekilde aktarılmasıdır, böylelikle fotoğraf orta noktalarının konumları yüksek bir hassasiyetle hesaplanmış olmaktadır.

DJI Phantom RTK'nın haritalama doğruluğu, dijital ortofoto sınıfı için ASPRS Doğruluk Standartlarının gerekliliklerini karşılamaktadır. Bu doğruluk, etraftaki aydınlatma ve modellere, hava aracı yüksekliğine, kullanılan harita yazılımına ve çekim

esnasındaki diğer etkenlere bağlıdır. Yer örnekleme mesafesi, $(H/36.5)$ cm/piksel ile belirlenmektedir. Buradaki H, hava aracının çekim sahnesine göre yüksekliğini temsil etmektedir. Tek bir uçuş için çalışma alanı maksimum 1 km^2 'dir. RTK yatay pozisyon duyarlılığı $1\text{cm} + 1\text{ppm}$, RTK dikey pozisyon duyarlılığı $1.5\text{cm} + 1\text{ppm}$, fotogrametrik modellerde kesin yatay duyarlık 5 cm'dir (100 m irtifada, GSD 2.7 cm, güneşli hava). 1 ppm, hatanın hava aracından gelen her 1 km harekette 1 mm artış olduğu anlamına gelir.



Şekil 3.3. DJI Phantom 4 RTK insansız hava aracı

Tablo 3.1. DJI Phantom 4 RTK teknik özellikleri

Kalkış Ağırlığı	1391 gram
Çapraz Mesafe	350 mm
Maksimum Çıkış Hızı	6 m/s (otomatik uçuş); 5 m/s (manuel kontrol)
Maksimum İniş Hızı	3 m/s
Maksimum Hız	31 mph (50 kph) (P-modu) 36 mph (58 kph) (A-modu)
Maksimum Uçuş Süresi	Yaklaşık 30 dk
Çalışma Sıcaklık Aralığı	0°C-40°C
Çalışma Frekansı	2.400 GHz- 2.483 GHz (Avrupa, Japonya, Kore) 5.725 GHz- 5.850 GHz (ABD, Çin)
Deniz Seviyesi Üzerinde Max Servis Tavanı	19685 fit (6000 m)
İletim Gücü (EIRP)	2.4 GHz CE (Avrupa)/MIC (Japonya)/KCC (Kore): <20 dBm 5.8 GHz SRRC (Çin)/FCC (ABD)/NCC (Tayvan, Çin): <26 dBm
Hover Doğruluk Aralığı	*RTK etkin ve düzgün çalışıyor: Dikey: ± 0.1 m ; Yatay: ± 0.1 m *RTK devre dışı Dikey: ± 0.1 m (görüş konumlandırılmalı); ± 0.5 m (GNSS konumlandırılmalı) Yatay: ± 0.3 m (görüş konumlandırılmalı); ± 1.5 m (GNSS konumlandırma ile)
Görüntü Konumu Ofseti	Kamera merkezinin konumu, uçak gövdesinin eksen altındaki yerleşik D-RTK anteninin faz merkezine göre: (36, 0 ve 192 mm) EXIF verilerindeki görüntü koordinatlarına zaten uygulanmıştır. Uçak gövdesinin pozitif x, y ve z eksenleri, sırasıyla, uçağın ileri, sağa ve aşağı yönüne işaret eder.

İHA'nın manuel ya da otonom olarak kontrol edilebilmesi bir kumanda (Şekil 3.4) tarafından sağlanmaktadır. Kumandalar İHA'lar ile sürekli bir iletişim halinde olup, pil

durumu, sinyalin kalitesi, hız ve yükseklik vb. gibi telemetri bilgilerini anlık olarak ekranda göstermektedir. Kumandalarda uçuşun programlanması ve yürütülmesi için gerekli yazılımlar yüklüdür. Çalışma kapsamında kullanılan İHA'nın kumandasında GS Pro uygulamasına benzer yeni bir GS RTK uçuş planlama uygulaması yüklüdür. Geleneksel uçuş modunun yanı sıra, Photogrammetry ve Waypoint Flight planlama modları ile cihazın daha etkin bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmış, kamera parametreleri, uçuş hızı, yüksekliği ve uçuş güzergahı belirlenmesi gibi pek çok haritalama işlevi kullanıcılara sunulmuştur. Uygulamada yeni bir obtüratör önceliği modu ve olumsuz hava koşullarında pilotları uyarmak amaçlı rüzgar alarmı da bulunmaktadır.



Şekil 3.4. DJI Phantom 4 RTK kumandası

Tablo 3.2. DJI Phantom 4 RTK kumandası teknik özellikleri

Çalışma Frekansı	2.400 GHz- 2.483 GHz (Avrupa, Japonya, Kore) 5.725 GHz- 5.850 GHz (Diğer ülkeler / bölgeler)
EIRP	2.4 GHz CE / MIC / KCC: <20 dBm 5.8 GHz FCC / SRRC / NCC: <26 dBm
Maksimum İletim Mesafesi	FCC / NCC: 4.3 mil (7 km); CE / MIC / KCC / SRRC: 3.1 mil (5 km) (Engelsiz, parazitsiz)
Yerleşik Batarya	6000 mAh LiPo 2S
Çalışma Akımı/Gerilimi	1.2 A @ 7.4 V
Mobil Cihaz Tutucu	Tablet / Akıllı Telefonlar
Çalışma Sıcaklığı	32°- 104° F (0°- 40° C)

DJI Phantom 4 RTK Kamerası 1 inç, 20 megapiksel CMOS sensörüne sahiptir (Şekil 3.5). Mekanik obtüratör sayesinde sabit ve hareketli nesneleri sorunsuz bir şekilde yakalayabilmektedir. Yüksek çözünürlüğü sayesinde 100 m uçuş mesafesinde 2.74 cm’lik bir yer örnekleme aralığı elde edebilmektedir. Doğruluğun arttırılması için her bir kamera merceği distorsiyonların ölçüldüğü kalibrasyon testlerinden geçer ve toplanan bozulmalar her fotoğrafın metaverilerine kaydedilir. Ek olarak Phantom 4 RTK TimeSync sistemine sahiptir. TimeSync ile uçuş denetleyicisi, kamera ve RTK modülü sürekli olarak hizalandırılmaktadır. TimeSync ile her fotoğrafın en doğru metaverileri kullanılması sağlanır ve konumlandırma verileri CMOS'un merkezine sabitlenir, sonuçlar fotogrametrik yöntemlerden optimize edilir ve görüntü cm düzeyinde konumlandırma verilerine erişilir.

Tablo 3.3. Kamera teknik özellikleri

Sensör	1" CMOS; Etkili pikseller: 20 M
Lens	FOV 84° ; 8.8 mm / 24 mm (35 mm format eşdeğeri:24 mm); f/2.8 - f/11, 1 m'de otomatik odaklama- ∞
ISO Aralığı	Video:100-3200(Otomatik) 100-6400(Manuel) ; Fotoğraf:100-3200(Otomatik) 100-12800(Manuel)
Mekanik Deklanşör Hızı	8- 1/2000 sn
Elektronik Deklanşör Hızı	8- 1/8000 sn
Maksimum Görüntü Boyutu	4864×3648 (4:3); - 5472×3648 (3:2)
Video Kayıt Modları	H.264, 4K : 3840×2160 30p
Fotoğraf Formatı	JPEG
Video Formatı	Hareket
Desteklenen Dosya Sistemleri	FAT32 (≤ 32 GB); - exFAT (> 32 GB)
Desteklenen SD Kartlar	MicroSD, Maksimum Kapasite: 128 GB. Sınıf 10 veya UHS-1 derecelendirmesi gerekli Yazma hızı ≥ 15 MB/sn
Çalışma Sıcaklık Aralığı	32° ile 104° F (0° ile 40°C)



Şekil 3.5. DJI Phantom 4 RTK kamerası

3.1.3. Tez çalışması kapsamında kullanılan yazılımlar

DroneDeploy, OpenMVG, VisualSFM, Autodesk ReCap, Pix4D, Agisoft Metashape, Reality Capture, 3DF Zephyr, 3D Survey gibi pek çok haritalama ve 3 boyutlu modelleme yazılımı bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında İHA fotogrametrisi için geliştirilen Pix4DMapper ve Agisoft Metashape yazılımları tercih edilmiştir. Bitki boyu ve hacim hesaplaması için Quantum GIS yazılımı tercih edilmiştir. Verilerin karşılaştırılması içinse SPSS istatistik yazılımı kullanılmıştır.

3.1.3.1. Agisoft Metashape

Agisoft Metashape (Agisoft PhotoScan olarak da bilinir), dijital görüntülerin fotogrametrik işlemlerini gerçekleştiren ve CBS uygulamalarında, kültürel miras dokümantasyonunda ve görsel efekt üretiminde ve ayrıca çeşitli ölçeklerdeki nesnelerin dolaylı ölçümlerinde kullanılmak üzere 3 boyutlu uzamsal veriler üreten bağımsız bir yazılım ürünüdür (Agisoft, 2021). Agisoft Metashape, makine öğrenmesi tekniklerine dayanmaktadır. Çoklu kamera sistemlerinin yanı sıra, RGB, termal ve multispektral kamera görüntülerini işleyebilmektedir. Görüntü işleme sonucunda, yoğun nokta bulutu, 3D modeller, georeferanslandırılmış ortomozaikler ve Sayısal Yüzey Modeli-Sayısal Arazi Modeli gibi sonuç ürünler üretmek İHA fotoğraflarının işlenmesinin temel amacıdır. Ayrıca daha gelişmiş process ile modellerdeki doku ve gölgeleri ortadan kaldırmaya, bitki örtüsü indeks değerlerini hesaplamaya, tarım ekipmanları eylem haritaları için bilgi çıkarmaya ve yoğun nokta bulutlarını otomatik olarak sınıflandırmaya izin vermektedir. Ayrıca veri işleme hızı oldukça yüksektir ve Agisoft Metashape ile son derece tutarlı ve doğru sonuçlar elde etmek mümkündür. Ek olarak Agisoft Metashape ile 50000'den fazla fotoğrafı işlemek mümkündür.

Agisoft Metashape'te görüntü işlemenin ilk adımı kamera yöneltmesidir. Bu adımda fotoğraflardaki ortak noktalar aranır ve eşleştirilir, her resim için kamera konumu bulunur ve kamera kalibrasyon parametreleri belirlenir. Agisoft yazılımında genel işlem adımları şu şekilde gerçekleştirilmektedir;

- Fotoğrafların yazılıma yüklenmesi, incelenmesi ve varsa gereksizlerin kaldırılması
- Fotoğraf koordinat sisteminin tanımlanması

- Fotoğrafların align edilmesi (hizalanması), seyrek nokta bulutu üretimi
- YKN'lerin yazılıma aktarılması ve fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi
- Yoğun nokta bulutu üretilmesi
- 3B model ve doku üretilmesi
- Bölünmüş model oluşturma
- Sayısal Yüzey, Sayısal Yükseklik, Sayısal Arazi Modeli oluşturma
- Ortomozaik üretme
- Sonuç raporu üretme

Üretilen sonuç raporu içerisinde; görüntülere ait kamera konumları, bindirme oranları, görüntü sayısı, fotoğrafların kapladığı alan, bağ noktası sayısı gibi ölçme verilerine ait bilgiler, kamera kalibrasyon katsayıları ve korelasyon matrisi tablosu, kamera konum bilgileri ve hata miktarları, YKN'lerin dağılımı ve hata miktarları, Sayısal Yükseklik Modeli, okunan ve işlenen görüntü sayısı, YKN ve Kontrol Noktası (KN) sayısı, koordinat sistemi, dönüklük açıları, doğruluk, key point- tie point limitleri gibi processing parametreleri, kullanılan versiyon bilgisi, toplam process süresi gibi çeşitli bilgiler barındırılmaktadır.

3.1.3.2. Pix4DMapper

Pix4DMapper, profesyonel drone haritalaması için kullanılmakta olup, tüm hava ve yer fotoğraflarını doğru ve coğrafi referanslı harita ve 3B modellere dönüştürmektedir. Ayrıca araziden alınacak görüntülerin elde edilmesi için uçuş planlaması yapılmasına da imkan vermektedir. Yazılım, herhangi bir kamera ya da drone ile yakalanmış RGB, termal ve multispektral görüntüleri hatta videoları bile işlemeye izin vermektedir. Çıktı ürünler olarak renkli nokta bulutları, ortomozaikler, Sayısal Yüzey Modelleri, Sayısal Arazi Modelleri, 3B modeller, indeks haritaları, yansıtma haritaları ve termal haritalar gibi pek çok şey üretmektedir. Pix4D yazılımında Sayısal Yükseklik Modeli üretmek için kullanılan iki yöntem “Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon (Inverse Distance Weighting)” ve “Üçgenleme (Triangulation)” yöntemleridir. Tarım arazileri gibi düz sahalarda Triangulation (üçgenleme) yönteminin kullanımı tavsiye edilmektedir. Pix4DMapper’da fotogrametrik analiz ile cm altı hassasiyetle sonuçlar elde edilebilmektedir. Uzaklık, alan ve hacim ölçümünü kolay ve yüksek hassasiyetle yapabilmek mümkündür. Yazılım, makine öğrenimi ile nesneleri önceden tanımlanmış

5 farklı grupta sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmanın sonucunu, Sayısal Arazi Modeli üretiminde kullanır. 2 ve 3 boyutlu YKN'ler, Kontrol Noktaları ve manuel bağlama noktaları yüksek doğrulukla eklenebilir ve düzenlenebilir. Tüm veri işleme süreci sonucunda kalite raporu üretilebilir (Pix4D, 2022).

Pix4DMapper yazılımında genel işlem adımları şu şekilde gerçekleştirilmektedir;

- Fotoğrafların yazılıma tanıtılması,
- Görüntü özelliklerinin seçilmesi,
- Çıktı koordinat sisteminin seçilmesi,
- Process seçenekleri şablonundan çalışmaya uygun şablonun seçilmesi
- Birincil processin başlatılması,
- Otomatik bağlama noktası toplanması,
- Kalite Raporunun incelenmesi,
- YKN ve KN'lerin programa tanıtılması ve görüntü üzerinde işaretlenmesi,
- İkinci adımın başlatılması (Nokta bulutu oluşturma ve gerekli ise sınıflandırma, mesh üretme vb...)
- Üçüncü adımın başlatılması (SYM, SAM, eş yükselti eğrileri, ortomozaik ve indeks haritası üretilmesi, kalite raporu yaratılması)
- Ek işlemlerin yapılması (RayCloud, hacim hesabı, mozaik düzenleyici, indeks hesaplayıcı)

Process süreci sonrası oluşturulan kalite raporunda, özet, kalite kontrol bölümü, ön izleme, kalibrasyon detayları, birincil görüntü pozisyonları, hesaplanılan görüntü-YKN-manuel bağlama noktası pozisyonları, mutlak kamera konumu ve dönüklük belirsizlikleri, 2D anahtar nokta eşleşmelerinden 3D noktalar, ışın demetleri dengeleme detayları, iç kamera parametreleri, jeodezik koordinatlandırma detayları, birincil process detayları, nokta bulutu, DSM, ortomozaik, ve indeks detayları gibi pek çok başlık yer almaktadır.

3.1.3.3. Quantum GIS

QGIS, veri görüntüleme, düzenleme ve çözümleme yetenekleri sağlayan çoklu platform destekli özgür ve açık kaynak kodlu profesyonel bir CBS yazılımıdır. OsGeo'nun (Open Source Geospatial Foundation) resmi projesidir. Linux, Unix, Mac OSX, Windows ve

Android üzerinde çalışabilmekte ve çok sayıda vektör, raster ve veritabanı biçimlerini ve işlevlerini desteklemektedir. Diğer CBS yazılımlarına kıyasla kullanıcıların farklı harita projeksiyonları kullanarak çok katmanlı haritalar oluşturmalarına imkan sağlamaktadır (QGIS, 2013). QGIS, 2002 yılında Gery Sherman tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Quantum GIS, raster (GeoTIFF, ASCII Grid, JPG vb), vektör (Esri Shapefiles, GeoRSS GML, AutoCAD dxf vb.), mekânsal veri tabanları (PostgreSQL üzerinde PostGIS tabloları, SQLite Veritabanı), web servisleri, GRASS veri tabanındaki vektör ve raster veriler ile OpenStreetMap ve Google Maps gibi harita servislerini destekler. Diğer açık kaynak kodlu yazılımlar gibi farklı açık kaynak kodlu yazılım parçaları ile beraber çalışılabilirliği oldukça yüksektir. Buna bağlı olarak, kullanıcılar çeşitli programlar arası geçiş yaparak, veri yapılarına odaklanarak, her iş için en uygun aracı seçerek her program için en güçlü noktalardan faydalanabilir (Cavallini, 2007).

QGIS; çoklu katmanlar ile harita üretme, harita düzenleme, kaydetme ve yazdırma, dxf dosyaları, .shp dosyaları ve kişisel coğrafi veri tabanlarını kullanma, öznetelik tablolarını görüntüleme, obje özellikleri belirleme, seçme ve etiketleme, vektör sembolojisini değiştirme, sayısallaştırma için GRASS entegrasyonu ile görüntüleme, düzenleme ve analiz etme, vektör verileri düzenleme, PostGIS verilerini okuma ve yazma, web servislerini (WMS, WFS ve standart OGC) okuma ve yazma, rasterların RGB renk bantlarını gri tonlamalı yada sahte renkli olarak görselleştirme, renk histogramları çizme, daha sonra çalışmak üzere projeleri çeşitli formatlarda kaydetme, GNSS verileri ile çalışabilme, PostgreSQL veri tabanına bağlanma, veri aktarma ya da görüntüleme gibi çeşitli temel işlevler sunmaktadır (Cavallini, 2007).

QGIS, C++ yazılım dili ile yazılmıştır ve Python dilinin yanı sıra pek çok dili destekler haldedir. QGIS'in bu zamana dek pek çok sürümü çıkmıştır, kullanıcılara sunulan en son sürümü ise QGIS 3.30'dur. Açık kaynak kodlu bir yazılım olduğu için kullanıcılar tarafından sürekli olarak geliştirilip özelleştirilebilir ve yapılan geliştirmeler ve iyileştirmeler diğer QGIS kullanıcıları ile doğrudan paylaşılabilir. Her zaman ücretsiz kalacak olması, açık kaynak kodlu olmasından dolayı sürekli geliştirilmesi ve sağladığı işlevsellikler sayesinde günümüzde ve gelecekte tercih edilecek en önemli CBS uygulamalarındandır.

3.2. Metod

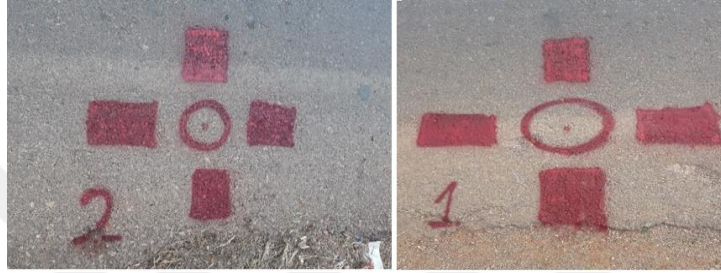
3.2.1. Arazi çalışması

Uçuş yapılacak çalışma sahası genel hatlarıyla incelendikten sonra sabit GNSS alıcısının kurulacağı poligon noktasının tesisi sağlanmıştır. Bunun için öncelikle bir çivi asfalt yola çakılmış, üzeri kırmızı renkli spreyci boya ile boyanmış, ardından koordinatı ölçülmüş ve South S82-V sabiti (base ya da reference olarak bilinmektedir) bu nokta üzerine kurulmuştur (Şekil 3.6). Sabit alıcının boyu bir metre yardımıyla 1.745 m olarak ölçülmüştür. Alet boyu ve nokta koordinatı yeni bir iş açılıp içeri aktarılarak uydulardan düzeltmelerin alınması sağlanmıştır. Yol kenarında olduğu için yoldan geçen araçlardan hassasiyetinin bozulup bozulmadığı sürekli olarak kontrol edilerek YKN ölçümlerinin yapılmasına özen gösterilmiştir. Gezici alıcının ise anten yüksekliği 2 metredir.



Şekil 3.6. South S82-V Sabit GNSS alıcısı

Resim ve üretilen modelleri hassas olarak koordinatlandırmak için kullanılan YKN'ler, TUSAGA aktif ağına bağlanılarak, GRS80 elipsoid datumunda 3 derecelik Türkiye Ulusal Referans Sistemi'nde (TUREF), 30. Dilimde (ITRF96, EPSG:5254) ölçülmüştür. Çalışma sahasında 5 adet YKN tesis edilmiş (Şekil 3.7) ve koordinatları ölçülmüştür (Şekil 3.8). YKN'lerin homojen bir şekilde çalışma sahasına dağıtılmasına ve İHA'dan elde edilen fotoğraflarda belirgin olmalarına özen gösterilmiştir (Şekil 3.9)



Şekil 3.7. 2 ve 1 numaralı yer kontrol noktaları

BÖHHBÜY (2018)'e göre, TUSAGA-Aktif sisteminde Ağ-GZK (CORS) yönteminde düzeltme verileri alınırken kullanılabilecek teknik; VRS, FKP veya MAC, ilk faz başlangıç belirsizliği çözümü sabitlenmiş, uydu sayısı en az 5, uydu yükseklik açısı 10° , veri toplama aralığı 1 saniye, ölçüm süresi her noktada en az 10 epok olarak alınmalıdır. Yapılan çalışmada ise ilk faz başlangıç belirsizliği çözümü sabitlenmiş, minimum 15 adet uyduya bağlanarak, veri toplama aralığı 1 saniye ve ölçüm süresi her noktada 12 epok olacak şekilde YKN'lerin ölçümü yapılmıştır (Tablo 3.4).

Tablo 3.4. Ölçülen noktalara ait veriler ve noktaların kesin koordinatları

NOKTA NO	OTURUM ZAMANI (UTC)	EPOK SAYISI	VERİ TOPLAMA ARALIĞI	UYDU SAYISI (GPS/GLONASS)	RMS (m)	PDOP	TAM SAYI BELIRSIZLIK ÇÖZÜM DURUMU	Mountpoint (VRS,FKP,MAC) TUSAGA-Aktif Sistemi Yayın Bağlantı Noktası	KESİN KOORDİNAT (ITRF-TM 3°30'E)		
									SAĞA DEĞER (y) (m)	YUKARI DEĞER (x) (m)	YÜKSEKLİK DEĞER (z) (m)
YKN1	14 10 2022 19:45:46	12	1	18	0.004	1.2	FIXED	RTK	568890.761	4095596.697	114.511
YKN2	14 10 2022 19:44:01	12	1	17	0.004	1.3	FIXED	RTK	568850.972	4095584.519	114.221
YKN3	14 10 2022 19:56:03	12	1	15	0.006	1.5	FIXED	RTK	568855.593	4095637.562	113.882
YKN4	14 10 2022 19:59:21	12	1	15	0.006	1.5	FIXED	RTK	568839.862	4095692.829	112.862
YKN5	14 10 2022 20:03:43	12	1	15	0.006	1.4	FIXED	RTK	568864.805	4095687.566	113.936
SBT1	14 10 2022 19:38:45	12	1	17	0.004	1.3	FIXED	RTK	568879.179	4095593.388	114.406



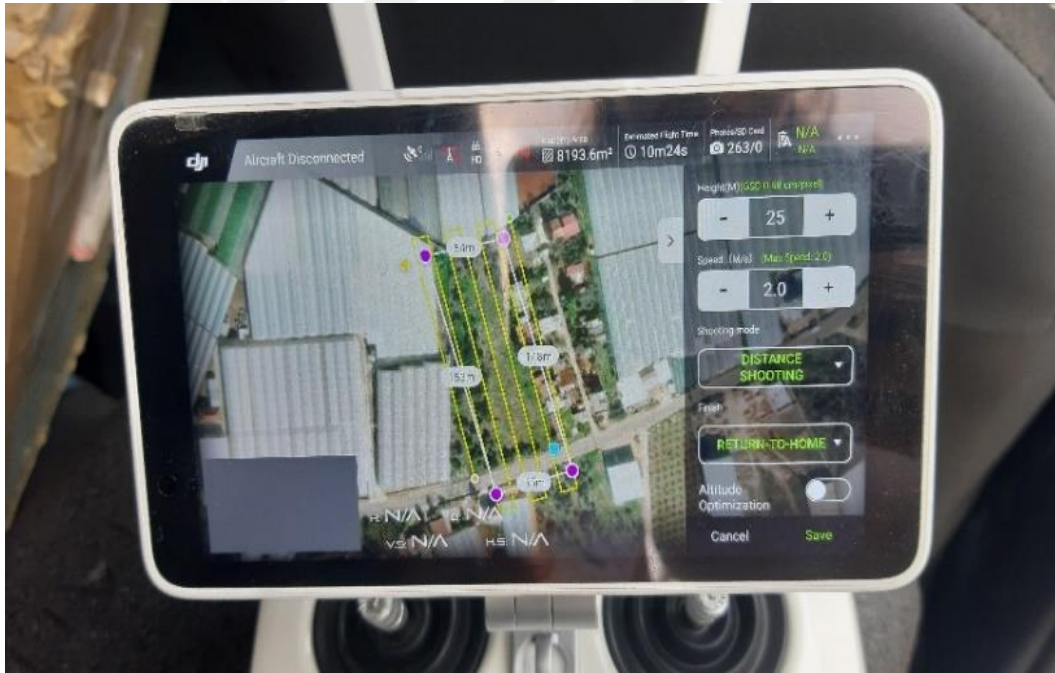
Şekil 3.8. Çalışma sahasında YKN'lerin ölçülmesi



Şekil 3.9. Araziye tesis edilen YKN'lerin çalışma sahasına dağılımı

3.2.2. Uçuş planlaması

DJI Phantom 4 RTK hava aracında uçuş yazılımı olarak GS RTK (GSR) bulunmaktadır. Öncelikle Google Earth yardımıyla daha önceden oluşturulan KML dosyası kumandaya aktarılarak uçuş planlamasına başlanmıştır (Şekil 3.10). Ardından hava aracı açılarak kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yazılıma uçuş kapsamında kullanılacak uçuş bilgileri (yükseklik, enine-boyuna bindirme oranları vb.) girilmiştir. Uçuş 25 m yükseklikten, 2 m/sn hızla, %70 enine ve %80 boyuna bindirme oranları ile yapılmış, hava bulutlu olarak seçilmiştir. Yer örnekleme mesafesi 0.68 cm/piksel olarak belirlenmiştir. Uçuş 11 dk 18 sn sürmüştür, bu süre boyunca 8194 m² alan taranmış ve toplam 258 adet fotoğraf çekilmiştir. Fotoğraf çekimi için kullanılan kamera FC6310R'dir ve odak uzunluğu 8.8 mm'dir.



Şekil 3.10. Fotoğraf alımı amaçlı yapılan uçuş planlaması

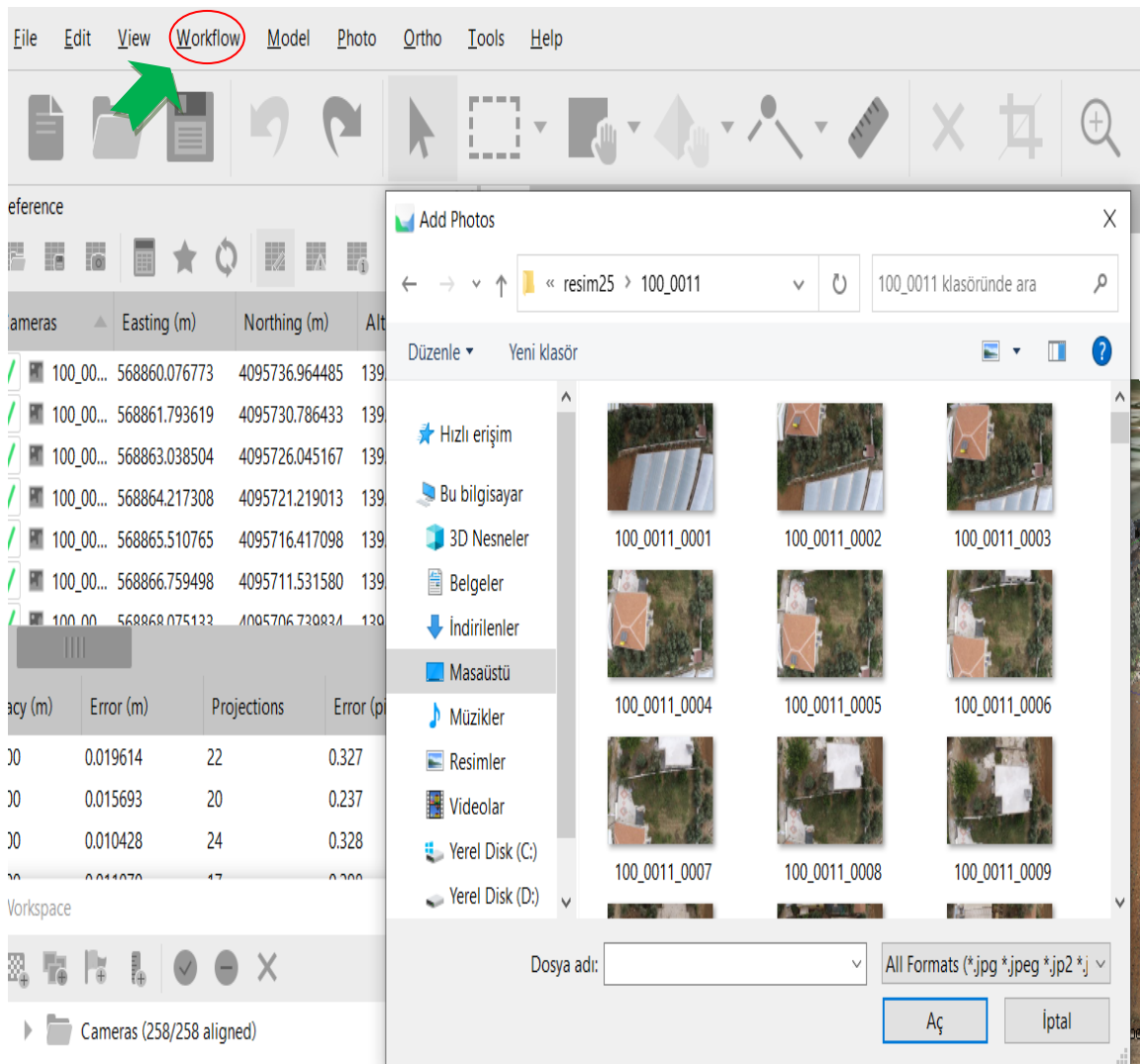
3.2.3. Verilerin işlenmesi

İHA ile elde edilen görüntülerin işlenmesi için Lenovo V15 Ada AMD Athlon Gold 3150U marka dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. AMD Radeon Graphics ekran kartı, 8 GB RAM, 256 GB SSD ve 2.40 GHz işlem hızına sahiptir. Uçuş görüntüleri elde

edildikten sonra 32 GB flash bellek kullanılarak verilerin bu bilgisayara aktarılması sağlanmıştır.

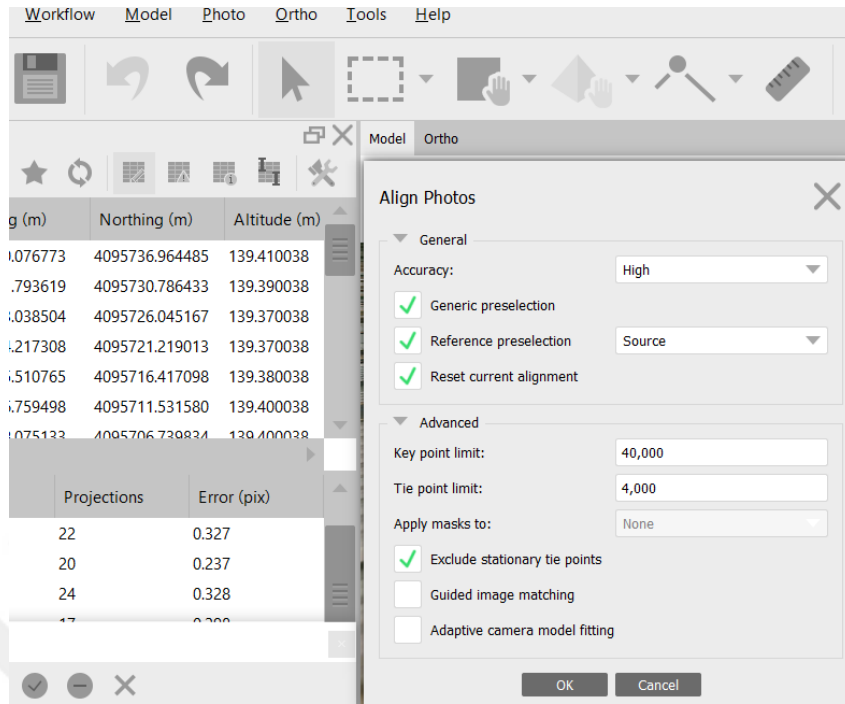
3.2.3.1. Agisoft Metashape Professional’da verilerin işlenmesi

Agisoft Metashape yazılımına öncelikle İHA ile elde edilen fotoğraflar yüklenmiştir. Bunun için Workflow menüsünde “Add Photos” seçilerek 258 adet fotoğrafın yazılıma tanıtılması sağlanmıştır (Şekil 3.11).



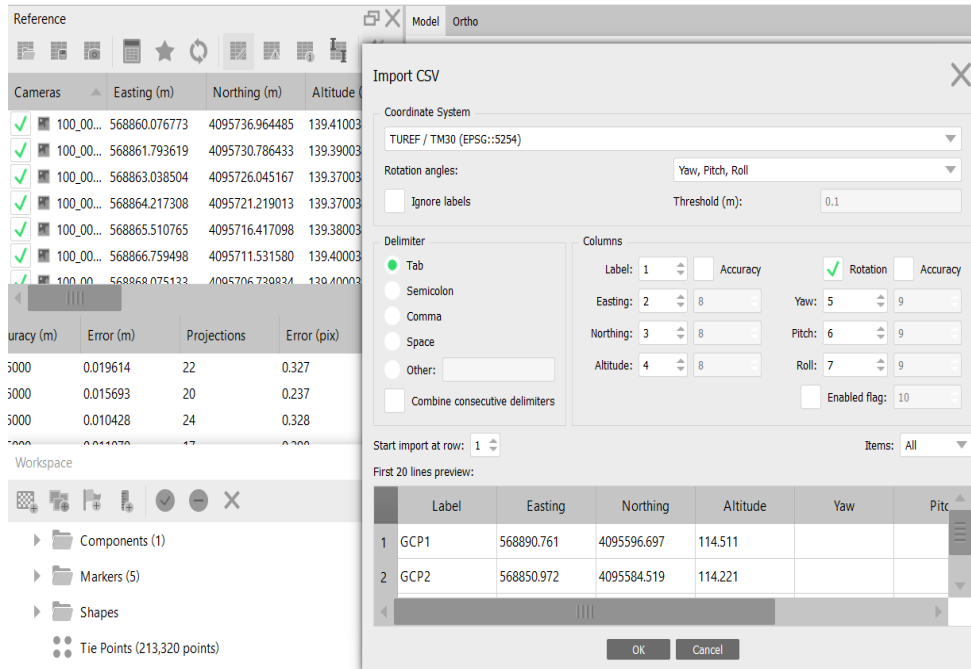
Şekil 3.11. Agisoft Metashape’e görüntülerin eklenmesi

Reference kısmından “Convert” seçeneğinden koordinat sistemi TUREF/TM30 olarak seçilmiştir. Workflow menüsünde “Align Photos” seçilerek doğruluk “high”, key point limit 40.000, tie point limit 4.000 olarak işaretlenmiştir (Şekil 3.12). Bu işlem sonucunda 213320 seyrek nokta üretilmiştir.



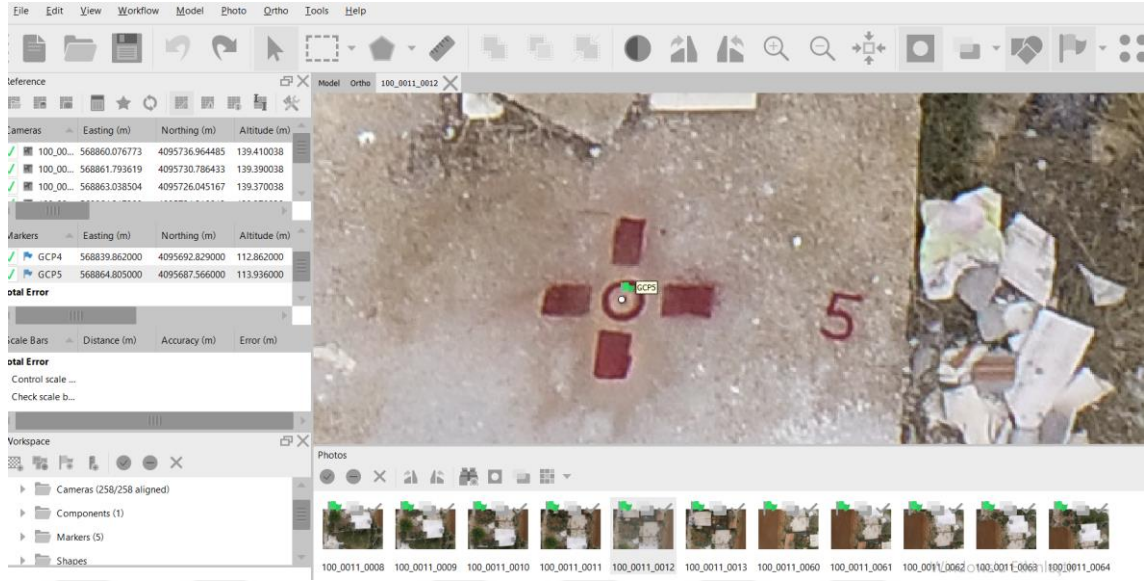
Şekil 3.12. Görüntülerin hizalanması

Reference kısmından “import reference” seçilerek YKN’lerin programa aktarılması sağlanmıştır (Şekil 3.13). P.1 noktası da kontrol noktası (check point) olarak eklenmiştir.



Şekil 3.13. YKN’lerin programa aktarılması

Daha sonra YKN’lerin ve kontrol noktasının fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. YKN'lerin Agisoft yazılımında görüntü üzerinde işaretlenmesi

Yapılan dengelemede YKN konumları ve oluşan hatalar Tablo 3.5'te, KN içinse Tablo 3.6'da gösterilmiştir.

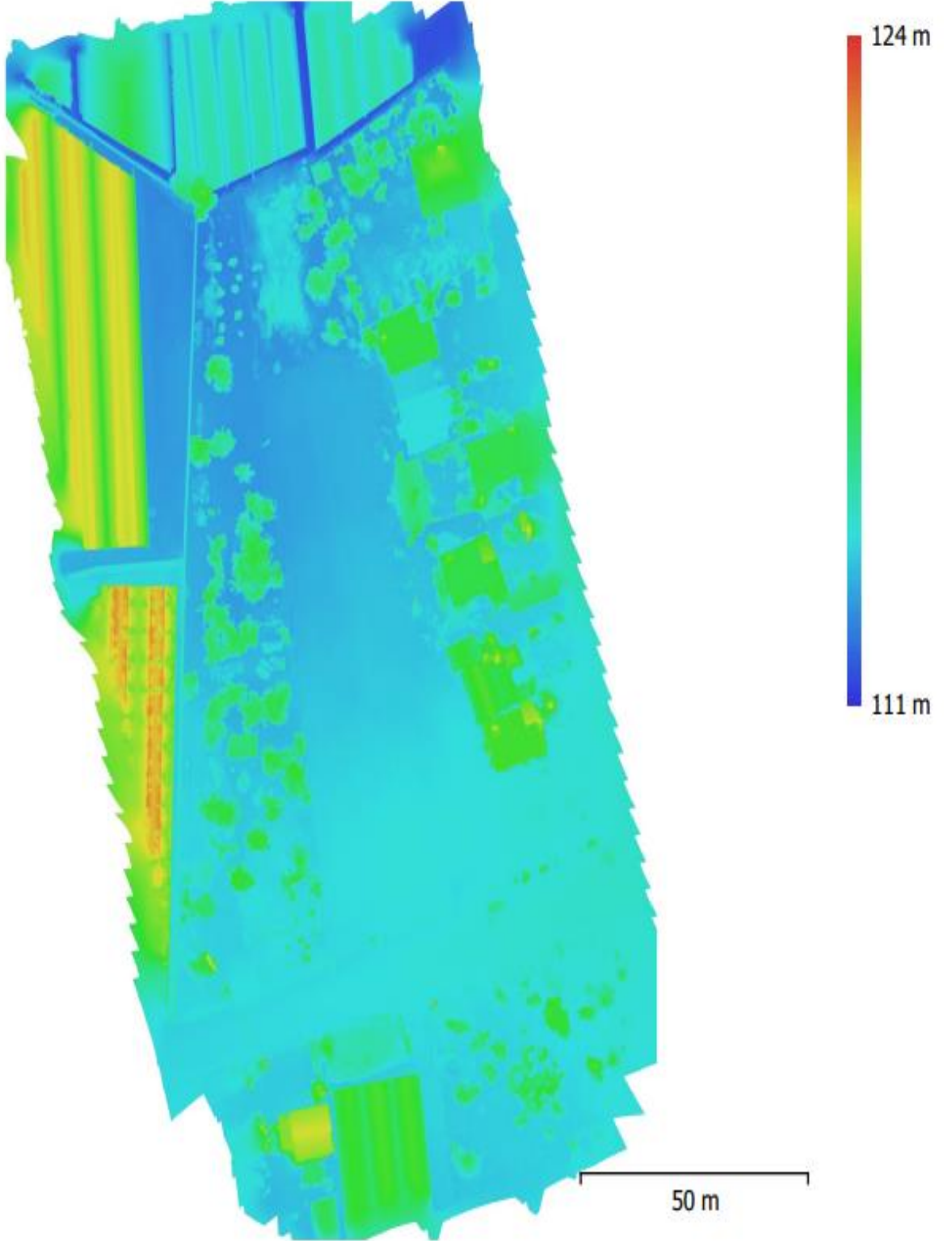
Tablo 3.5. Agisoft Metashape'te YKN'lerin karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

YKN Sayısı	X hata (cm)	Y hata (cm)	Z hata (cm)	XY hata (cm)	Toplam hata (cm)
5	1.16742	0.765089	0.601742	1.39579	1.51997

Tablo 3.6. Agisoft Metashape'te kontrol noktasının karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

KN Sayısı	X hata (cm)	Y hata (cm)	Z hata (cm)	XY hata (cm)	Toplam hata (cm)
1	0.823187	1.67142	0.706069	1.86314	1.99244

Workflow menüsünden “Build Dense Cloud” seçilerek derinlik haritası ve yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur. Kalite “high”, derinlik filtrelemesi ise “agressive” olarak seçilmiştir. Daha sonra “Build DEM” seçilmiş, kaynak data olarak dense cloud işaretlenmiş ve Sayısal Yüzey Modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.15). Oluşturulan SYM'nin çözünürlüğü 1.35 cm/pix nokta yoğunluğu ise $0.551 \text{ points/cm}^2$ 'dir. Orta hassasiyetle üretilen DEM'in ise çözünürlüğü 2.68 cm/pix , nokta yoğunluğu ise $0.139 \text{ points/cm}^2$ 'dir.



Şekil 3.15. Agisoft'ta oluşturulan Sayısal Yüzey Modeli

Son aşama olarak, workflow menüsünden “build orthomosaic” seçilmiş, kaynak yüzey olarak DEM işaretlenmiş, 6.73 mm/pix çözünürlüğünde 2 boyutlu ortofoto üretilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. İHA görüntüleri kullanılarak Agisoft'ta üretilen ortofoto

Anlatılan tüm işlemler orta hassasiyetli sonuç elde edilmek için tekrar edilmiş, fotoğraflar programa yüklenmiş, doğruluk “medium” olarak seçilmiş, tüm işlemler

sırasıyla tekrar uygulanmış ve sonuç ürünler elde edilmiştir. Orta hassasiyetle üretilen ortomozağin çözünürlüğü 6.7 mm/pix'dir.

Orta hassasiyetle tekrarlatılan işlemlerde ise YKN'lerin ve kontrol noktasının karesel ortalama hataları Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7. Agisoft Metashape'te YKN'lerin karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

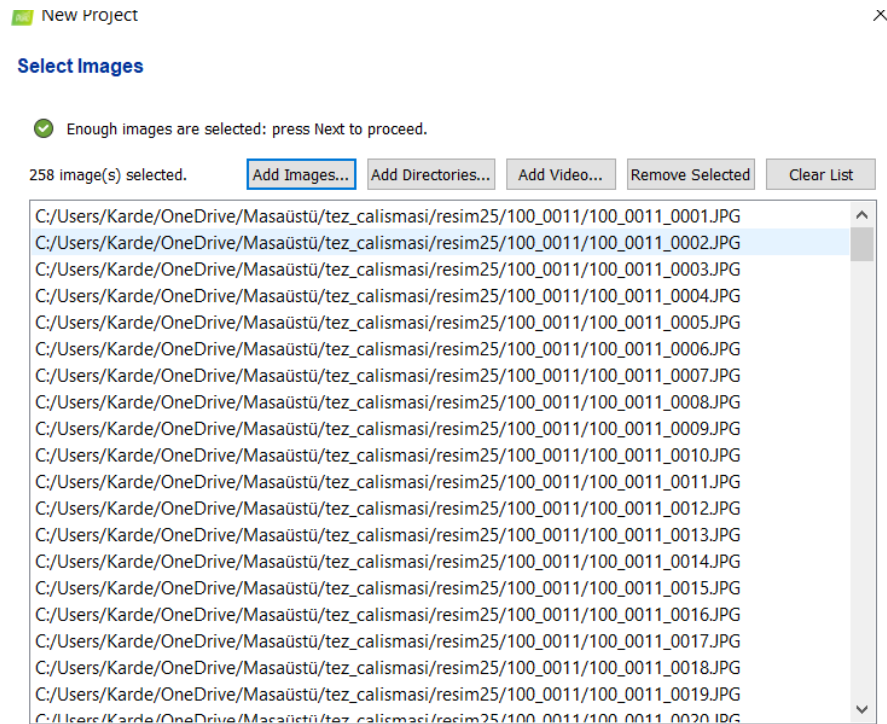
YKN Sayısı	X hata (cm)	Y hata (cm)	Z hata (cm)	XY hata (cm)	Toplam hata (cm)
5	1.0399	0.706491	0.4159	1.25719	1.3242

Tablo 3.8. Agisoft Metashape'te kontrol noktasının karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

KN Sayısı	X hata (cm)	Y hata (cm)	Z hata (cm)	XY hata (cm)	Toplam hata (cm)
1	0.7041	1.62125	0.732294	1.76754	1.91323

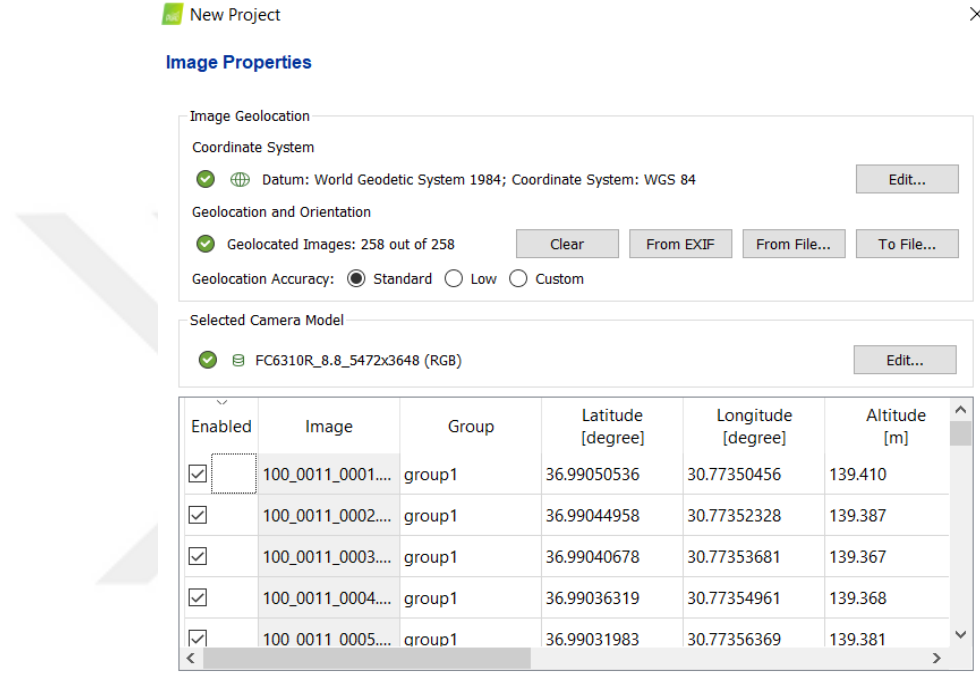
3.2.3.2. Pix4DMapper'da verilerin işlenmesi

Pix4DMapper 4.4.12 lisanslı sürümü bu çalışma için kullanılmış olup, ilk aşamada yeni bir proje oluşturularak 258 fotoğrafın programa aktarılması sağlanmıştır (Şekil 3.17).

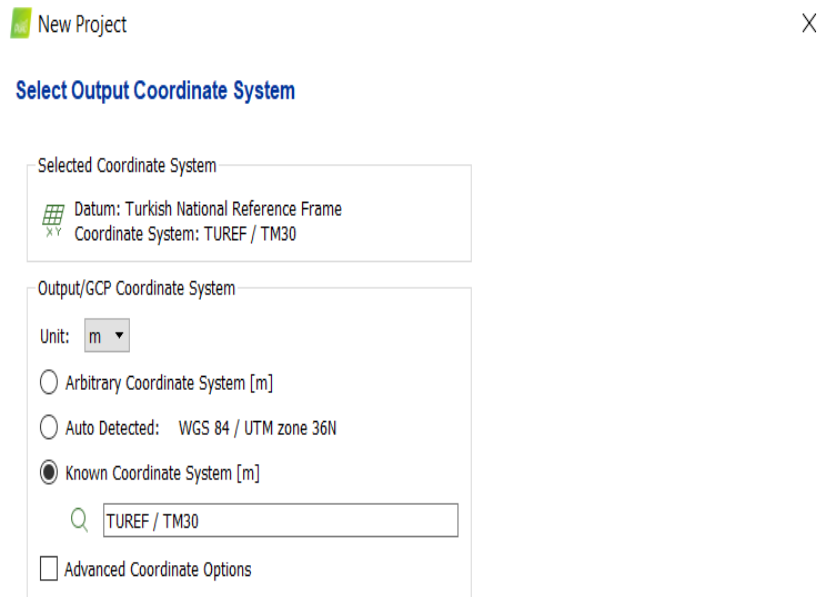


Şekil 3.17. Fotoğrafların Pix4DMapper'a aktarılması

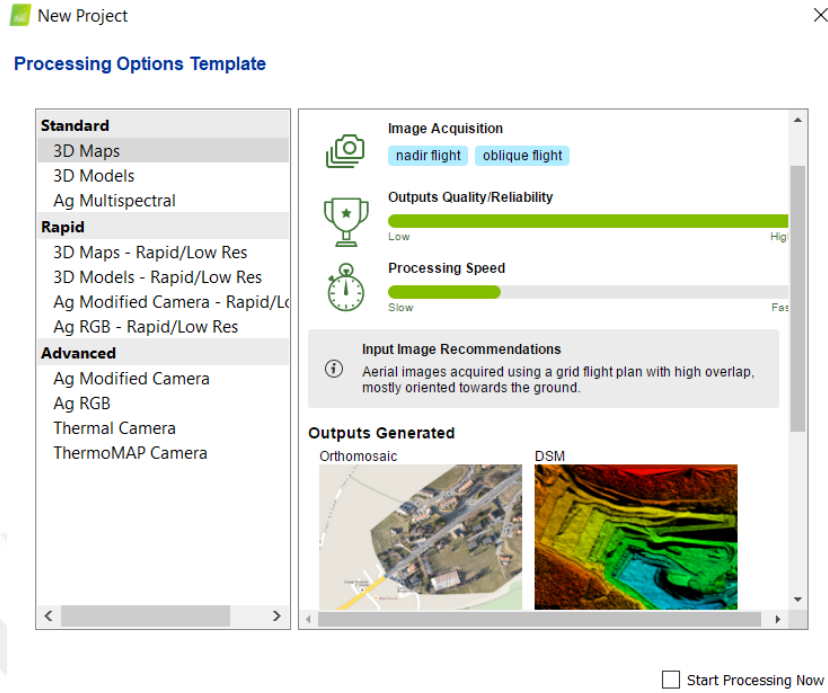
Daha sonra coğrafi konum doğruluğu standart olarak seçilerek işleme devam edilmiştir (Şekil 3.18). Bir sonraki adımda çıktı koordinat sistemi TUREF/TM30 olarak seçilmiştir (Şekil 3.19). Son olarak process şablonundan “3D maps” seçilerek prosesin ilk adımı tamamlanmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.18. Görüntü özelliklerinin seçilmesi

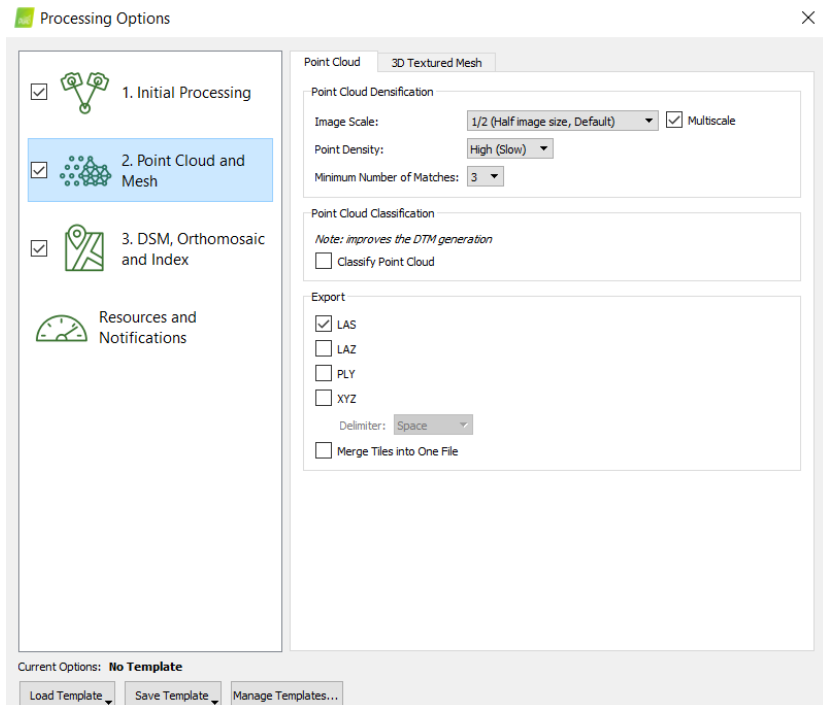


Şekil 3.19. Çıktı koordinat sisteminin seçilmesi

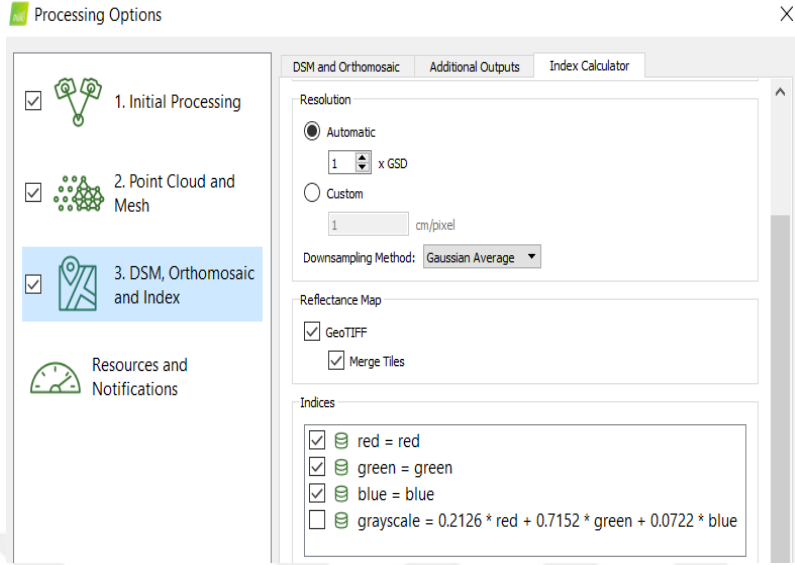


Şekil 3.20. Process şablonundan 3D Maps sonuç ürünlerinin seçilmesi

Process seçeneklerinden yapacağımız çalışmaya uygun olacak şekilde seçimler yapılmıştır. Nokta yoğunluğu “high” olarak seçilmiş (Şekil 3.21), indeks hesaplayıcı kısmından daha sonra Quantum GIS programında kullanacağımız kırmızı, mavi ve yeşil indeksler işaretlenmiştir (Şekil 3.22).

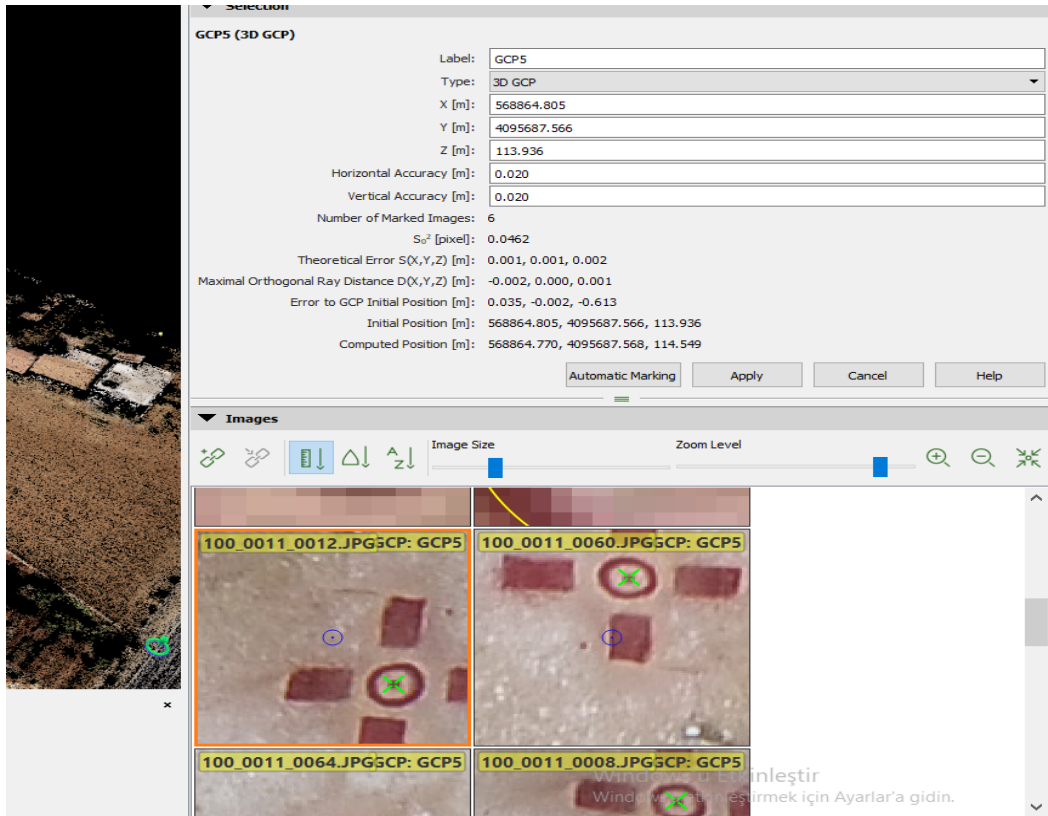


Şekil 3.21. Nokta yoğunluğunun seçilmesi



Şekil 3.22. İndeks hesaplayıcıdan kırmızı, yeşil ve mavi renk indekslerinin seçilmesi

Birincil proses başlatılmıştır ve tamamlanmasının ardından 2. Adıma geçilmeden önce yer kontrol noktalarının ve kontrol noktasının (P.1) programa aktarılması sağlanmıştır. YKN/MTP yöneticisinden koordinat sistemi TUREF/TM30 seçilerek YKN'ler import edilmiş, P.1 noktası kontrol noktası olarak işaretlenmiş ve fotoğraf üzerinden nokta işaretlemeleri yapılmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. 5 numaralı yer kontrol noktasının fotoğraflar üzerinde işaretlenmesi

Yapılan dengeleme sonucunda YKN konumları ve oluşan hatalar Tablo 3.9’da kontrol noktasının hatası ise Tablo 3.10’da gösterilmiştir.

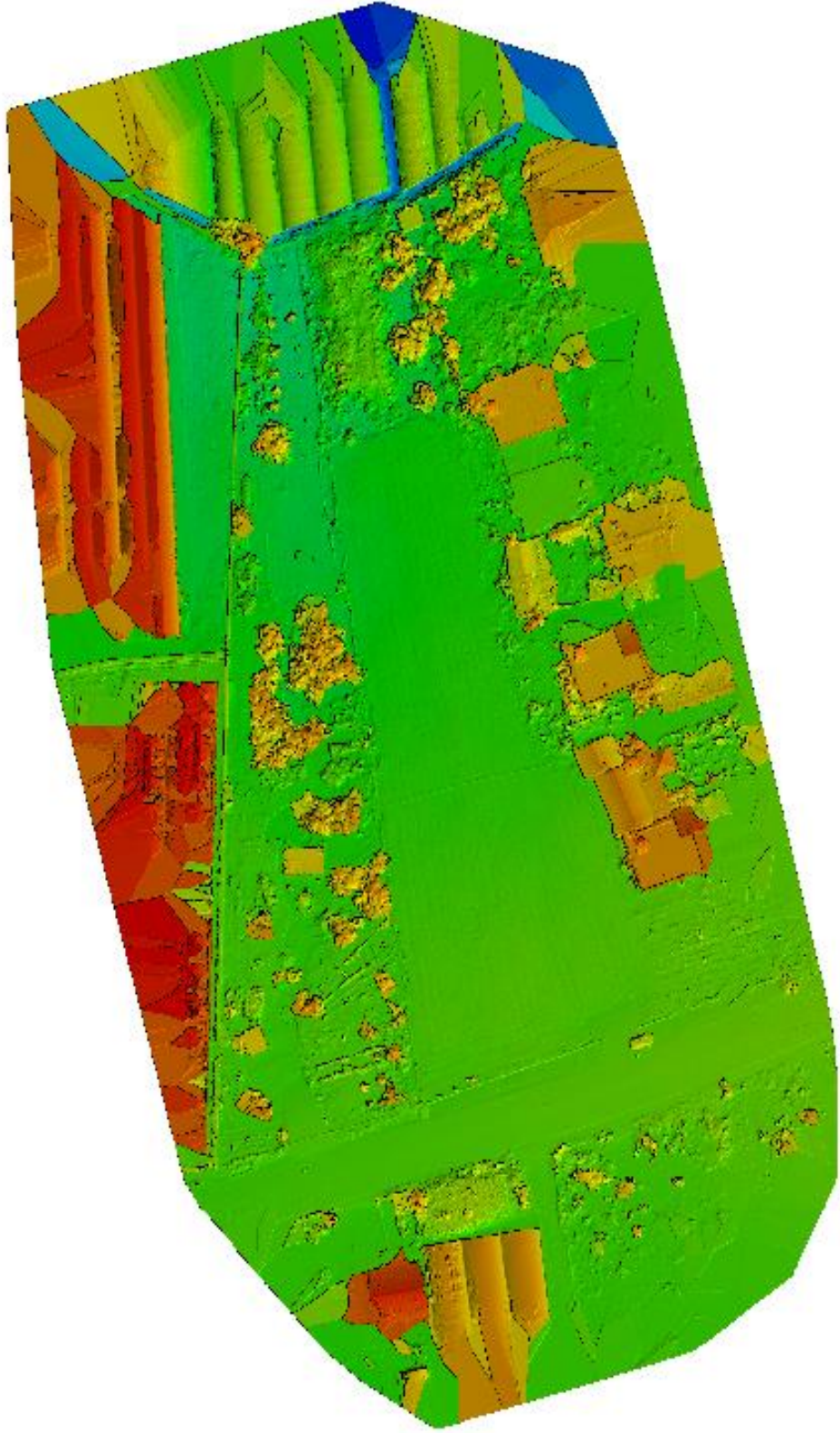
Tablo 3.9. Pix4DMapper’da YKN’lerin karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

YKN Adı	Doğruluk XY/Z [m]	X hata [m]	Y hata [m]	Z hata [m]	Projeksiyon Hatası [piksel]
YKN1	0.020/ 0.020	0.006	0.013	-0.004	0.300
YKN2	0.020/ 0.020	-0.019	-0.010	0.005	0.282
YKN3	0.020/ 0.020	0.015	0.002	-0.003	0.284
YKN4	0.020/ 0.020	0.001	-0.009	-0.006	0.314
YKN5	0.020/ 0.020	-0.003	0.005	0.008	0.288
Ortalama		0.000001	0.000007	0.000012	
RMS Hata		0.011276	0.008563	0.005614	

Tablo 3.10. Pix4DMapper’da kontrol noktasının karesel ortalama hata (RMSE) değerleri

KN Adı	X hata [m]	Y hata [m]	Z hata [m]	Projeksiyon hatası [piksel]
P.1	0.0114	0.0229	0.0217	0.2368

YKN işaretlemesi bittikten sonra 2. ve 3. adım otomatik olarak yapılmıştır. Sonuç raporuna göre, nokta bulutu üretimi 2 saat 48 dakika, DSM ve ortomozaik üretimi 3 saat 27 dakika, yansıtma haritasının üretimi 10 gün 17 saat 47 dakika ve renk indeklerinin üretimi toplam 31 dakika sürmüştür. Üretilen DSM Şekil 3.24’te, ortomozaik ise Şekil 3.25’te gösterilmiştir. Sonuç raporuna göre DSM ve ortomozaik’in çözünürlüğü 0.747 cm/piksel’dir.



Şekil 3.24. Pix4DMapper’da üretilen Sayısal Yüzey Modeli



Şekil 3.25. Pix4DMapper’da üretilen ortomozaik

Pix4DMapper’da yapılan tüm işlemler nokta yoğunluğu için “medium” seçilerek sonuç ürünler üretmek için tekrar edilmiştir. Orta hassasiyetle tekrarlatılan işlemlerde ise yer kontrol noktalarının ve kontrol noktasının karesel ortalama hataları Tablo 3.11 ve Tablo 3.12’de gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Pix4DMapper’da YKN’lerin karesel ortalama hata (RMSE) değerleri (orta hassasiyet için)

YKN Adı	Doğruluk XY/Z [m]	X hata [m]	Y hata [m]	Z hata [m]	Projeksiyon Hatası [piksel]
YKN1	0.020/ 0.020	0.005	0.021	0.013	0.358
YKN2	0.020/ 0.020	-0.014	-0.003	0.003	0.355
YKN3	0.020/ 0.020	0.016	0.003	-0.000	0.373
YKN4	0.020/ 0.020	0.001	-0.019	-0.017	0.421
YKN5	0.020/ 0.020	-0.007	-0.002	0.003	0.297
Ortalama		-0.000016	0.000002	0.000048	
RMS Hata		0.010262	0.013073	0.009754	

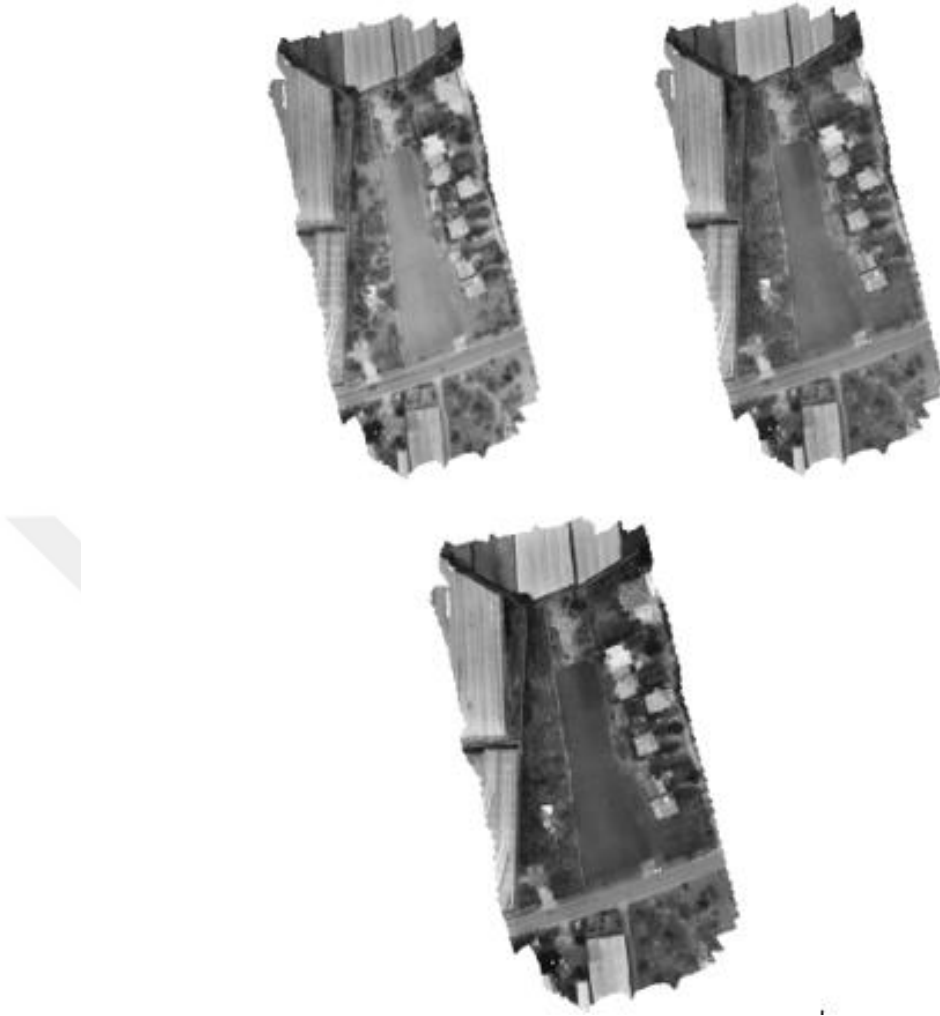
Tablo 3.12. Pix4DMapper’da KN’nin karesel ortalama hata (RMSE) değerleri (orta hassasiyet için)

KN Adı	X hata [m]	Y hata [m]	Z hata [m]	Projeksiyon hatası [piksel]
P.1	0.0113	0.0322	0.0218	0.4075

Sonuç raporuna göre orta hassasiyetle üretilen DSM ve ortomozağin çözünürlüğü ise 0.75 cm/piksel’dir.

3.2.3.3. QGIS’te verilerin işlenmesi

Kanopi hacmi hesaplaması için QGIS 3.22.4 kullanılmıştır. İlk olarak programa Agisoft’ta yüksek hassasiyetle üretilen kırmızı, mavi ve yeşil bantlar ayrı ayrı aktarılmıştır (Şekil 3.26). QGIS’te yapılan tüm işlemler Agisoft’ta üretilen orta hassasiyetli ve Pix4DMapper’da üretilen orta ve yüksek hassasiyetli tüm sonuç ürünler için de tekrarlanmıştır.



Şekil 3.26. Çalışma alanının kırmızı, yeşil ve mavi bant görüntüsü (sırasıyla)

Ardından aktarılan bantlar kullanılarak bitki sağlığı ve bitki alanı hakkında bilgi veren bitki indeksi değeri “raster hesaplayıcı” aracı kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 3.27) ve Şekil 3.28’de oluşan bu katman gösterilmiştir. Bu çalışma için seçilen bitki indeksi “Aşırı Yeşil İndeks (Excess Green Index)” olmuştur. Aşırı Yeşil İndeksin (ExG) hesaplanması için kullanılan formül ise şu şekildedir:

$$ExG = 2 * green - red - blue \quad (\text{Woebbecke ve ark., 1995}) \quad (8)$$

Bu eşitlikte aktarılan bantların normalize edilmiş değerleri kullanılmıştır. Yani;

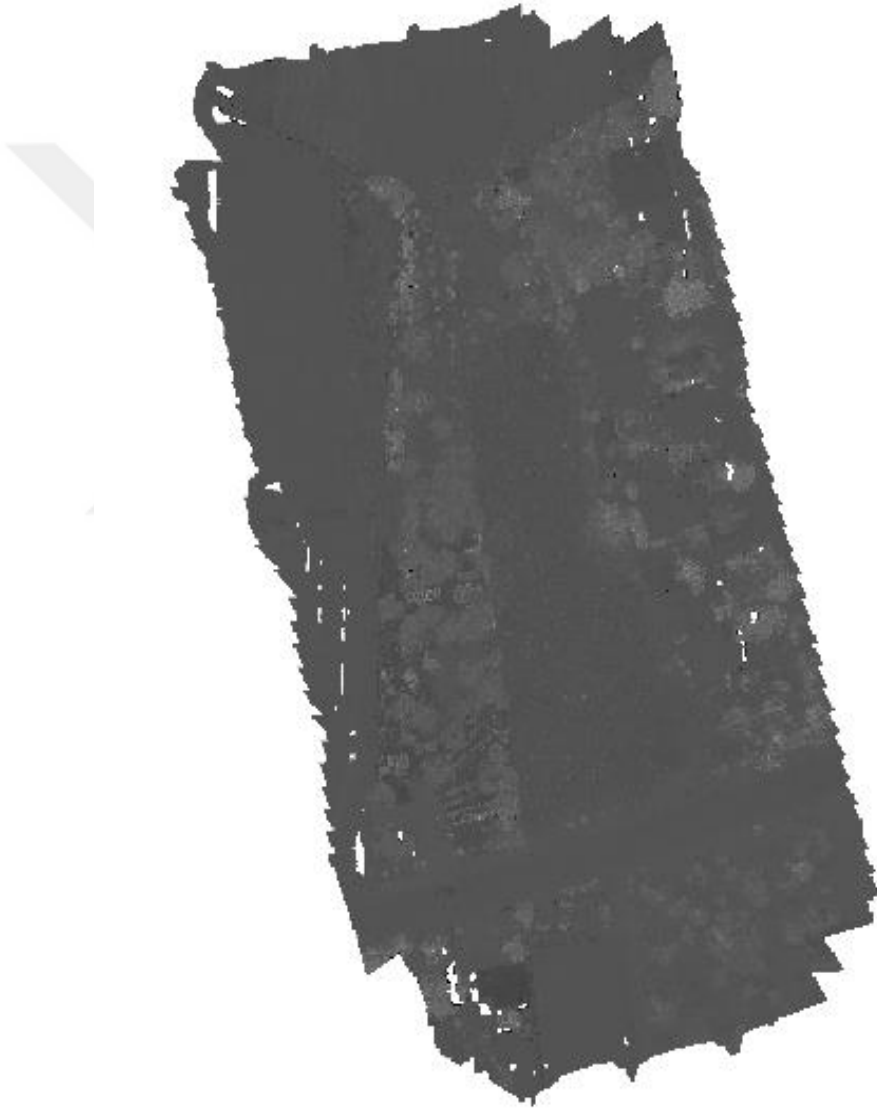
$$Red = \frac{Red}{Red+Green+Blue}, Green = \frac{Green}{Red+Green+Blue}, Blue = \frac{Blue}{Red+Green+Blue} \quad (9)$$

QGIS’te raster hesaplayıcı kısmında bu formülün doğru yazılması oldukça önemlidir aksi halde oluşan sonuç doğru olmayacaktır.

Raster Calculator Expression

```
2* ( "Green@1" / ( "Red@1" + "Green@1" + "Blue@1" ) ) - ( "Red@1" / ( "Red@1" + "Green@1" + "Blue@1" ) ) - ( "Blue@1" / ( "Red@1" + "Green@1" + "Blue@1" ) )
```

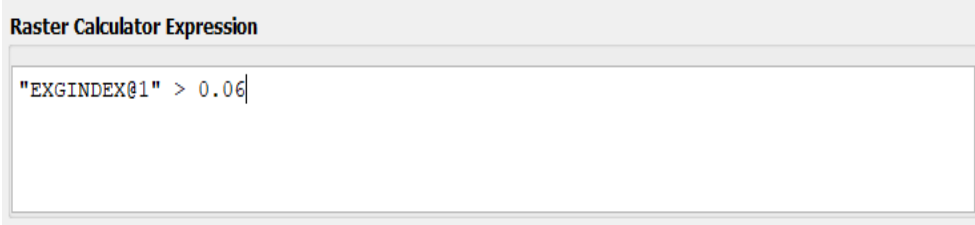
Şekil 3.27. QGIS’te Excess Green Index’in raster hesaplayıcı aracılığıyla hesaplanması



Şekil 3.28. QGIS’te oluşan Aşırı Yeşil İndeks katmanı

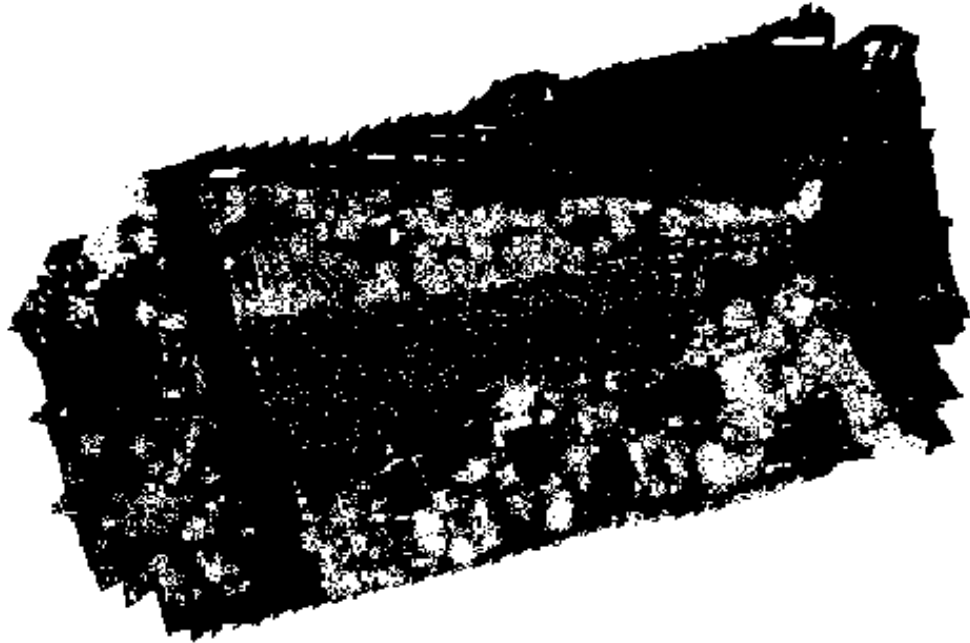
Aşırı Yeşil İndeks katmanında “objeleri belirle” seçeneğinden bitki sınıfı üzerine tıkladığımızda 0 değerinden büyük değerler elde ettiğimizi, bitki olmayan sınıflar üzerine tıkladığımızda ise negatif değerler ürettiğini açıkça görebilmekteyiz.

Raster hesaplayıcı aracından üretilen “aşırı yeşil indeks” katmanını kullanarak bir eşik katmanını oluşturulmuştur. Bu katmanın oluşturulmasında kullanılan formül ise Şekil 3.29’da gösterilmiştir;

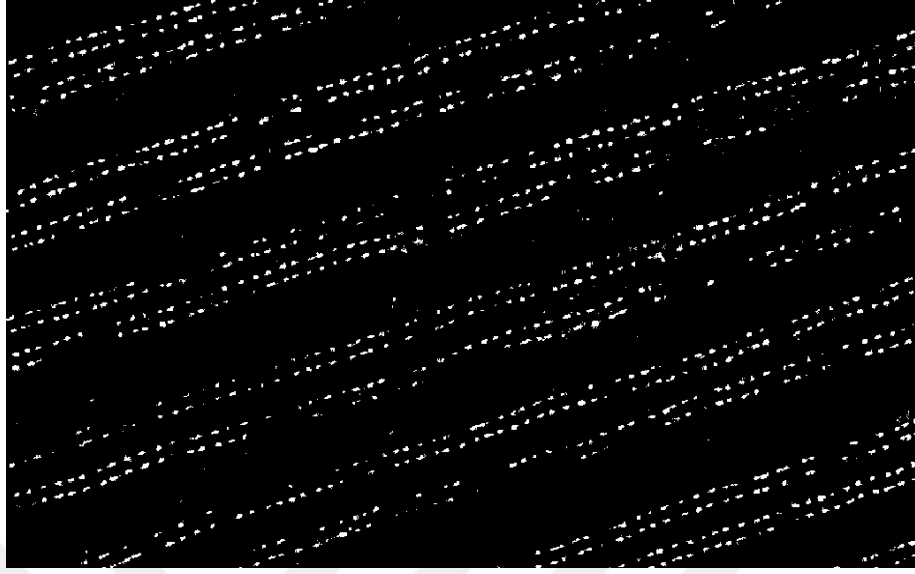


Şekil 3.29. Eşik katmanını oluşturmada kullanılan eşitlik

Eşik katmanının oluşturulması için birden fazla eşik değeriyle deneme yapılmış (0.1, 0.08, 0.06 gibi), en uygun görülen eşik değerinin oluşturulduğu katman seçilerek (0.06 değeriyle oluşturulan katman) daha sonraki hesaplamalarda kullanılmıştır (Şekil 3.30). Bu katmanın oluşturulmasındaki amaç bitki olan ve bitki olmayan kısımların sınıflandırılmasıdır (ikili sınıflandırma). Böylelikle bitki ve toprak sınıfı arasındaki fark belirgin bir şekilde gözlemlenebilir (Şekil 3.31). Bu katmanda “objeleri belirle” seçeneğinden bitki sınıfı üzerine tıklandığında “1” değerini, bitki olmayan (toprak) sınıflar üzerine tıklandığında “0” değerini ürettiğini açıkça görebilmek mümkündür. Daha sonra dönüklük 90° olacak şekilde seçilmiştir.

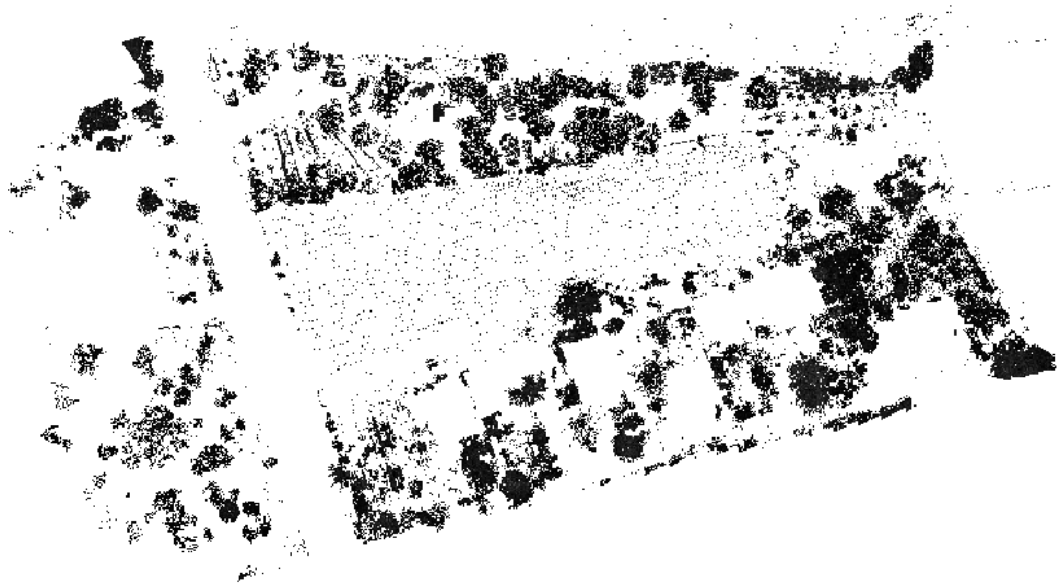


Şekil 3.30. Aşırı yeşil indeks kullanılarak oluşturulan eşik katmanı



Şekil 3.31. Eşik katmanının yakın görüntüsü

Sıradaki işlem raster hesaplayıcıdan aşırı yeşil indeks katmanını oluşturulan eşik katmanına bölmektir. Bu işlemdeki amaç bitki olmayan pikselleri tamamen ortadan kaldırmaktır. Yani aşırı yeşil indeks katmanında bitki pikselleri değerini eşik değeri katmanında bitki piksellerinin değerine (yani 1) bölündüğünde yine bitki indeksi katmanındaki piksel değerleri elde edilmiş olacaktır. Ancak toprak olmayan piksellerin değeri 0 olduğu için bu işlemi yaptığımızda üretilen yeni katmanda toprak olmayan kısımlar için “veri yok” değeri elde edilecektir. Bu işlem sonucunda toprak ve diğer sınıfların maskelenmesi sağlanmıştır (Şekil 3.32).

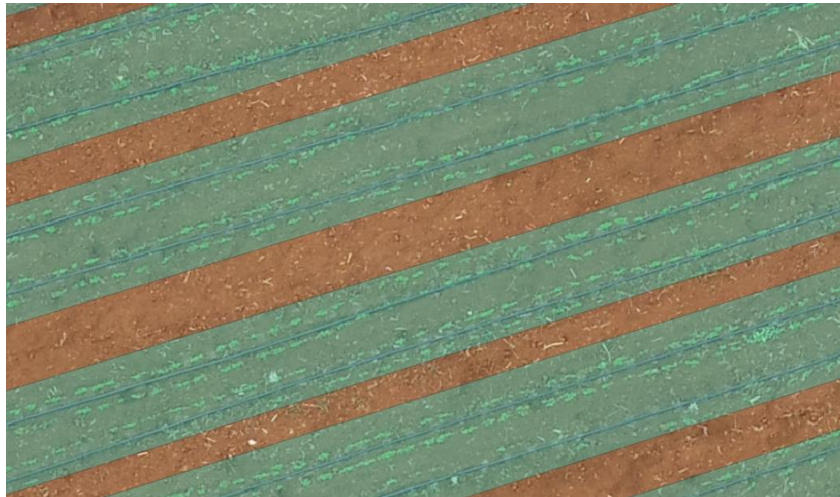


Şekil 3.32. Toprak piksellerinin maskelenmesiyle elde edilen katman

Daha sonra çalışma alanını ekim şekline göre alt parsellere bölmek için “ölçüm (measure)” aracı kullanılmıştır. Bu araçla her alt parselin yaklaşık boyutları belirlenmeye çalışılmıştır. “Grid oluştur” aracı kullanılarak grid tipi dikdörtgen seçilmiş, “measure” aracı kullanarak belirlediğimiz yaklaşık uzunluklar girilmiş ve yeni bir grid katmanı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katmanda fazlalık kısımlar atılmış, “gelişmiş sayısalılaştırma araç çubuğu” kullanılarak çalışma alanına göre döndürülmüş ve taşınmış, her alt parsel ekim şekline göre bitkileri içine alacak şekilde yeniden şekillendirilmiş ve boyutlandırılmıştır (Şekil 3.33). Çalışma alanı şekil 3.34’te görüldüğü gibi alt parsellere bölünmüş, sonuçta 47 tane alt parsel elde edilmiştir.

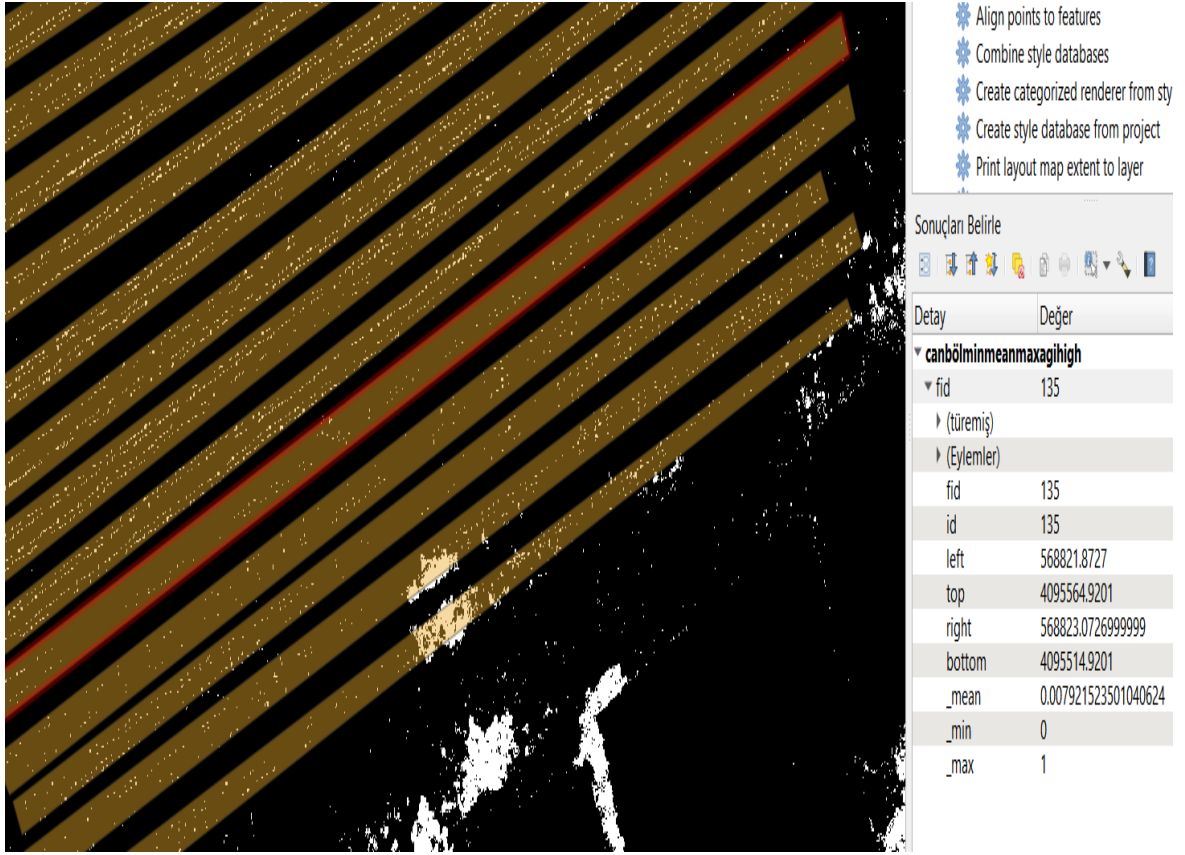


Şekil 3.33. Çalışma alanının alt parsellere bölünmesi



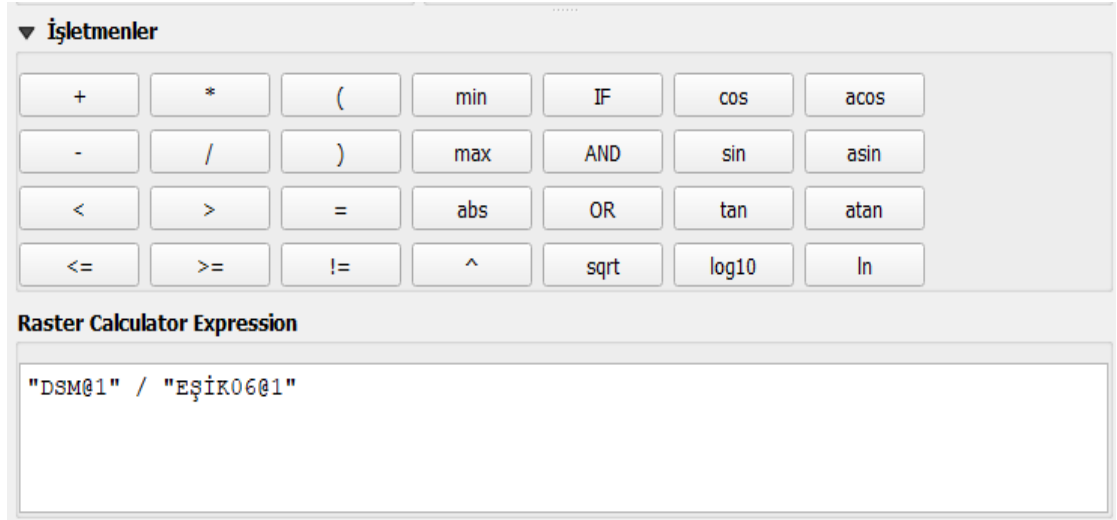
Şekil 3.34. Oluşturulan alt parsellerin yakın görüntüsü

Bölgesel istatistik aracını kullanarak daha önce oluşturulan eşik katmanında “mean, min ve max” değerleri hesaplanmıştır. Oluşturulan katmanda öznitelik tablosu açılarak hesaplanan değerler incelendiğinde örneğin 135 nolu alt parsele bakıldığında ortalama kanopi alanının 0’a yakın (0.00792152350104062) olduğu görülmektedir. Eşik katmanındaki görüntüsüyle karşılaştırıldığı zaman bu değer doğru olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.35). Öznitelik tablosunda elde edilen değerler kopyalayarak Microsoft Excel’e aktarılmıştır.



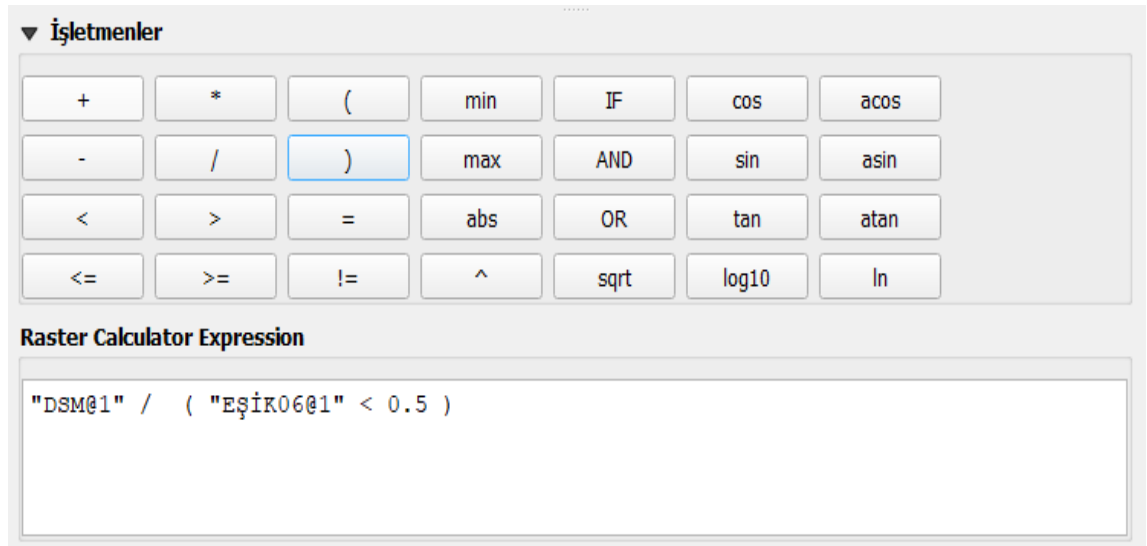
Şekil 3.35. 135 nolu alt parsele ve hesaplanan değerler

Agisoft Metashape’te oluşturulan çalışma alanına ait Sayısal Yüzey Modeli (SYM) QGIS programına aktarılmıştır. İlk olarak raster hesaplayıcı aracından SYM kullanılarak sadece kanopiye ait verileri içeren bir katman üretilmiştir. Bunun için SYM katmanı eşik katmanına bölünmüştür. Böylece bitkilere ait piksel değerleri korunmuş yani bitki yükseklikleri elde edilmiş, bitki olmayan kısımlar (toprak vb.) için “veri yok” değeri elde edilmiştir. Burada raster hesaplayıcıda uygulanan eşitlik Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



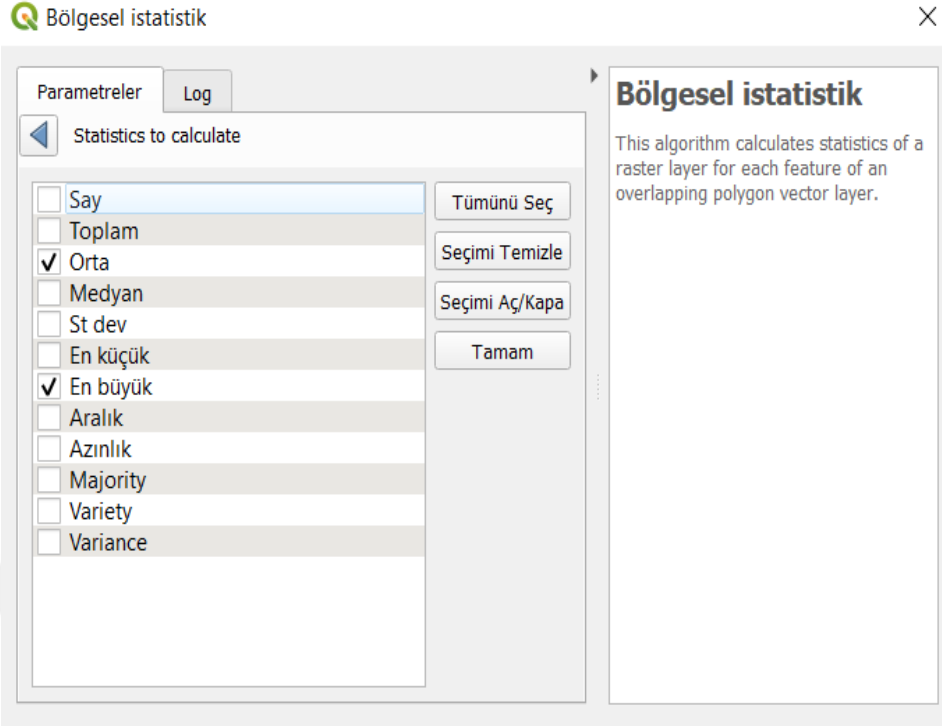
Şekil 3.36. Sadece bitki pikselleri içeren bir katman üretmek için uygulanan eşitlik

Aynı işlem sadece toprak pikselleri içeren bir katman üretmek için uygulanmıştır. Raster hesaplayıcıda uygulanan eşitlik Şekil 3.37’de gösterilmiştir. Eşik katmanını bitki pikselleri için 1 değerini, bitki olmayan sınıflar (toprak) için 0 değerini içeren bir katman olduğu için bu eşitlikle 0.5 değerinden küçük pikseller yani bitki olmayan kısımlar için piksel değeri hesaplanırken, bitki pikselleri için “veri yok” değeri üretilmiştir.

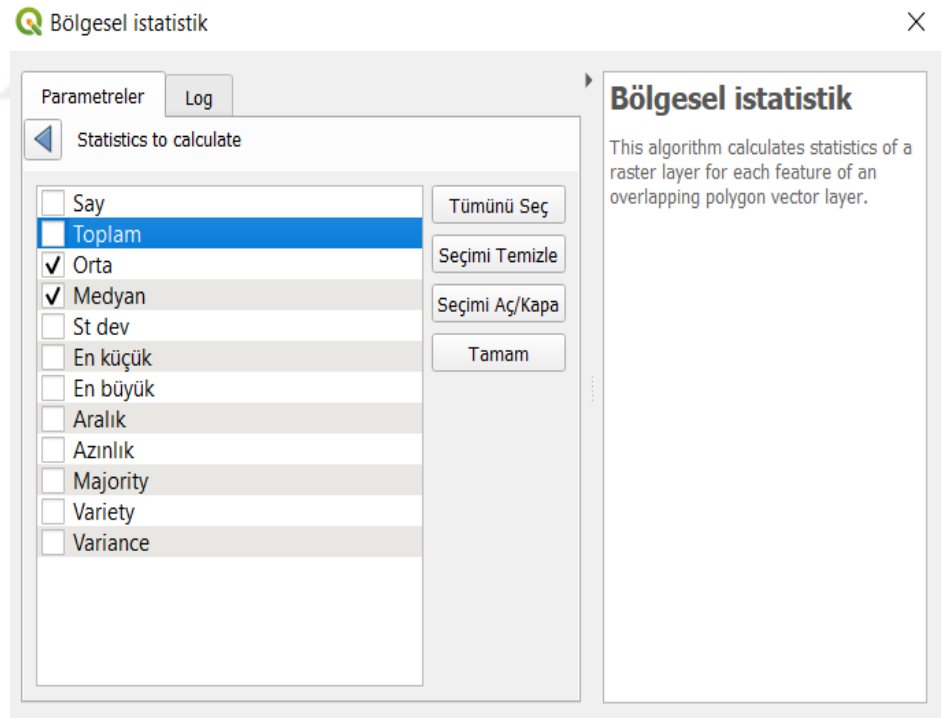


Şekil 3.37. Sadece toprak pikselleri içeren bir katman üretmek için uygulanan eşitlik

Bölgesel istatistik aracını kullanarak sadece bitki pikselleri içeren katman ile ortalama ve maksimum değerleri kullanarak kanopi yükseklik değerleri hesaplanmıştır (Şekil 3.38). Sadece toprak pikseli içeren katman ile bölgesel istatistikte ortalama ve medyan değerler kullanılarak yükseklik değerleri üretilmiştir (Şekil 3.39).



Şekil 3.38. Bölgesel istatistik aracıyla hesaplanılan değerlerden bazıları



Şekil 3.39. Bölgesel istatistik aracıyla toprak yüksekliği belirlemek için hesaplanılan değerlerden bazıları

Üretilen değerler, öznitelik tablolarından kopyalanıp Microsoft Excel'e aktarılmıştır. Bu veriler kanopi alanı ve kanopi hacmini hesaplamak için kullanılmıştır. Hesaplamalara geçmeden önce oluşturulan 47 alt parselin alanı "objeleri belirle" seçeneğinden

bakılarak Excel'e aktarılmıştır. Parsel alanları ile ortalama kanopi alanı çarpılarak kanopi alanı metrekare cinsinden elde edilmiştir.

Ortalama kanopi boyu, sadece kanopi pikselleri içeren SYM'den üretilen ortalama boy ile sadece toprak pikselleri içeren SYM'den üretilen ortalama medyan toprak yükseklik değerinin farkı cinsinden hesaplanmıştır. Ortalama kanopi boylarına bakıldığında görülen negatif değerler bitki boylarının toprak seviyesinin altında kaldığını göstermektedir. Bu sebeple, yapılacak hacim hesaplamalarında ortalama bitki boylarının negatif değerleri yerine pozitif değerleri değerlendirmeye alınmıştır. Maksimum kanopi boyu, sadece kanopi pikselleri içeren SYM'den üretilen maksimum kanopi boyu ile sadece toprak pikselleri içeren SYM'den üretilen medyan toprak boyunun farkı cinsinden hesaplanmıştır.

Kanopi hacmi ise, metrekare cinsinden hesaplanılan kanopi alanı ile hesaplanılan ortalama kanopi boyunun çarpımı olacak şekilde belirlenmiştir.

Quantum GIS programında yapılan tüm işlemler Agisoft'ta üretilen orta hassasiyetli sonuç ürünler ve Pix4DMapper'da üretilen orta ve yüksek hassasiyetli sonuç ürünler için ayrı ayrı tekrar edilmiştir. Sonuçta 4 farklı veriyle kanopi hacmi hesaplaması yapılmıştır.

Hesaplanılan veriler SPSS istatistik programında karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında fotogrametrik değerlendirme Pix4D ve Agisoft Metashape programları ile yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda, Agisoft'ta yüksek hassasiyetle yapılan process yaklaşık 96 saat sürmüştür (ortomozaik üretilmesi dahil). Pix4D'de yüksek hassasiyetle yapılan process ise yaklaşık 7 saat sürmüştür. Ancak veri işlemede kullanılan bilgisayarlar farklıdır. Agisoft programıyla veri işleme Intel(R) Core(TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz 11.78GB Ram'e sahip bilgisayar ile yapılmıştır. Pix4D programı ise Windows 10 Pro, 64-bit CPU: AMD Athlon Gold 3150U with Radeon Graphics 6GB Ram'e sahip bir bilgisayar ile yapılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek adına Agisoft ile veri işleme, verilerin Pix4D ile işlendiği aynı bilgisayarda da yapılmış, process süreci yaklaşık 7.5 saat sürmüştür. Sonuç olarak Pix4D programının Agisoft Metashape'ten daha hızlı olduğu görülmüştür.

Pix4D'de yüksek hassasiyetle yapılan işlemeye göre yer örnekleme aralığı 0.75 cm, Agisoft'ta ise 0.673 cm olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında 5 adet YKN ve 1 adet KN kullanılmıştır. Pix4D'de yüksek hassasiyetle yapılan işlemeye göre YKN'lerin ortalama $RMSE = 0.008 m$ olarak bulunmuştur. Agisoft'ta ise bu hata $RMSE = 0.845 cm$ olarak bulunmuştur. Agisoft'ta yüksek hassasiyetle üretilen nokta bulutunun nokta sayısı 139025114 iken, Pix4D'de ise nokta bulutunun 3B yoğunlaştırılmış nokta sayısı 77275382'dir.

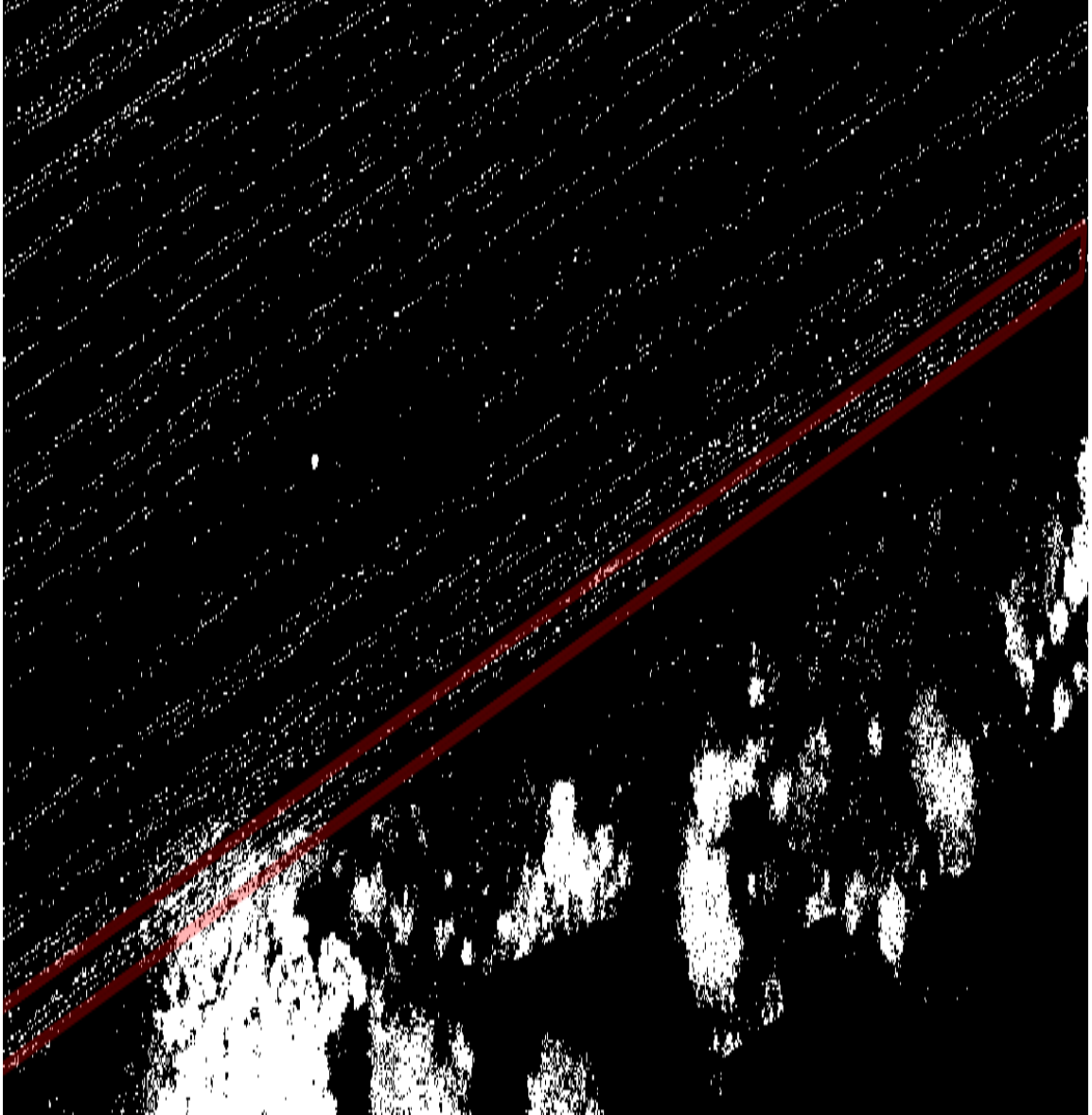
İki ticari yazılımı maliyet açısından karşılaştırmak gerekirse Agisoft Metashape Professional'ın fiyatı 3499 \$, Pix4D Mapper'ın fiyatı ise 3500\$'dır. Her iki programda kullanım açısından oldukça kolaydır ancak Agisoft Metashape'in işlem yükü Pix4D'ye göre biraz daha fazladır. Agisoft Metashape kullanıcılara 31 günlük deneme sürümünü sunarken, Pix4D Mapper'da ise bu süre 15 gündür.

Tez çalışması kapsamında kullanılan bir diğer yazılım da Quantum GIS'tir. Bu GIS yazılımı, açık kaynak kodlu olması, açık kaynak kodlu olduğu için kullanıcıları tarafından sürekli geliştirilmesi, ücretsiz olması ve sağladığı tüm işlevsellikler sebebiyle tercih edilmiştir. QGIS'te yapılan işlemlerin ardından oluşturulan parsellerden elde edilen veriler Excel'e aktarılmıştır. Excel'de ise ortalama kanopi boyu ve hacim gibi kanopi yapısal parametreleri çeşitli hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir.

Excel programında elde edilen verilere göre; QGIS'te Agisoft ve Pix4D Mapper'da orta ve yüksek hassasiyetle üretilen sonuçlarla yapılan hesaplamalara göre ortalama kanopi

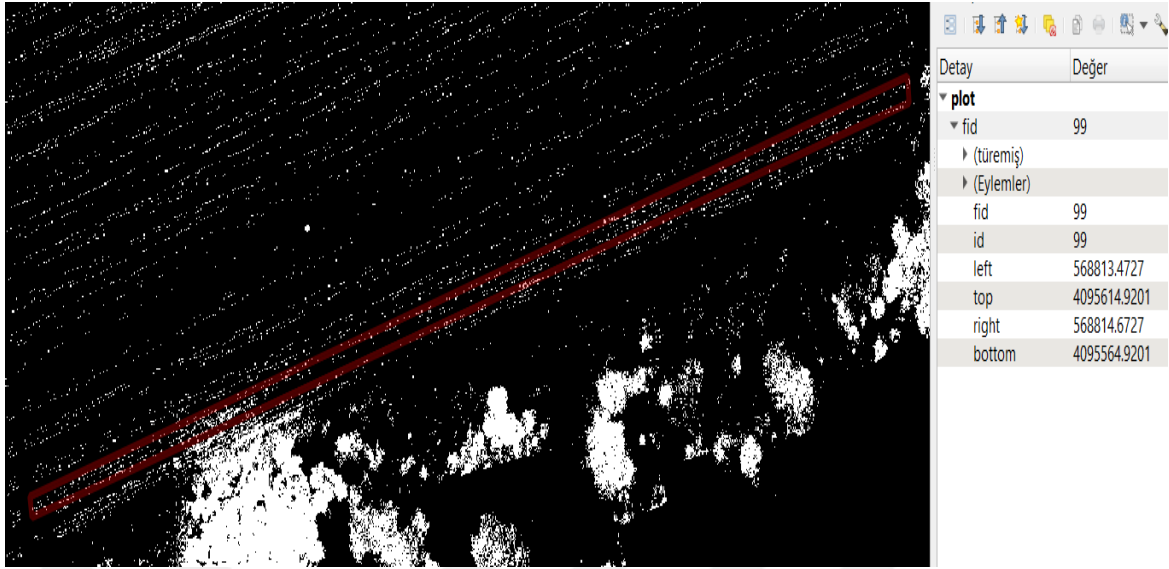
boyunun en yüksek olduğu parsel sırasıyla 65 ve 104. parsellerdir. Kanopi boyunun en düşük olduğu parseller ise 4. Ve 9. parsellerdir.

En yüksek hacim verisine sahip parsel tüm hassasiyetler için 104. parseldir. QGIS’te incelendiğinde oluşturulan bu bölge içine maydanozdan başka bitkilerin de girdiği ve hacmi etkilediği görülmektedir (Şekil 4.1).



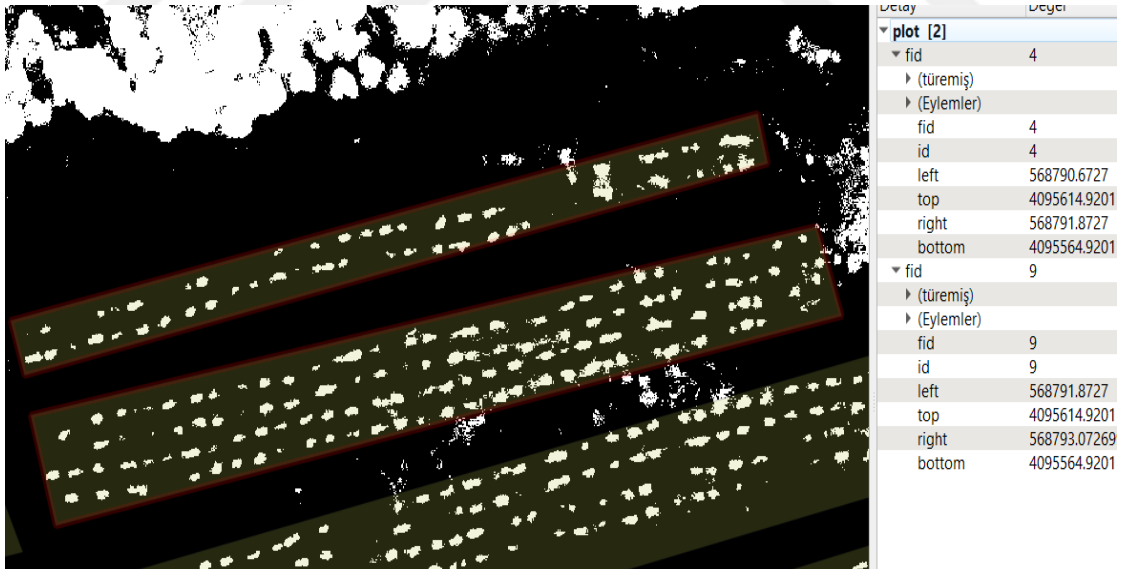
Şekil 4.1. En yüksek kanopi hacmine sahip 104 numaralı parsel

104 numaralı parsel dışında en yüksek hacim 99. parselde gözükmemektedir (Şekil 4.2). Bitki yoğunluğu diğer parsellere göre daha az gibi gözükse de bu parselde bitki boyunun daha fazla olması kanopi hacmini arttıran etken olarak söylenebilir. Ayrıca bazı yabancı otların bu bölgede varlığının hacmi arttırdığı söylenebilir.



Şekil 4.2. En yüksek ikinci kanopi hacmine sahip 99 numaralı parsel

En düşük hacim verisine sahip parsel Pix4D (orta) hariç 4. Parseldir (Şekil 4.3). Pix4D (orta) için ise en düşük hacim verisine sahip parsel 9. parseldir. En düşük kanopi boyuna 4 ve 9 numaralı parseller sahip olduğu için hacim de doğal olarak en az bu parsellerde gözlenmiştir.



Şekil 4.3. 4 ve 9 numaralı parseller

Elde edilen veriler ışığında SPSS istatistik programında sonuçlar karşılaştırılıp analiz edilmiştir. SPSS'te Pix4D ve Agisoft'ta orta ve yüksek hassasiyetle üretilen verilerle hesaplanılan hacim, ortalama kanopi boyu, ortalama kanopi bölgesi ve ortalama Aşırı Yeşil İndeks değerleri kullanılarak çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. IBM SPSS'in kullanılan sürümü 29.0.0.0'dır.

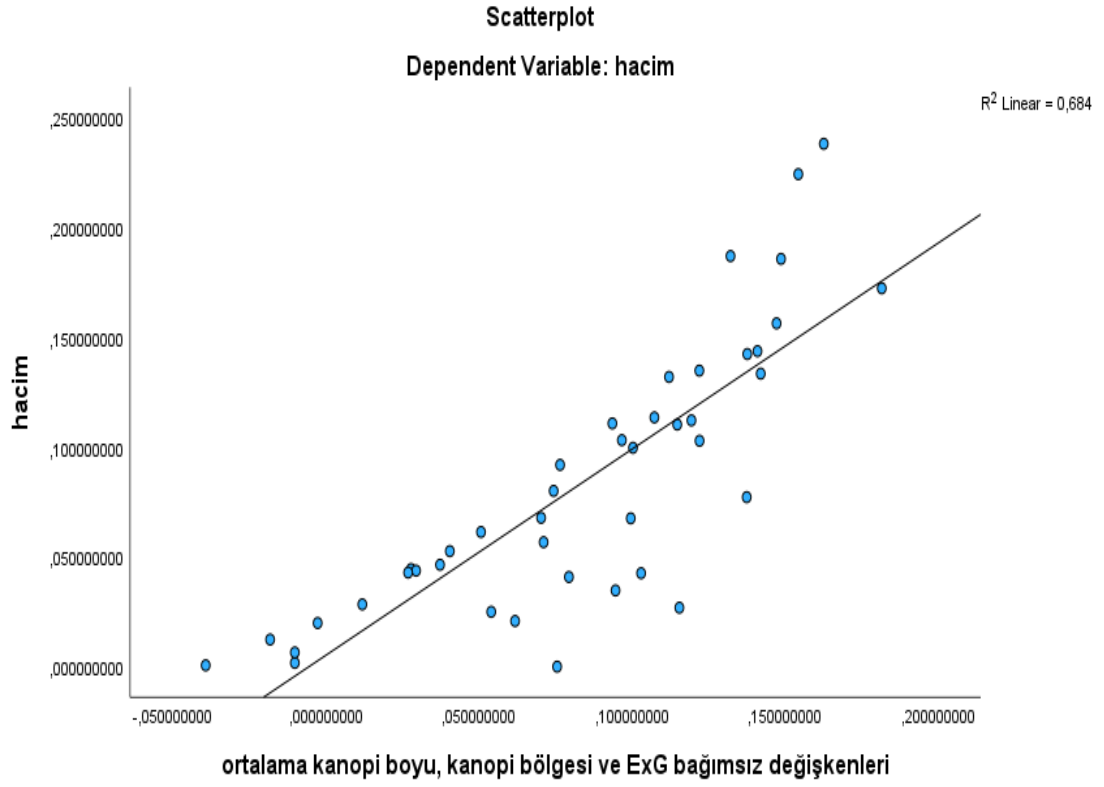
4.1. Pix4D (yüksek) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları

Kanopi boyu, kanopi bölgesi ve Aşırı Yeşil İndeks (ExG) bağımsız değişkenlerini kullanarak hacim değişkenini yordamak amacıyla çok değişkenli bir regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.4). Analizi anlamlı kılmak için uç değerler analizden çıkarılmıştır (Şekil 4.5, N=43). Öncelikle hacim bağımlı değişkeni ile diğer 3 bağımsız değişkenin ilişkisini yorumlamak gerekirse; kanopi boyu ile hacim arasında Pearson Korelasyon değeri $r = 0.667$ olarak bulunmuştur. Bu, hacim ve boy değişkenleri arasında güçlü ve pozitif yönde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Kanopi bölgesi ve hacim arasında ise $r = 0.387$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç, kanopi bölgesi ve hacim arasında orta ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. ExG ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.044$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç ise bize ExG ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir.

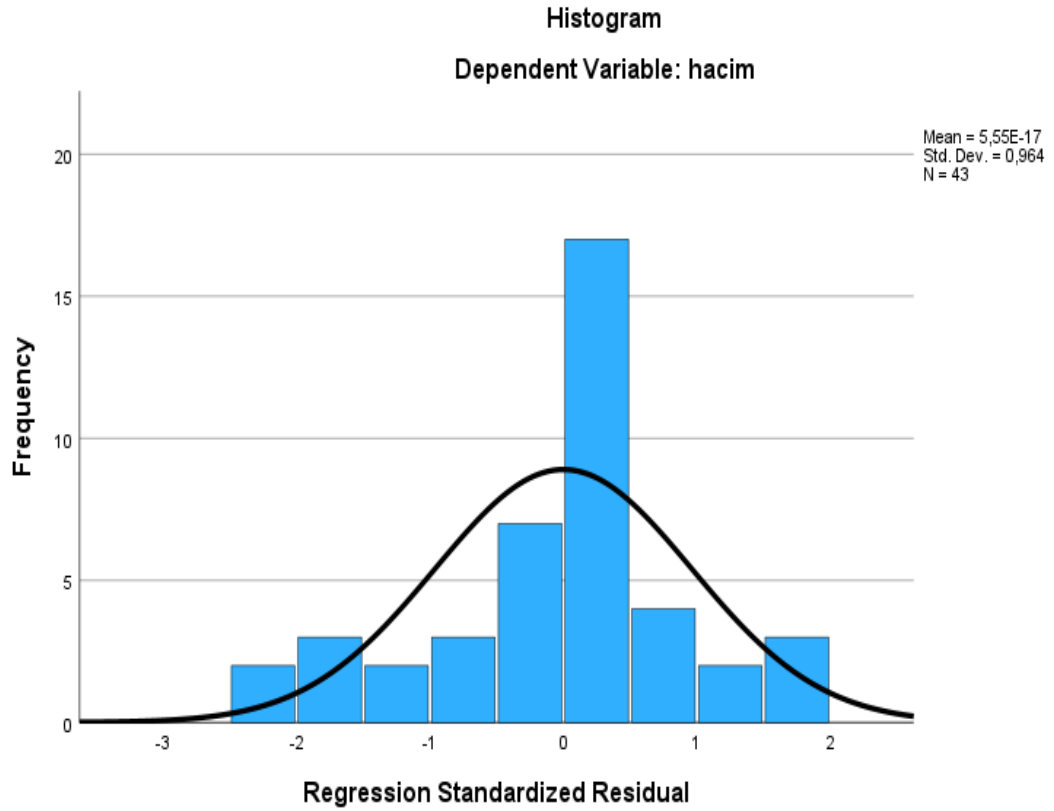
Analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli, $F(3,39) = 41.746$, $p < .001$ ve bağımlı değişkendeki varyansın %74'ü ($R^2_{adj} = .744$) bağımsız değişkenler tarafından açıklandığı bulunmuştur. Tablo 4.1'e göre; ortalama kanopi boyu hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .787$, $t(39) = 9.49$, $p < .001$, $R^2 = .70$ sonuçlarına varılmıştır. Kanopi bölgesi de hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .623$, $t(39) = 6.229$, $p < .001$, $R^2 = .50$ sonuçlarına varılmıştır. Ancak Aşırı Yeşil İndeks hacim değişkenini negatif ve anlamsız olarak yordamaktadır. $\beta = -.078$, $t(39) = -.758$, $p = .453$, $R^2 = -.015$ sonuçlarına varılmıştır.

Tablo 4.1. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Pix4D yüksek için)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		R^2
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound	
(Constant)	,020	,131		,154	,878	-,245	,286	
Kanopiboyu	1,435	,151	,787	9,490	<.001	1,129	1,741	,70
kanopibölge	2,034	,327	,623	6,229	<.001	1,374	2,695	,50
ExG	-1,052	1,388	-,078	-,758	,453	-3,859	1,754	-,015



Şekil 4.4. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Pix4D yüksek için)



Şekil 4.5. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği

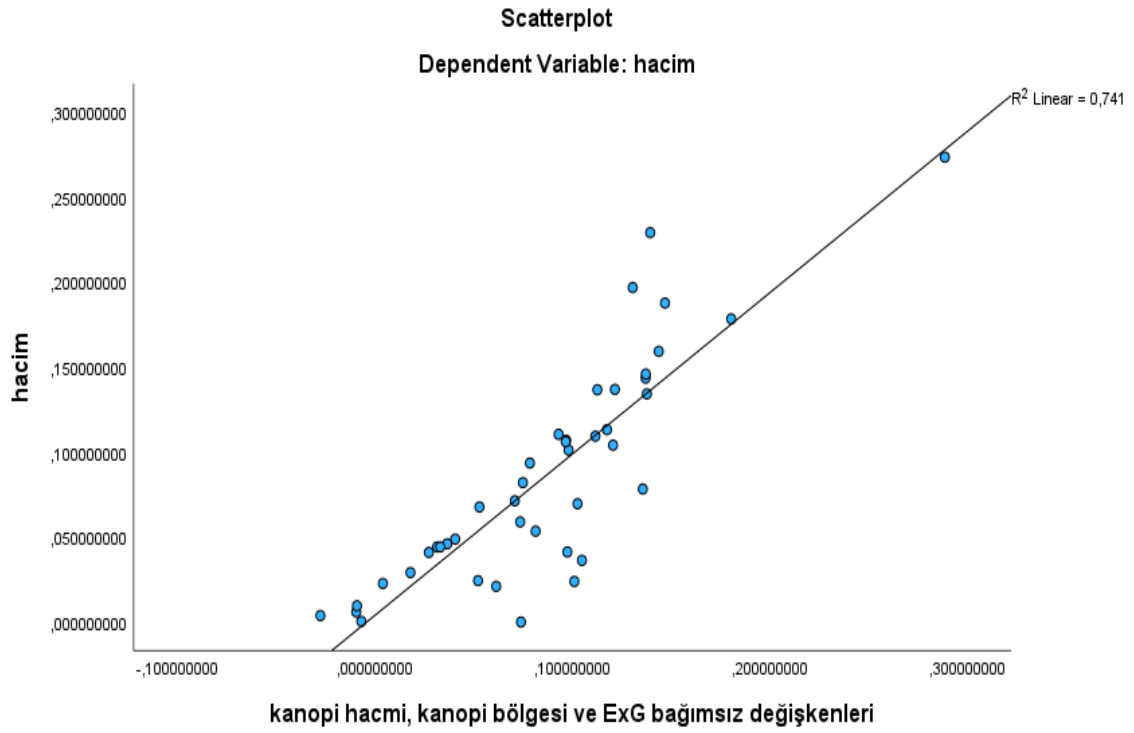
4.2. Pix4D (orta) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları

Kanopi boyu, kanopi bölgesi ve Aşırı Yeşil İndeks (ExG) bağımsız değişkenlerini kullanarak hacim değişkenini yordamak amacıyla çok değişkenli bir regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.6). Analizi anlamlı kılmak için uç değerler analizden çıkarılmıştır (Şekil 4.7, N=43). İlk olarak; hacim bağımlı değişkeni ile diğer 3 bağımsız değişkenin ilişkisini yorumlamak gerekirse; kanopi boyu ile hacim arasında Pearson Korelasyon değeri $r = 0.776$ olarak bulunmuştur. Bu, hacim ve boy değişkenleri arasında güçlü ve pozitif yönde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Kanopi bölgesi ve hacim arasında ise $r = 0.266$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç, kanopi bölgesi ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. ExG ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.127$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç ise bize ExG ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir.

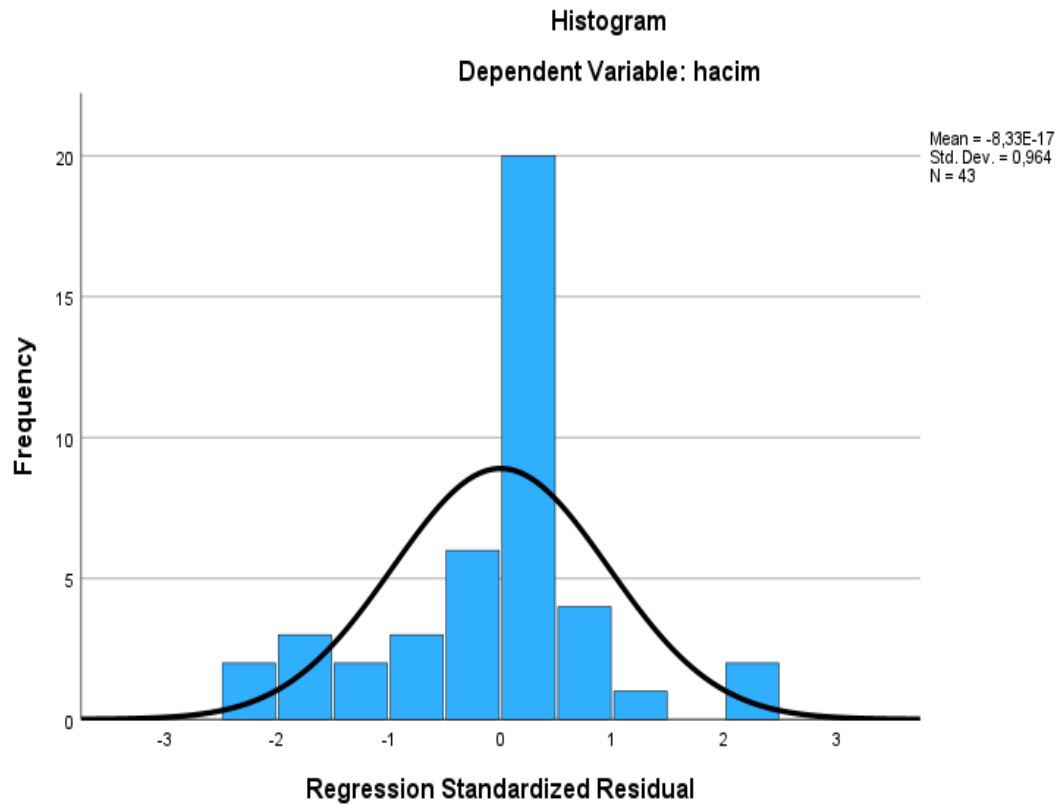
Analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli, $F(3,39) = 52.827$, $p < .001$ ve bağımlı değişkendeki varyansın %79'u ($R^2_{adj} = .787$) bağımsız değişkenler tarafından açıklandığı bulunmuştur. Buna göre; ortalama kanopi boyu hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .874$, $t(39) = 11.981$, $p < .001$, $R^2 = .787$ sonuçlarına varılmıştır. Kanopi bölgesi de hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .487$, $t(39) = 5.048$, $p < .001$, $R^2 = .40$ sonuçlarına varılmıştır. Ancak Aşırı Yeşil İndeks hacim değişkenini negatif ve anlamsız olarak yordamaktadır. $\beta = -.046$, $t(39) = -.485$, $p = .631$, $R^2 = -.006$ sonuçlarına varılmıştır.

Tablo 4.2. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Pix4D orta için)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		R^2
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound	
(Constant)	-,008	,123		-,062	,951	-,256	,241	
Kanopiboyu	1,378	,115	,874	11,981	<.001	1,145	1,610	,787
Kanopibölge	1,778	,352	,487	5,048	<.001	1,066	2,491	,40
ExG	-,644	1,330	-,046	-,485	,631	-3,334	2,045	-,006



Şekil 4.6. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Pix4D orta için)



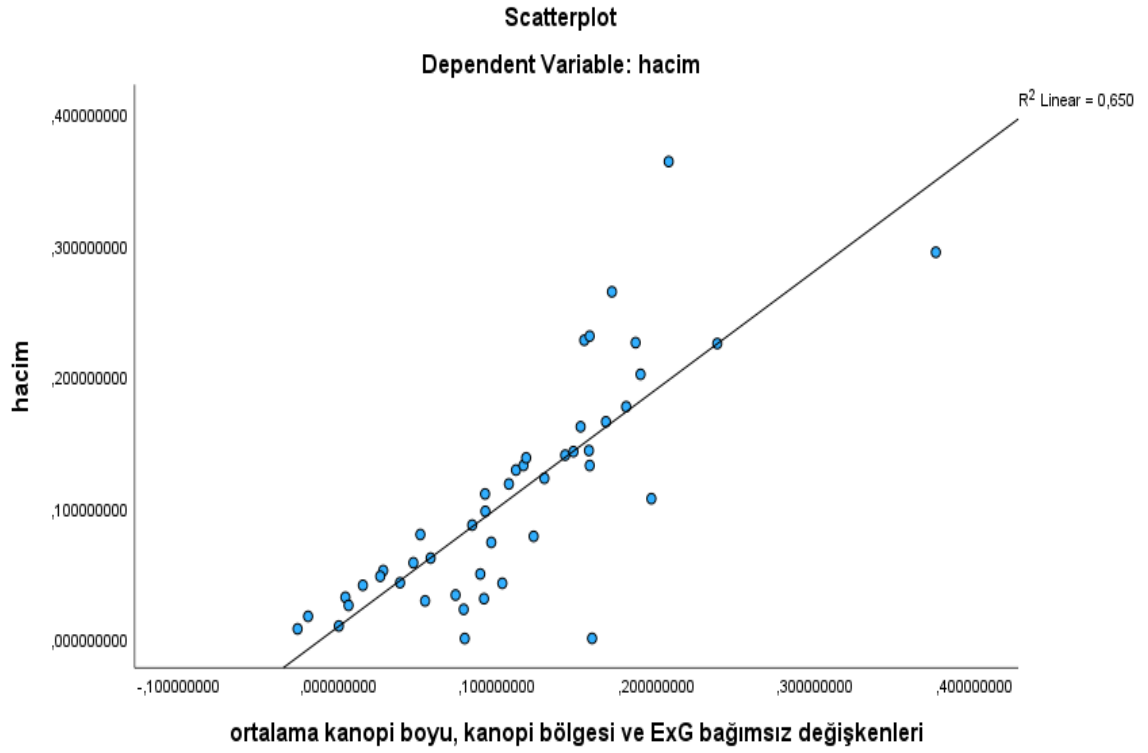
Şekil 4.7. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği

4.3. Agisoft (yüksek) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları

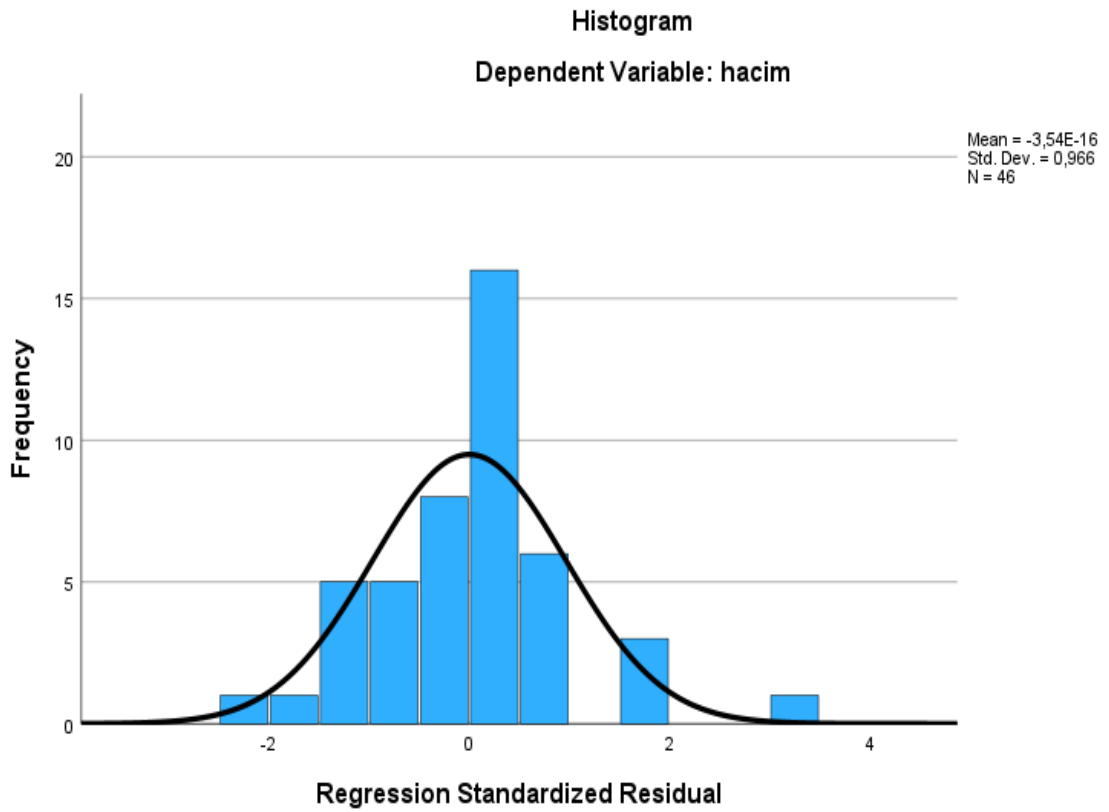
Kanopi boyu, kanopi bölgesi ve Aşırı Yeşil İndeks bağımsız değişkenlerini kullanarak hacim değişkenini yordamak amacıyla çok değişkenli bir regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.8). Analizi anlamlı kılmak için uç değerler analizden çıkarılmıştır (Şekil 4.9, N=46). İlk olarak; hacim bağımlı değişkeni ile diğer 3 bağımsız değişkenin ilişkisini yorumlamak gerekirse; kanopi boyu ile hacim arasında Pearson Korelasyon değeri $r = 0.764$ olarak bulunmuştur. Bu, hacim ve boy değişkenleri arasında güçlü ve pozitif yönde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Kanopi bölgesi ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.177$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç, kanopi bölgesi ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. ExG ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.011$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç ise bize ExG ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. Analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli, $F(3,42) = 41.444$, $p < .001$ ve bağımlı değişkendeki varyansın %73'ü ($R^2_{adj} = .729$) bağımsız değişkenler tarafından açıklandığı bulunmuştur. Buna göre; ortalama kanopi boyu hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .874$, $t(42) = 10.804$, $p < .001$, $R^2 = .736$ sonuçlarına varılmıştır. Kanopi bölgesi de hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .451$, $t(42) = 4.581$, $p < .001$, $R^2 = .33$ sonuçlarına varılmıştır. Ancak Aşırı Yeşil İndeks hacim değişkenini negatif ve anlamsız olarak yordamaktadır. $\beta = -.962$, $t(42) = -.599$, $p = .552$, $R^2 = -.008$ sonuçlarına varılmıştır.

Tablo 4.3. Hacim tahmini için çoklu doğrusal regresyon analiz sonuçları (Agisoft yüksek için)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		R^2
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound	
(Constant)	,017	,170		,100	,921	-,327	,361	
Kanopiboyu	1,860	,172	,874	10,806	<.001	1,513	2,207	,736
kanopibölge	1,628	,356	,451	4,581	<.001	,911	2,346	,33
ExG	-,962	1,606	-,058	-,599	,552	-4,203	2,279	-,008



Şekil 4.8. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Agisoft yüksek için)



Şekil 4.9. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği

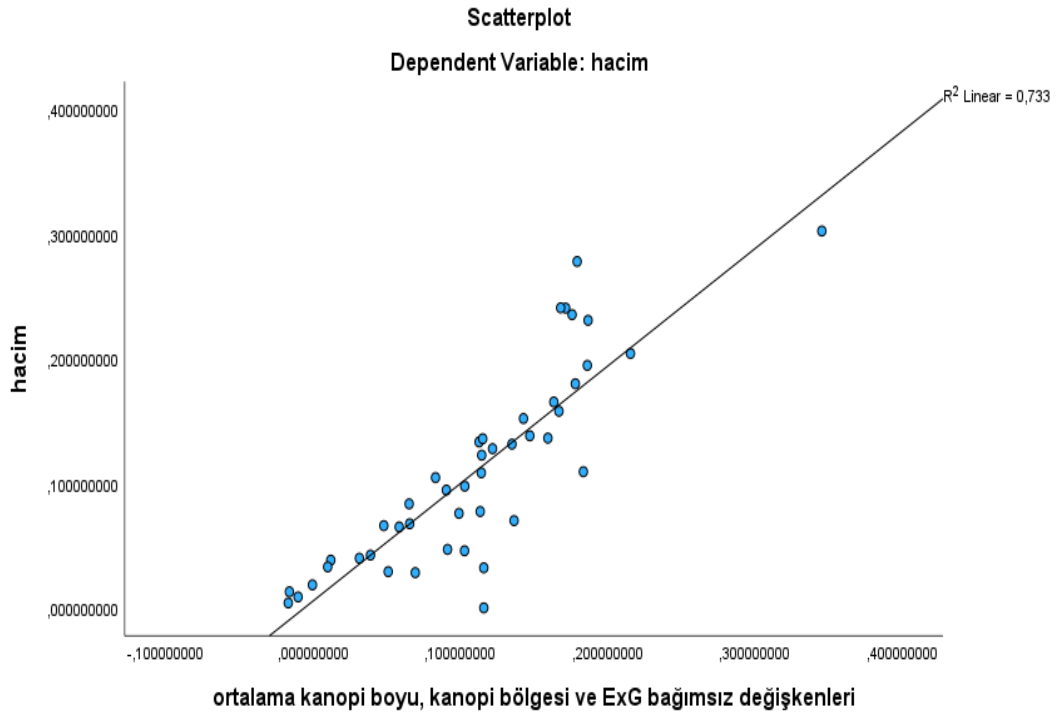
4.4. Agisoft (orta) İçin Çoklu Regresyon Analizi Sonuçları

Kanopi boyu, kanopi bölgesi ve Aşırı Yeşil İndeks (ExG) bağımsız değişkenlerini kullanarak hacim değişkenini yordamak amacıyla çok değişkenli bir regresyon analizi yapılmıştır (Şekil 4.10). Analizi anlamlı kılmak için uç değerler analizden çıkarılmıştır (Şekil 4.11, N=45). İlk olarak; hacim bağımlı değişkeni ile diğer 3 bağımsız değişkenin ilişkisini yorumlamak gerekirse; kanopi boyu ile hacim arasında Pearson Korelasyon değeri $r = 0.767$ olarak bulunmuştur. Bu, hacim ve boy değişkenleri arasında güçlü ve pozitif yönde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Kanopi bölgesi ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.319$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç, kanopi bölgesi ve hacim arasında orta ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir. ExG ve hacim arasında ise Pearson Korelasyon değeri $r = 0.089$ olarak bulunmuştur. Bu sonuç ise bize ExG ve hacim arasında zayıf ve pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir.

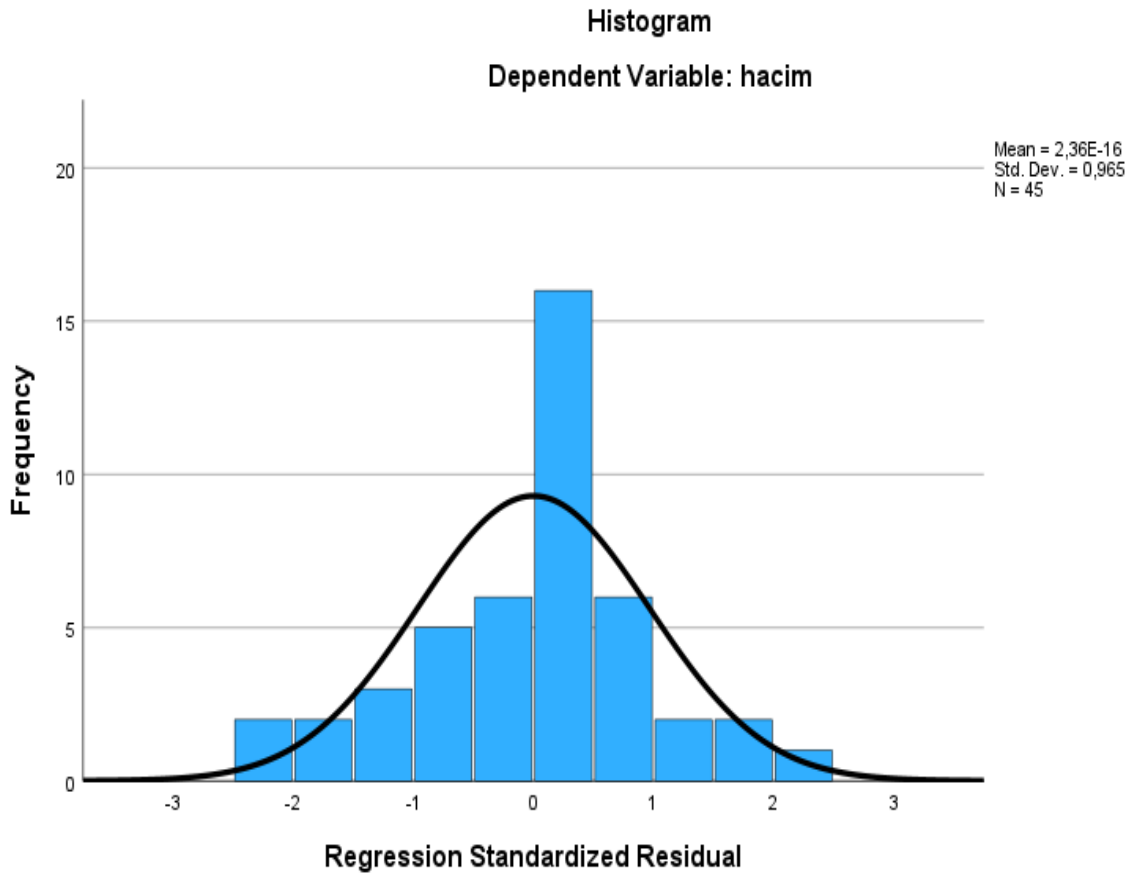
Analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli, $F(3,41) = 53.456$, $p < .001$ ve bağımlı değişkendeki varyansın %78'i ($R^2_{adj} = .781$) bağımsız değişkenler tarafından açıklandığı bulunmuştur. Buna göre; ortalama kanopi boyu hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .837$, $t(41) = 11.688$, $p < .001$, $R^2 = .769$ sonuçlarına varılmıştır. Kanopi bölgesi de hacim değişkenini olumlu ve anlamlı olarak yordamaktadır. $\beta = .508$, $t(41) = 5.751$, $p < .001$, $R^2 = .446$ sonuçlarına varılmıştır. Ancak Aşırı Yeşil İndeks hacim değişkenini negatif ve anlamsız olarak yordamaktadır. $\beta = -.086$, $t(41) = -.976$, $p = .335$, $R^2 = -.023$ sonuçlarına varılmıştır.

Tablo 4.4. Hacim tahmini için çoklu doğrusal analiz sonuçları (Agisoft orta için)

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		R^2
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound	
(Constant)	,057	,144		,392	,697	-,235	,348	
kanopiboyu	1,697	,145	,837	11,688	<.001	1,404	1,990	,769
kanopibölge	1,957	,340	,508	5,751	<.001	1,270	2,644	,446
ExG	-1,338	1,371	-,086	-,599	,335	-4,107	1,431	-,023



Şekil 4.10. Regresyon ayarlı öngörülen değer (Agisoft orta için)



Şekil 4.11. Regresyon analizi sonucunda oluşan Histogram grafiği

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında DJI firması tarafından üretilen RGB kameralı Phantom 4 RTK insansız hava aracı kullanılmıştır. Fotogrametrik değerlendirme Agisoft ve Pix4D yazılımları ile yapılmış, her iki yazılım arasında bariz farklar gözlenmemiştir. İHA'dan elde edilen RGB görüntülerin kanopi yapısal parametreleri çıkarmada oldukça faydalı ve düşük maliyetli olduğu görülmüştür. Yapılacak diğer çalışmalarda LIDAR, multispektral, hiperspektral, termal kamera gibi farklı sensörlerle bu yöntemin araştırılıp yorumlanabileceği belirtilmelidir. Ek olarak RGB görüntülerde de var olan yabancı otların varlığı zaman içerisinde artmış olup, maydanoz bitkisinin gelişimini önlemiş ve tarlaya yayılmıştır, bu sebeple maydanoz bitkisi sürülüp yerine buğday bitkisi ekilmek zorunda kalmıştır.

Arazi çalışması kapsamında 5 adet YKN tesis edilmiştir. YKN tesisinin ya da sayısının kanopi yapısal parametrelerini belirlemeye olan etkisi araştırılabilir. Ek olarak; tez çalışması kapsamında İHA uçuş yüksekliği 25m olarak gerçekleştirilmiştir. Uçuş yüksekliğinin kanopi parametrelerini belirlemeye olan etkisi bir diğer araştırma konusu olarak önerilmektedir.

Çalışma kapsamında kanopi sağlığı ve kanopi alanı hakkında bilgi veren bitki indeksi olarak Aşırı Yeşil İndeks (ExG) kullanılmıştır. Aşırı Yeşil İndeksin bitki bölgelerini ve alanlarını çıkarmada başarılı olduğu görülmüştür. Ancak VARI, NDVI, OSAVI, SAVI, NDRE gibi farklı bitki indekslerinin kullanımının incelenip hangi bitki indeksinin kanopi yapısal parametrelerini çıkarmada daha faydalı olabileceği araştırılabilir.

Agisoft ve Pix4D yazılımlarında farklı hassasiyetlerle üretilen sonuç ürünlere göre SPSS'te yapılan analiz sonucunda; hacim bağımlı değişkeni üzerinde en fazla kanopi boyunun etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Kanopi alanı bağımsız değişkeni ise hacim değişkenini genelde orta ve anlamlı olarak yordamaktadır. Ancak ExG değişkeni ile hacim arasında zayıf ve anlamsız bir ilişki olduğu görülmüştür. Hacim ve ortalama kanopi boyu arasında Pix4D (orta) için Pearson korelasyon katsayısı $r = 0.776$, Pix4D (yüksek) için $r = 0.667$, Agisoft (orta) için $r = 0.767$, Agisoft (yüksek) için $r = 0.764$ olarak bulunmuştur.

Yapılan çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda bağımsız değişkenler ve hacim arasında ise Agisoft (orta) için belirleme katsayısı $R^2 = 0.733$, Agisoft (yüksek) için $R^2 = 0.65$, Pix4D (orta) için $R^2 = 0.741$, Pix4D (yüksek) için $R^2 = 0.684$ olarak

bulunmuştur. Bu sonuçlara göre; verilerin orta hassasiyetle işlenip sonuç ürünler üretilerek kanopi yapısal parametrelerinin çıkarımının yapılmasının daha doğru ve daha hızlı olacağı sonuçlarına varılmıştır.

Yapısal parametreler, bitki büyümesi ve bitki sağlığı ile yakından ilişkilidir. Bu sebeple kanopi hacmi, kanopi alanı gibi metriklerin bilinmesi kanopi yönetimi uygulamalarını (budama, ilaçlama, gübreleme, sulama, fenotipleme vb.) daha başarılı bir şekilde gerçekleştirmeye olanak sağlayacaktır.

Sonuç olarak; uygulanan bu yöntemin ürün gelişimini incelemeye faydalı olabileceği görülmüştür. Farklı bitki büyüme dönemlerinde yapılacak birden fazla İHA uçuşu bu yöntemin tutarlılığını anlamada faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abd-Elrahman, A., Guan, Z., Dalid, C., Whitaker, V., Britt, K., Wilkinson, B., & Gonzalez, A. (2020). Automated Canopy Delineation and Size Metrics Extraction for Strawberry Dry Weight Modeling Using Raster Analysis of High-Resolution Imagery. *Remote Sensing*, 12(21), 3632.
- Agisoft. (2021). Metashape Presentation: https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf (19.10.2022)
- Allain, R. (2017). How Do Drones Fly? Physics, of Course! <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/> (22.05.2022)
- Anonim. (2005). Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005-2030. Federation of American Scientist. https://irp.fas.org/program/collect/uav_roadmap2005.pdf (24.05.2022)
- Anonim. (2014). RedEdge-P Multispektral kamera görüntüsü. Simi Valley, CA: MicaSense, AgEagle Sensor Systems Inc. <https://micasense.com/rededge-p/> (21.05.2022)
- Anonim. (2018). What is Hyperspectral Imaging? Milan, Italy: NIREOS. <https://www.nireos.com/hyperspectral-imaging/> (22.05.2022)
- Anonim. (2021). CCD vs CMOS- Fact and Fiction. One Slide Photography. <http://oneslidephotography.com/ccd-vs-cmos-fact-and-fiction/> (23.05.2022)
- Anonim. (2021). Sürüklenme. Wikipedi. <https://tr.wikipedia.org/wiki/S%C3%BCr%C3%BCkleme> (22.05.2022)
- Anonim. (2021). What is Ground Sample Distance and How Does it Affect Your Drone Data? New South Wales, Australia: Propeller Aerobotics Pty Ltd. <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/> (24.05.2022)
- Anonim. (2021). What is Lidar? National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html> (22.05.2022)
- Anonim. (2022). DJI N3 flight controller. DJI Corporation. <https://www.dji.com/products/components> (22.05.2022)
- Anonim. (2022). Our Approach. Rome, Italy: The Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO. <https://www.fao.org/food-systems/our-approach/en/> (13.05.2022)
- Baier, S. (2012). What is Full Spectrum Lighting? Ohio, United States of America: Lumenistics. <http://lumenistics.com/what-is-full-spectrum-lighting/> (22.05.2022)
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernandez, D., & Moreno, M. A. (2018). Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging. *Precision Agriculture*, 19, 840-857.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing*, 6, 10395-10412.
- BÖHHBÜY. (2018) Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği. Tertibi 5, Cilt 59, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/3.5.201811962.pdf> (09.07.2023)
- Canis, B. (2015). Unmanned Aircraft Systems (UAS): Commercial Outlook for a New Industry. Congressional Research Service. <https://sgp.fas.org/crs/misc/R44192.pdf> (18.05.2022)
- Carrivick, J., Smith, M. W., & Quincey, D. J. (2016). Introduction to Structure from

- Motion in the Geosciences. Chichester, United Kingdom: Wiley-Blackwell.
- Caruso, G., Palai, G., Marra, F. P., & Caruso, T. (2021). High-Resolution UAV Imagery for Field Olive (*Olea europaea* L.) Phenotyping. *Horticulturae*, 7(8), 258.
- Caruso, G., Zarco-Tejada, P., González-Dugo, V., Moriondo, M., Tozzini, L., Palai, G., . . . Gucci, R. (2019). High-resolution imagery acquired from an unmanned platform to estimate biophysical and geometrical parameters of olive trees under different irrigation regimes. *Plos One*, 14(1).
- Cavallini, P. (2007). Free GIS desktop and analyses: Quantum GIS, the easy way. Pontedera, Toskana, İtalya. (17.03.2023) tarihinde http://www.gisdevelopment.net/magazine/global/2007/august/62_1.htm
- Chang, A., Jung, J., Yeom, J., Maeda, M., Landivar, J., Enciso, J., . . . Anciso, J. (2021). Unmanned Aircraft System Based High-Throughput Phenotyping (HTP) for Tomato Yield Estimation. *Journal of Sensors*, 2021.
- Chang, A., Yeom, J., Jung, J., & Landivar, J. (2020). Comparison of Canopy Shape and Vegetation Indices of Citrus Trees Derived from UAV Multispectral Images for Characterization of Citrus Greening Disease. *Remote Sensing*, 12(24).
- Colwell, F. d., Souter, J., Bryan, G., Compton, L., Boonham, N., & Prashar, A. (2021). Development and Validation of Methodology for Estimating Potato Canopy Structure for Field Crop Phenotyping and Improved Breeding. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Çakıcı, F., & Shabani, R. (2016). Görev Amaçlı Döner Kanat İHA Tasarımı. Ankara: TÜBİTAK.
- Eisenbeiß, H. (2009). UAV Photogrammetry. (PhD Thesis). Zürich, Switzerland: Institute of Geodesy and Photogrammetry.
- Ergün, B. (2010). Sayısal Fotogrametri. Gebze Teknik Üniversitesi. https://abl.gtu.edu.tr/hebe/AblDrive/74611106/w/Storage/106_2010_2_521_74611106/Downloads/jfm-521saysal-fotogrametri-dersiders-notlar.pdf (23.05.2022)
- Gil-Docampo, M. L., Arza-García, M., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Marcos-Robles, J. L., & Sánchez-Sastre, L. F. (2018). Above-ground biomass estimation of arable crops using UAV-based SfM photogrammetry. *Geocarto International*, 35(7), 687-699.
- Gitelson, A., Kaufman, Y., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing*, 80, 76-87.
- Han, Y., Tarakey, B. A., Hong, S.-J., Kim, S.-Y., Kim, E., Lee, C.-H., & Kim, G. (2021). Calibration and Image Processing of Aerial Thermal Image for UAV Application in Crop Water Stress Estimation. *Journal of Sensors*, 2021.
- ICAO. (2011). Unmanned Aircraft Systems (UAS). Montréal, Quebec, Canada: The International Civil Aviation Organization. https://www.icao.int/meeting/uas/document/circular%2038_en.pdf (18.05.2022)
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*, 5, 155-168.
- Kapıcıoğlu, H. Ş., Hastaoğlu, K. Ö., Poyraz, F., & Gül, Y. (2018). Investigation of topographic effect in ground control point selection in UAV photogrammetry: Gaziantep/ Nizip. (s. 1174-1178). CIEA 2018 - International Conference On Innovative Engineering Applications.
- Karl, J., Yelich, J., Ellison, M., & Lauritzen, D. (2020). Estimates of Willow (*Salix* Spp.) Canopy Volume using Unmanned Aerial Systems. *Rangeland Ecology &*

- Management, 73, 531-537.
- Korchenko, A. G., & Illyash, O. S. (2013). The generalized classification of Unmanned Air Vehicles. 2nd International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” Proceedings (s. 28-34). Kiev, Ukraine: IEEE.
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., & Escolà, A. (2011). Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. *Sensors*, 11(2), 2177-2194.
- Lu, J., Cheng, D., Geng, C., Zhang, Z., Xiang, Y., & Hu, T. (2021). Combining plant height, canopy coverage and vegetation index from UAV-based RGB images to estimate leaf nitrogen concentration of summer maize. *Biosystems Engineering*, 202, 42-54.
- Lussem, U., Bolten, A., Menne, J., Gnyp, M. L., Schellberg, J., & Bareth, G. (2019). Estimating biomass in temperate grassland with high resolution canopy surface models from UAV-based RGB images and vegetation indices. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(3).
- Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitiyiming, M., Hartling, S., Peterson, K., . . . Fritsch, F. (2019). Vegetation Index Weighted Canopy Volume Model for soybean biomass estimation from Unmanned Aerial System-based RGB imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 151, 27-41.
- Mao, P., Qin, L., Hao, M., Zhao, W., Luo, J., Qiu, X., . . . Qui, G. Y. (2021). An improved approach to estimate above-ground volume and biomass of desert shrub communities based on UAV RGB images. *Ecological Indicators*, 125.
- Moeckel, T., Dayananda, S., Nidamanuri, R. R., Nautiyal, S., Hanumaiah, N., Buerkert, A., & Wachendorf, M. (2018). Estimation of Vegetable Crop Parameter by Multi-temporal UAV-Borne Images. *Remote Sensing*, 10(5), 805.
- NATO. (2009). UAS Classification Guide. JCGUAV meeting, 61-214. http://dcabr.org.br/download/eventos/eventos-realizados/2010/seminario-vant-27-10-2010/cd-uvs-yearbook/pdf/P061-062_NATO_Dave-Ehredt.pdf
- Nicas, J. (2014). Why Some Drone Makers Hate the Word ‘Drone’ and Want to Change It. *The Wall Street Journal*. *The Wall Street Journal*: <https://www.wsj.com/articles/why-some-drone-makers-hate-the-word-drone-and-want-to-change-it-1412821801> (18.05.2022)
- Ouyang, J., Bei, R. D., Fuentes, S., & Collins, C. (2020). UAV and ground-based imagery analysis detects canopy structure changes after canopy management. *Oeno One*, 54(4), 1093-1103.
- Pádua, L., Marques, P., Hruška, J., Adão, T., Peres, E., Morais, R., & Sousa, J. (2018). Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery. *Remote Sensing*, 10.
- Pix4D. (2022). Pix4DMapper. pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/ (06.03.2023)
- QGIS. (2013). QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS. <https://qgis.org/tr/site/about/index.html> (07.03.2023)
- Qiao, L., Gao, D., Zhao, R., Tang, W., An, L., Li, M., & Sun, H. (2022). Improving estimation of LAI dynamic by fusion of morphological and vegetation indices based on UAV imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192.
- Reid, A., Chapman, W., Prescott, C. E., & Nijland, W. (2016). Using excess greenness and green chromatic coordinate colour indices from aerial images to assess lodgepole pine vigour, mortality and disease occurrence. *Forest Ecology and*

- Management, 374, 146-153.
- Rueda-Ayala, V. P., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea-Guevara, J. M., & Andújar, D. (2019). Comparing UAV-Based Technologies and RGB-D Reconstruction Methods for Plant Height and Biomass Monitoring on Grass Ley. *Sensors*, 19(3).
- Sangjan, W., McGee, R., & Sankaran, S. (2022). Optimization of UAV-Based Imaging and Image Processing Orthomosaic and Point Cloud Approaches for Estimating Biomass in a Forage Crop. *Remote Sensing*, 14(10).
- Sefercik, U. G., Tanrikulu, F., & Atalay, C. (2020). SfM Tabanlı Yeni Nesil Görüntü Eşleştirme Yazılımlarının Fotogrametrik 3B Modelleme. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 2(2), 39-45.
- Seren, A., & Demirel, H. (2016). Açık alanda bulunan büyük objelerin 3 boyutlu modellenmesi Güncel Geomatik Mühendisliği Yöntemlerinin Karşılaştırılması. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.
- SHGM. (2016). İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı (SHT-İHA). Ankara: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü. https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2019/IHA_talimati_revizyon3.pdf (20.02.2022)
- Singhal, G., Bansod, B., & Mathew, L. (2018). Unmanned Aerial Vehicle classification, Applications and challenges: A Review. Preprints, version 1.
- Sinha, R., Quirós, J., Sankaran, S., & Khot, L. (2022). High resolution aerial photogrammetry based 3D mapping of fruit crop canopies for precision inputs management. *Information Processing in Agriculture*, 9(1), 11-23.
- Snavely, K. N. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Yayınlanmamış Doktora Tezi, University of Washington, USA.
- Starý, K., Jelínek, Z., Kumhálová, J., Chyba, J., & Bálázova, K. (2020). Comparing RGB - based vegetation indices from UAV imageries to estimate hops canopy area. *Agronomy Research*, 18(4), 2592-2601.
- Stateras, D., & Kalivas, D. (2020). Assessment of Olive Tree Canopy Characteristics and Yield Forecast Model Using High Resolution UAV Imagery. *Agriculture*, 10.
- Şen, M. (2018). Afet Yönetimi için İHA Görüntülerinin Kullanımı ve Karapınar Obruqları Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Thorne, M., Skinner, Q., Smith, M., Rodgers, D., Laycock, W., & Cerekci, S. (2002). Evaluation of a technique for measuring canopy volume of shrubs. *Journal of Range Management*, 55(3), 235-241.
- Torun, A. (2017). İnsansız Hava Aracı Sektöründe Trend: İHA Fotogrametrisi Bakışıyla. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17, 35-52.
- Wan, L., Cen, H., Zhu, J., Li, Y., Zhu, Y., Sun, D., . . . He, Y. (2019). Combining UAV-based vegetation indices, canopy height and canopy coverage to improve rice yield prediction under different nitrogen levels. Boston, Massachusetts: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., Mortensen, D. A. (1995). Color

- Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. St. Joseph, Michigan. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 38(1), 259-269.
- Xiang, H., & Tian, L. (2011). Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering*, 108(2), 174-190.
- Yeom, J., Jung, J., Chang, A., Ashapure, A., Maeda, M., Maeda, A., & Landivar, J. (2019). Comparison of Vegetation Indices Derived from UAV Data for Differentiation of Tillage Effects in Agriculture. *Remote Sensing*, 11(13), 1548.
- Zeng, L., Peng, G., Meng, R., Man, J., Li, W., Xu, B., . . . Sun, R. (2021). Wheat Yield Prediction Based on Unmanned Aerial Vehicles-Collected Red-Green-Blue Imagery. *Remote Sensing*, 13(15).
- Zhang, C., & Kovacs, J. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712.



EKLER

Ek 1: Agisoft Metashape Sonuç Raporu (Agisoft yüksek için)

**Agisoft Metashape
Processing Report
30 January 2023**



Survey Data

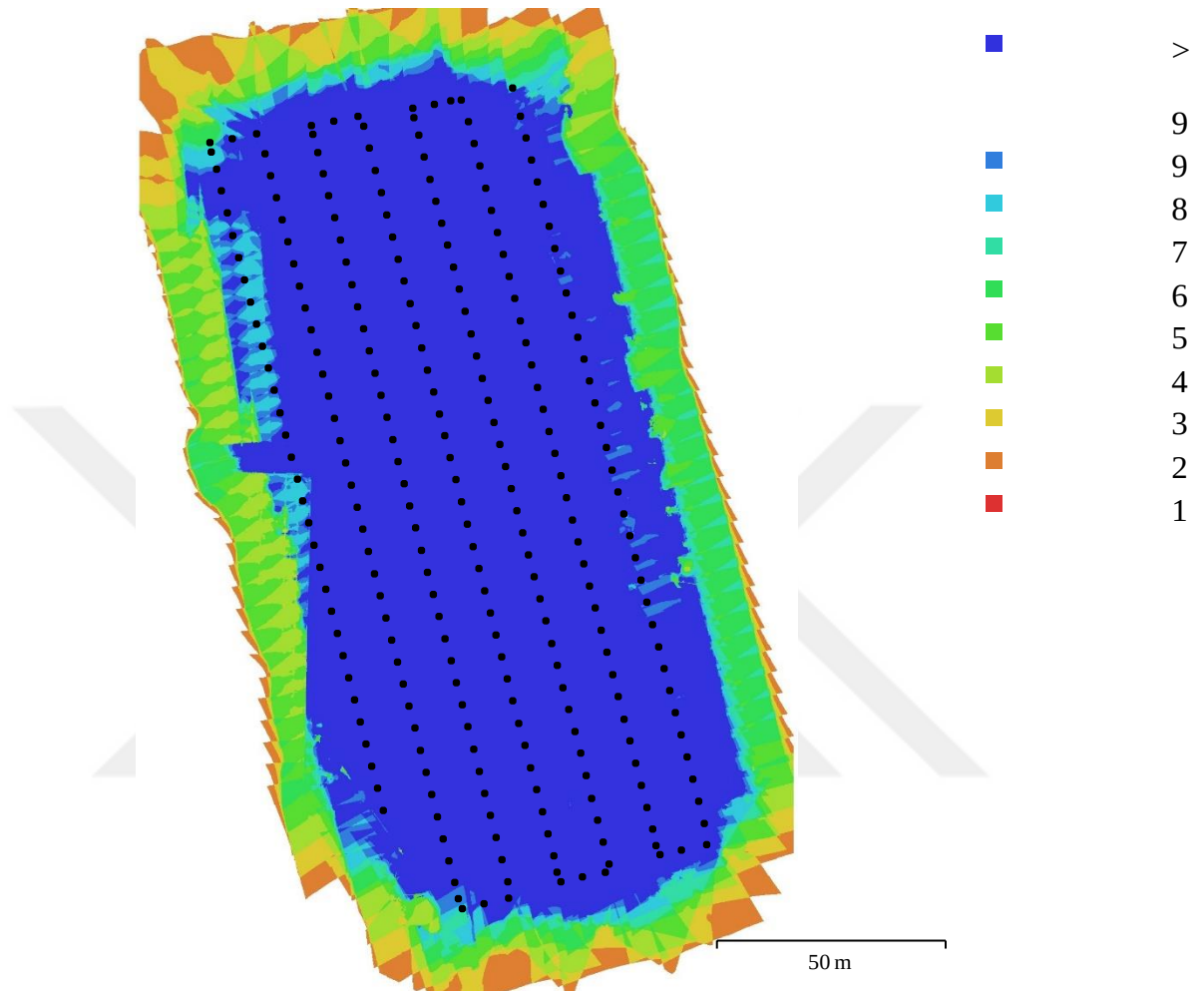


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	258	Camera stations:	258
Flying altitude:	25.6 m	Tie points:	212,591
Ground resolution:	6.73 mm/pix	Projections:	928,907
Coverage area:	0.0227 km ²	Reprojection error:	0.67 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μ m	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

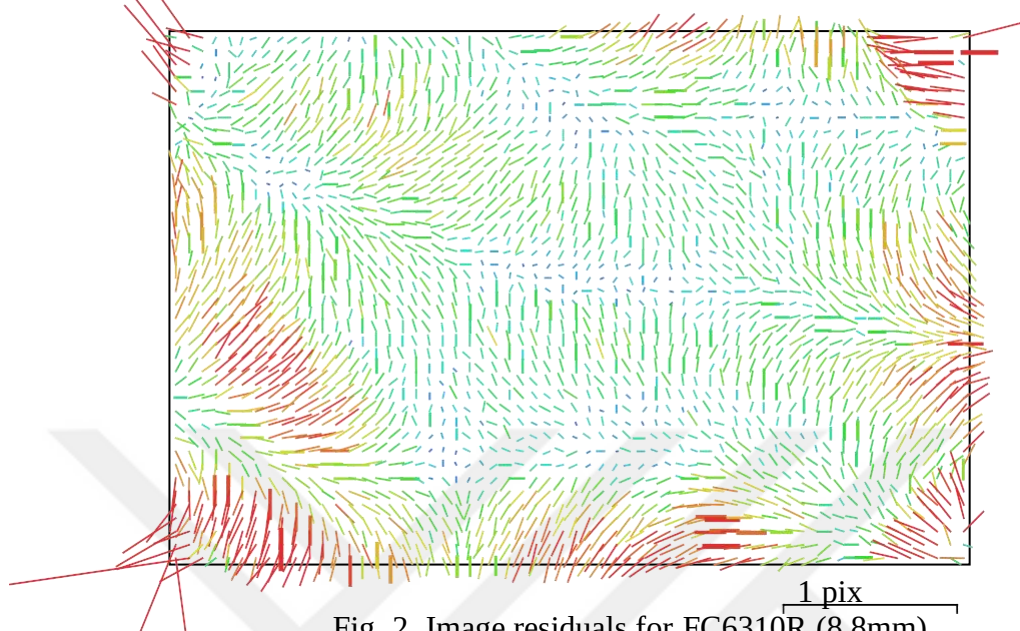


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

258 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K ₁	K2	K3	K4	P1	P2
F	3612.54	0.93	1.00	0.66	0.46	-0.03	-0.06	-0.99	0.90	-0.73	0.59	-0.75	-0.50
Cx	37.688	0.028		1.00	0.31	-0.03	-0.11	-0.65	0.59	-0.47	0.38	-0.81	-0.33
Cy	-15.5413	0.018			1.00	0.03	-0.05	-0.46	0.42	-0.34	0.27	-0.36	-0.73
B1	-0.547614	0.0063				1.00	0.03	0.03	-0.04	0.04	-0.04	0.05	-0.01
B2	-0.0125415	0.0061					1.00	0.06	-0.06	0.05	-0.04	0.06	0.03
K₁	-0.27521	0.00014						1.00	-0.95	0.81	-0.68	0.74	0.50
K₂	0.133082	0.00015							1.00	-0.95	0.86	-0.67	-0.45
K₃	-0.057884	0.00012								1.00	-0.98	0.54	0.36
K₄	0.0127748	4.4e-05									1.00	-0.43	-0.29
P1	-0.00038804	1.2e-06										1.00	0.39
P2	7.65101e-05	8.2e-07											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

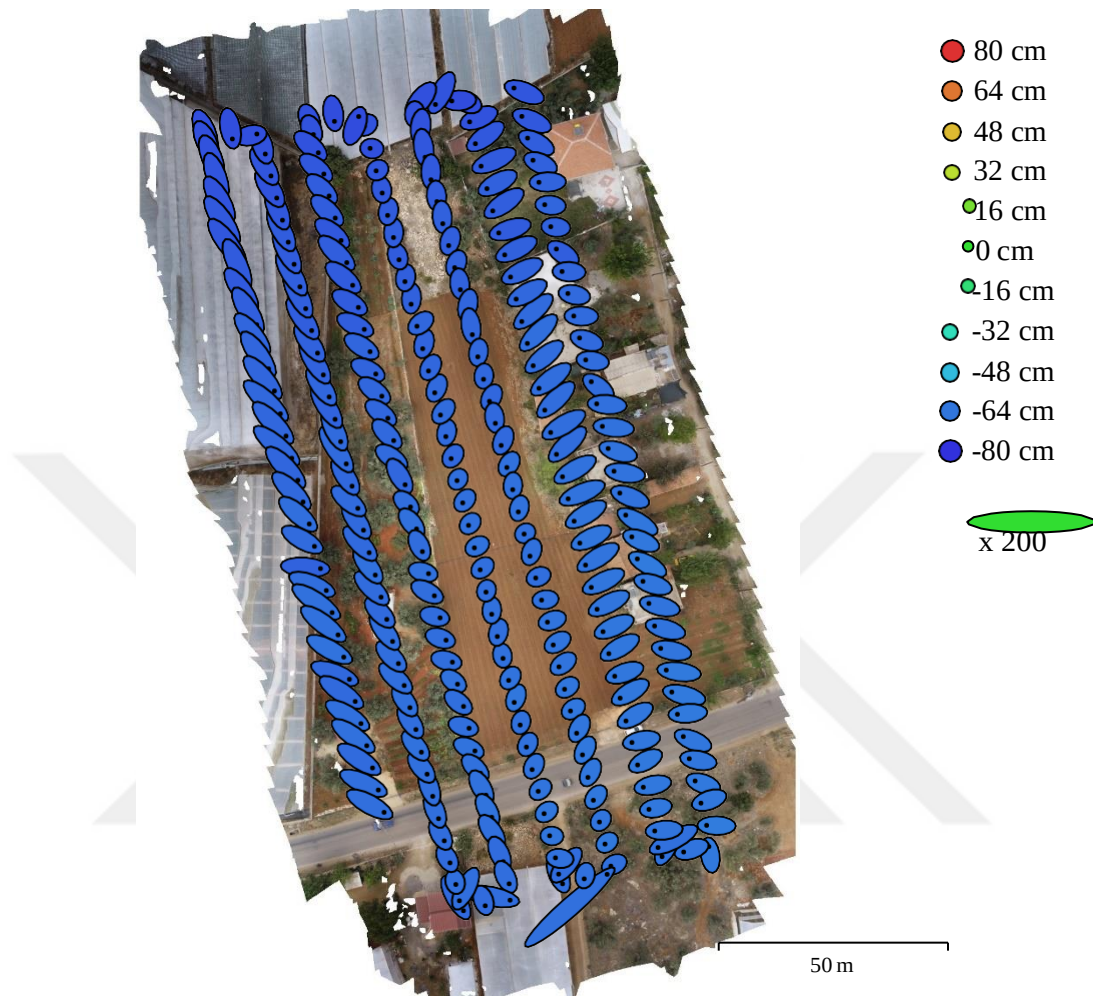


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X, Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
1.79367	1.60126	67.0529	2.40443	67.096

Table 3. Average camera location error.

Ground Control Points

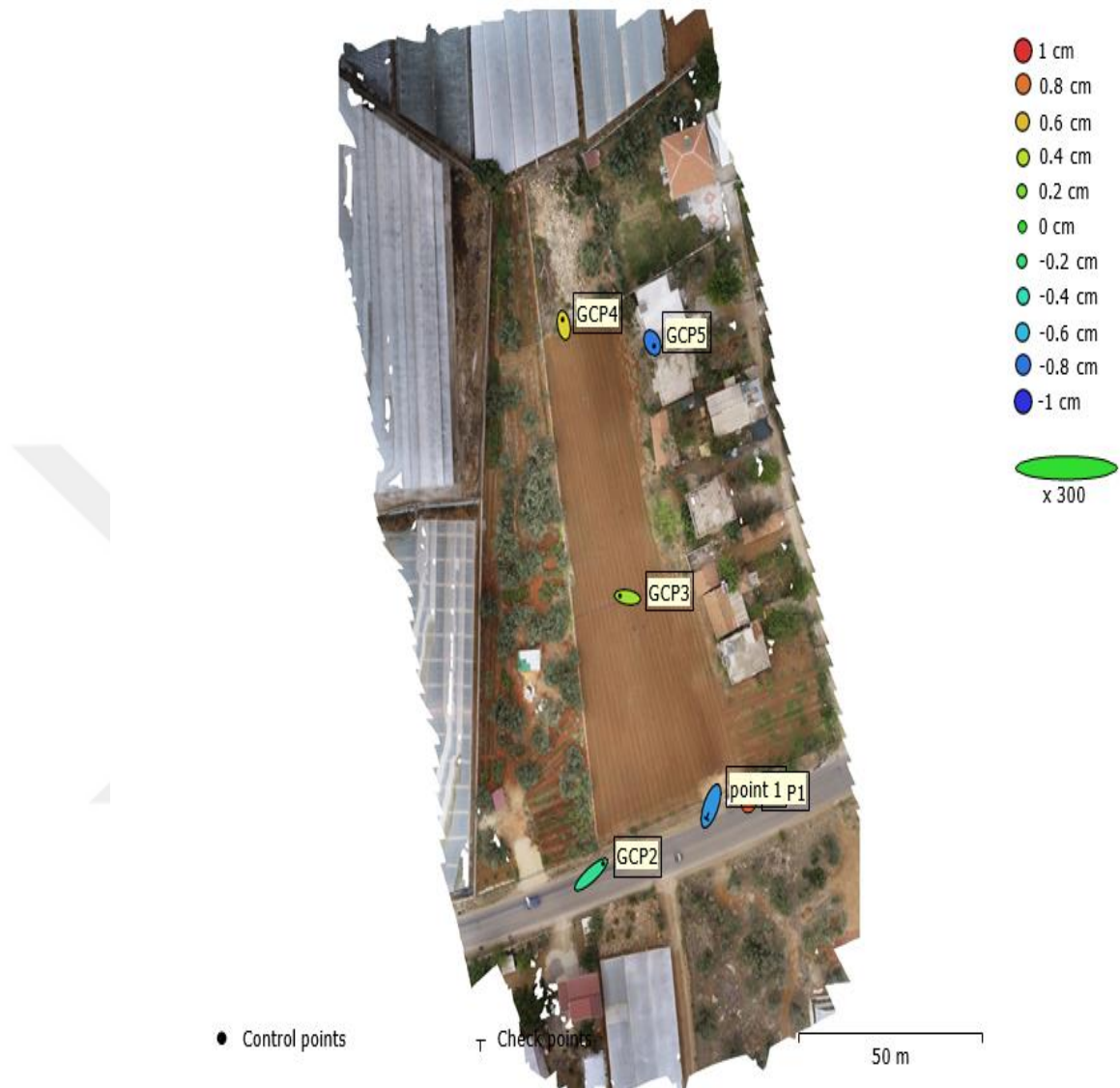


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X, Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	1.16742	0.765089	0.601742	1.39579	1.51997

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	0.823187	1.67142	0.706069	1.86314	1.99244

Table 5. Check points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
YKN1	-0.142368	-0.306418	0.850986	0.915608	0.206 (17)
YKN2	2.19337	1.43552	-0.279003	2.63618	0.275 (21)
YKN3	-1.35477	0.181844	0.318635	1.40357	0.375 (22)
YKN4	-0.217009	0.745298	0.538259	0.944608	0.353 (24)
YKN5	0.317277	-0.428561	-0.785619	0.949487	0.315 (17)
Total	1.16742	0.765089	0.601742	1.51997	0.316

Table 6. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P.1	-0.823187	-1.67142	-0.706069	1.99244	0.291 (23)
Total	0.823187	1.67142	0.706069	1.99244	0.291

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

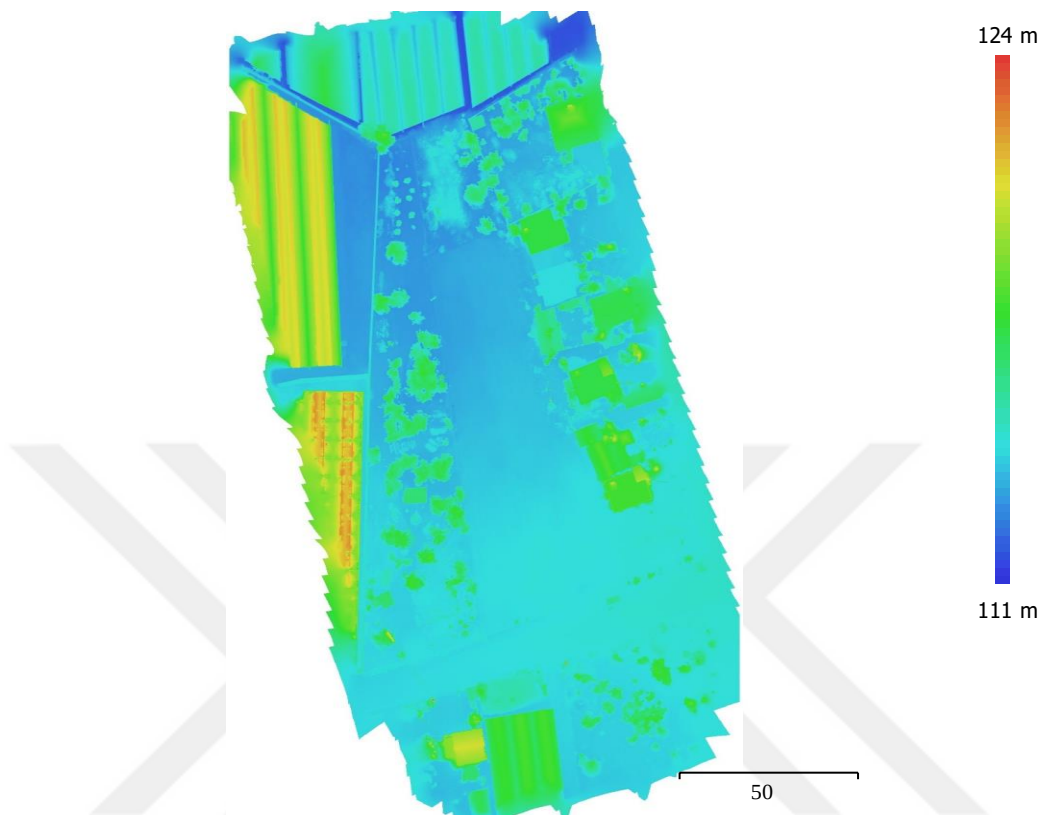


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 1.35 cm/pix
Point density: 0.551 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	258
Aligned cameras	258
Markers	6
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	212,591 of 239,644
RMS reprojection error	0.156646 (0.670173 pix)

Max reprojection error	1.9288 (35.9395 pix)
Mean key point size	3.39745 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.59751
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	30 minutes 39 seconds
Matching memory usage	1.84 GB
Alignment time	10 minutes 16 seconds
Alignment memory usage	157.68 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	33 seconds
Date created	2023:01:24 07:47:48
Software version	2.0.0.15597
File size	22.40 MB
Depth Maps	
Count	258
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	3 days 20 hours
File size	1.68 GB
Point Cloud	
Points	139,025,114
Point attributes	
Position	3.37 mm
Color	3 bands, uint8
Normal	
Point classes	
Created (never classified)	139,025,114
Depth maps generation parameters	

Quality	High
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	3 days 20 hours
Point cloud generation parameters	
Processing time	2h 46m
Date created	2023.01.28
Software version	2.0.0.15597
File size	1.78 GB
DEM	
Size	10,613 x 15,985
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Reconstruction parameters	
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	5 minutes 52 seconds
Memory usage	347.56 MB
Date created	2023:01:29 06:10:10
Software version	2.0.0.15597
File size	463.29 MB
Orthomosaic	
Size	21,226 x 31,970
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	37 minutes 50 seconds
Memory usage	1.88 GB
Date created	2023:01:29 07:34:44
Software version	2.0.0.15597
File size	6.98 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2 0.0 build 15597
OS	Windows 64 bit
RAM	11.78 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4500U
CPU @ 1.80GHz	
GPU(s)	None

Ek 2: Agisoft Metashape Sonuç Raporu (Agisoft orta için)

**Agisoft Metashape
Processing Report
23 January 2023**



Survey Data

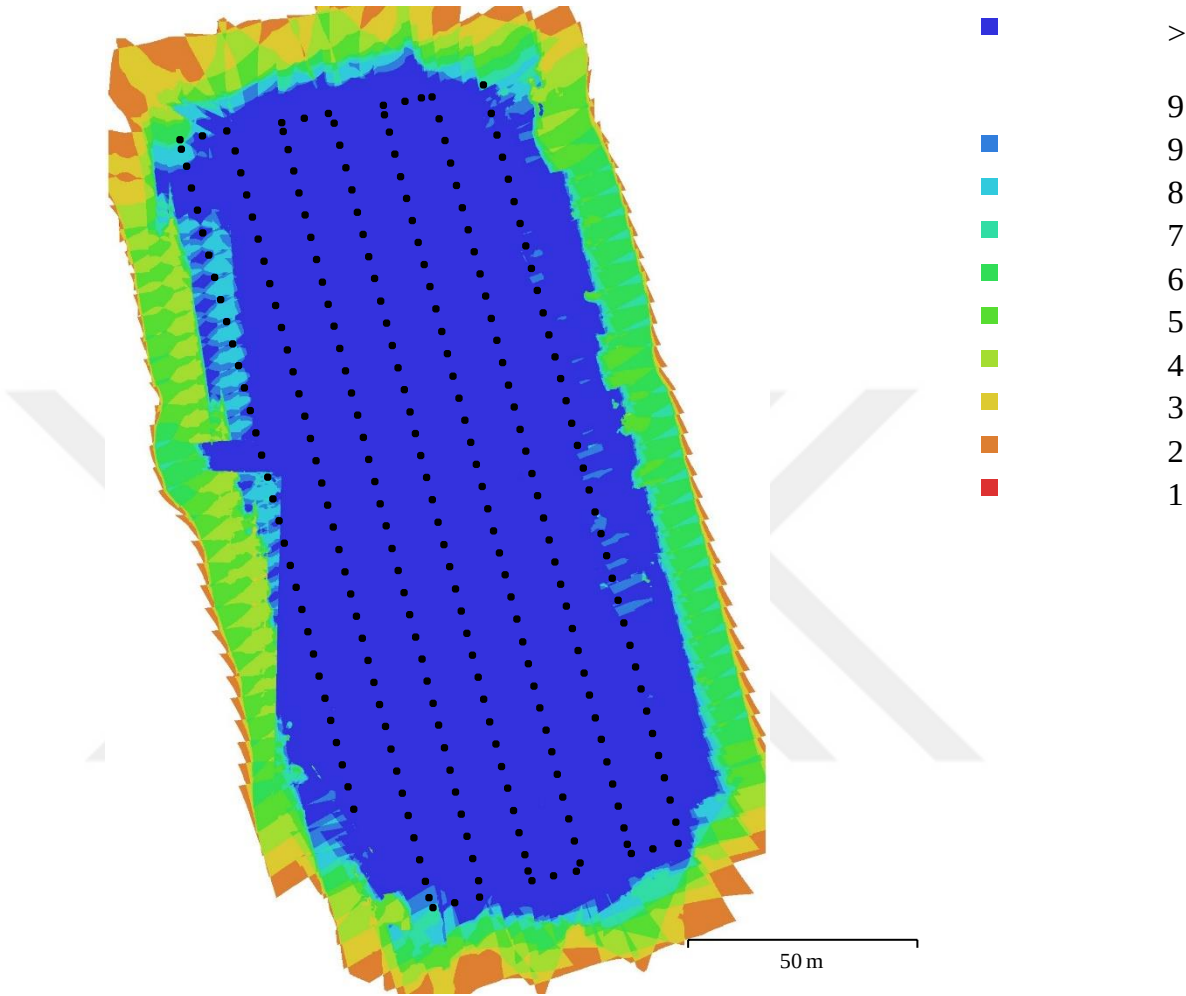


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	258	Camera stations:	258
Flying altitude:	25.6 m	Tie points:	197,284
Ground resolution:	6.7 mm/pix	Projections:	887,426
Coverage area:	0.0227 km ²	Reprojection error:	1.38 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

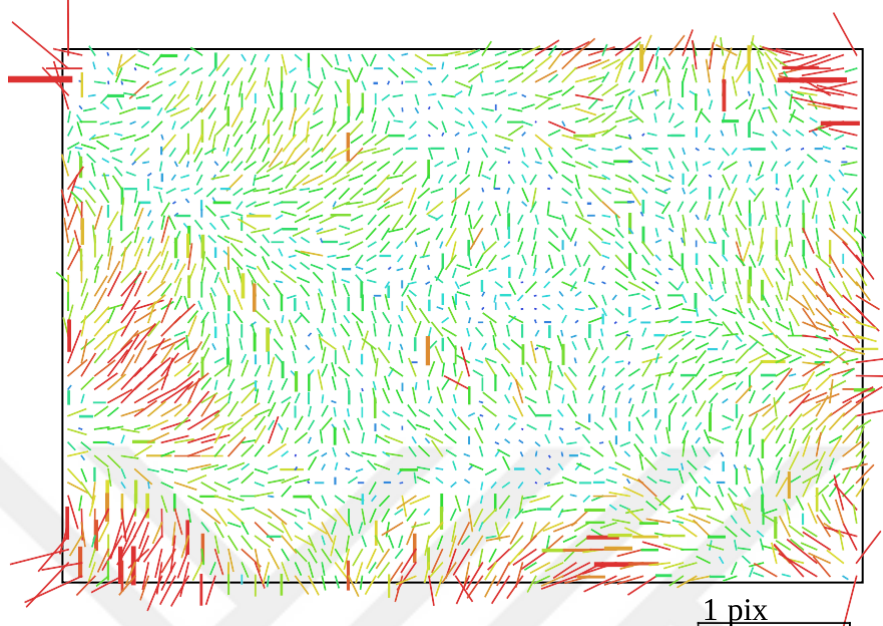


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

258 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	3627.27	1.6	1.00	0.61	0.41	-0.02	-0.08	-0.99	0.90	-0.73	0.60	-0.71	-0.46
Cx	37.8348	0.052		1.00	0.26	-0.02	-0.12	-0.61	0.55	-0.44	0.35	-0.78	-0.29
Cy	-15.2832	0.035			1.00	0.04	-0.04	-0.41	0.37	-0.30	0.24	-0.31	-0.72
B1	-0.589172	0.013				1.00	0.02	0.03	-0.03	0.04	-0.04	0.04	-0.02
B2	0.0204995	0.012					1.00	0.08	-0.08	0.06	-0.05	0.07	0.05
K1	-0.277596	0.00025						1.00	-0.95	0.81	-0.69	0.70	0.45
K2	0.135176	0.00027							1.00	-0.95	0.88	-0.63	-0.41
K3	-0.058896	0.00022								1.00	-0.98	0.50	0.33
K4	0.0129752	7.9e-05									1.00	-0.40	-0.28
P1	-0.0003970	2.3e-06										1.00	0.35
P2	5.5607e-05	1.6e-06											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

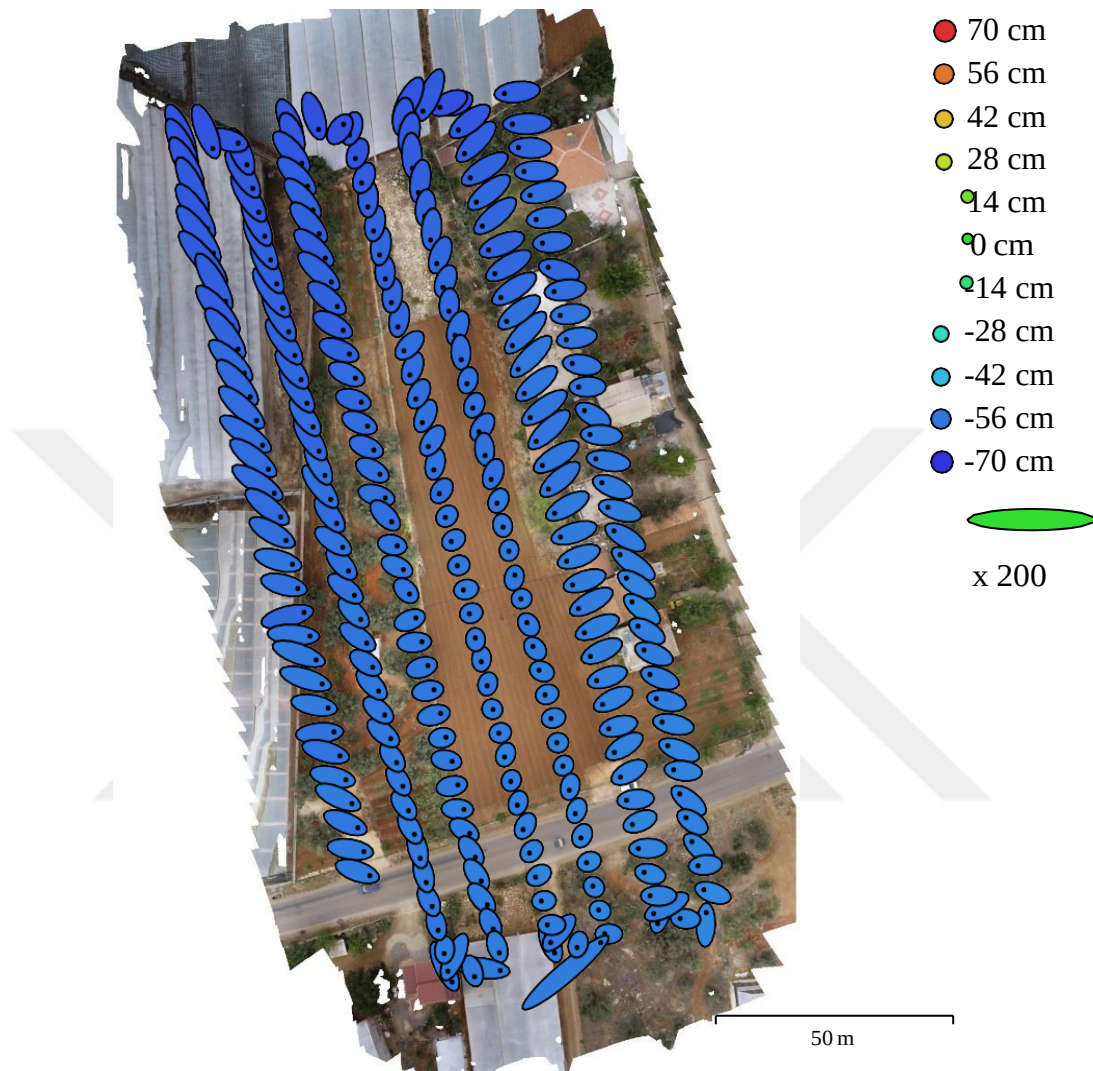


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X, Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
1.91641	1.63736	56.995	2.52063	57.0507

Table 3. Average camera location error.

Ground Control Points

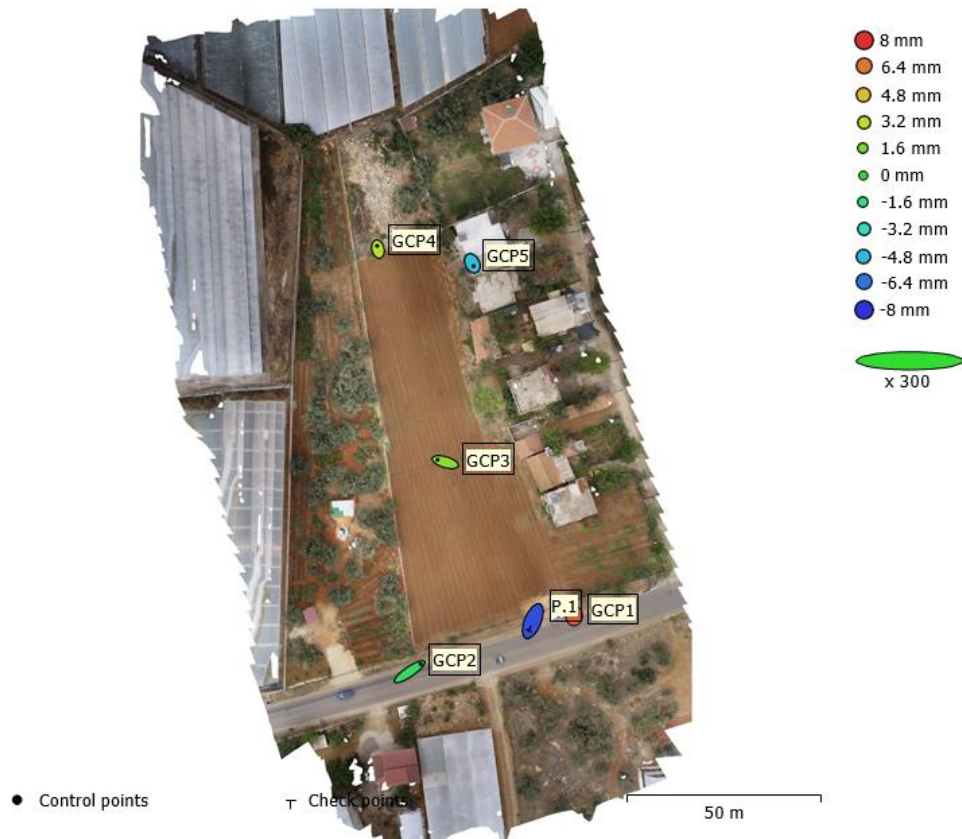


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X, Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	1.0399	0.706491	0.4159	1.25719	1.3242

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	0.7041	1.62125	0.732294	1.76754	1.91323

Table 5. Check points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
YKN1	-0.00518987	-0.265754	0.700654	0.749379	0.286 (17)
YKN2	1.8986	1.30256	-0.0942296	2.30439	0.193 (21)
YKN3	-1.31545	0.410314	0.210191	1.39389	0.399 (21)
YKN4	-0.131699	0.590048	0.312582	0.680594	0.300 (24)
YKN5	0.233432	-0.460267	-0.472421	0.699655	0.269 (17)
Total	1.0399	0.706491	0.4159	1.3242	0.298

Table 6. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P.1	-0.7041	-1.62125	-0.732294	1.91323	0.406 (21)
Total	0.7041	1.62125	0.732294	1.91323	0.406

Table 7. Check points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

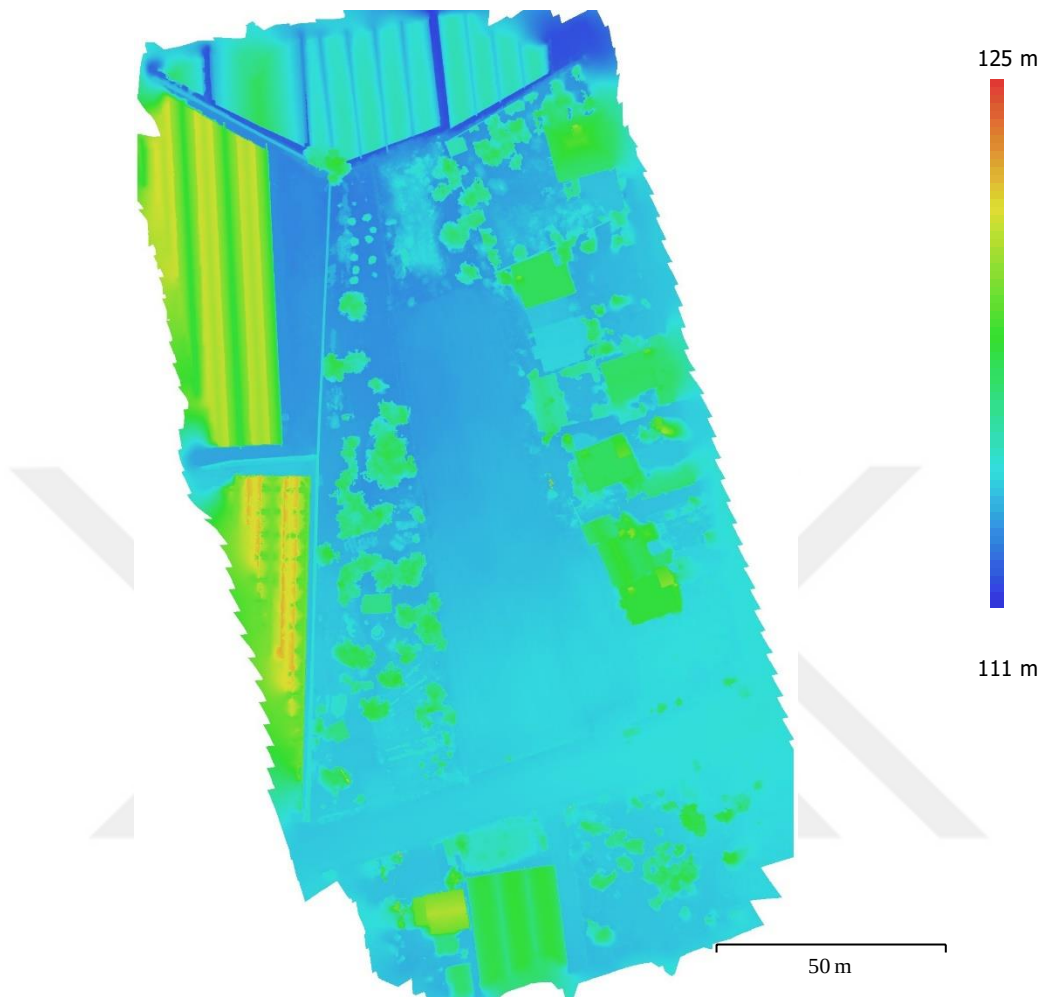


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.68 cm/pix
Point density: 0.139 points/cm²

Processing Parameters

General

Cameras	258
Aligned cameras	258
Markers	6
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	197,284 of 224,792
RMS reprojection error	0.148628 (1.38452 pix)

Max reprojection error	0.809838 (50.9072 pix)
Mean key point size	7.63944 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	4.84944
Alignment parameters	
Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	18 minutes 6 seconds
Matching memory usage	1.03 GB
Alignment time	8 minutes 20 seconds
Alignment memory usage	156.90 MB
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	17 seconds
Date created	2023:01:20 10:35:09
Software version	2.0.0.15597
File size	21.83 MB
Depth Maps	
Count	258
Depth maps generation parameters	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	23 hours 22 minutes
File size	459.78 MB
Point Cloud	
Points	36,422,013
Point attributes	
Position	6.7 mm
Color	3 bands, uint8
Normal	
Point classes	
Created (never classified)	36,422,013
Depth maps generation parameters	

Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Max neighbors	16
Processing time	23 hours 22 minutes
Point cloud generation parameters	
Processing time	35 minutes 39 seconds
Date created	2023:01:21 11:49:35
Software version	2.0.0.15597
File size	476.77 MB
DEM	
Size	5,338 x 8,033
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Reconstruction parameters	
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	1 minutes 43 seconds
Memory usage	297.59 MB
Date created	2023:01:22 19:35:36
Software version	2.0.0.15597
File size	121.66 MB
Orthomosaic	
Size	21,352 x 32,132
Coordinate system	TUREF / TM30 (EPSG:5254)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	35 minutes 32 seconds
Memory usage	1.82 GB
Date created	2023:01:22 21:23:04
Software version	2.0.0.15597
File size	7.05 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2 0.0 build 15597
OS	Windows 64 bit
RAM	11.78 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4500U
CPU @ 1.80GHz	
GPU(s)	None

Ek 3: Pix4DMapper için Sonuç Raporu (Pix4D yüksek için)

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the

Quality Report Additional

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	tez çalışması_high
Processed	2022-12-26 23:00:28
Camera Model Name(s)	FC6310R_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	0.75 cm / 0.29 in
Area Covered	0.022 km ² / 2.1565 ha / 0.01 sq. mi. / 5.3317 acres

Quality Check



	Images	median of 52485 keypoints per image	
	Dataset	258 out of 258 images calibrated (100%), all images enabled	
	Camera Optimization	0.88% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
	Matching	median of 16470.9 matches per calibrated image	
	Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.008 m	

🔍 Preview

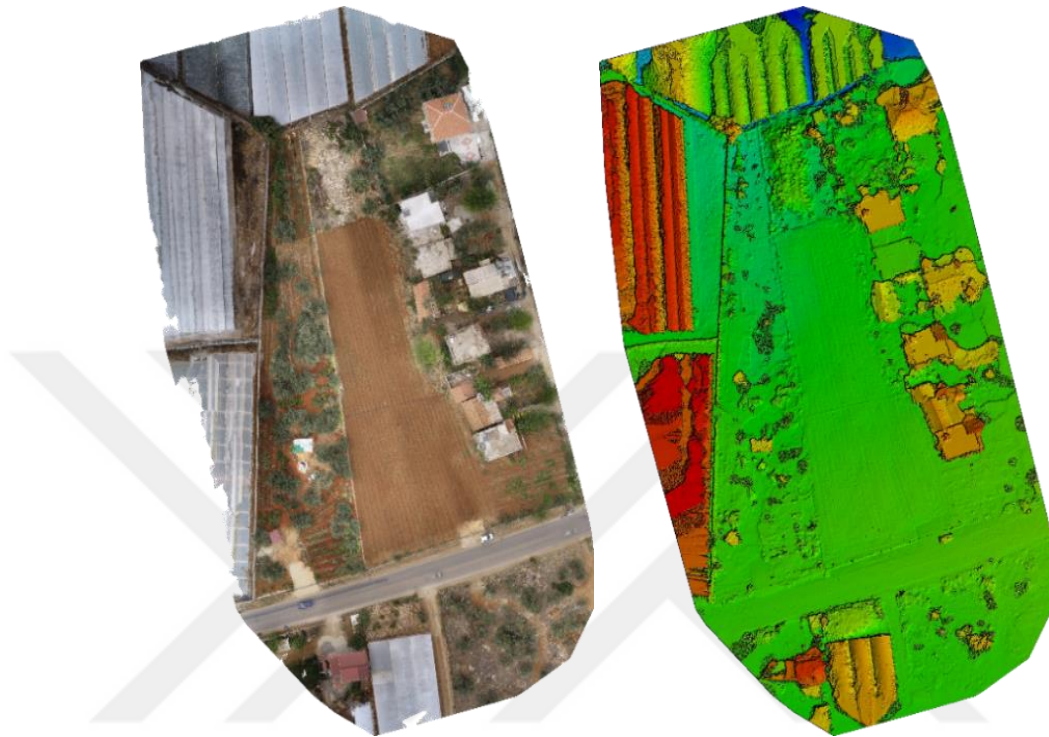


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification

Calibration Details

Number of Calibrated Images	258 out of 258
Number of Geolocated Images	258 out of 258

Initial Image Positions

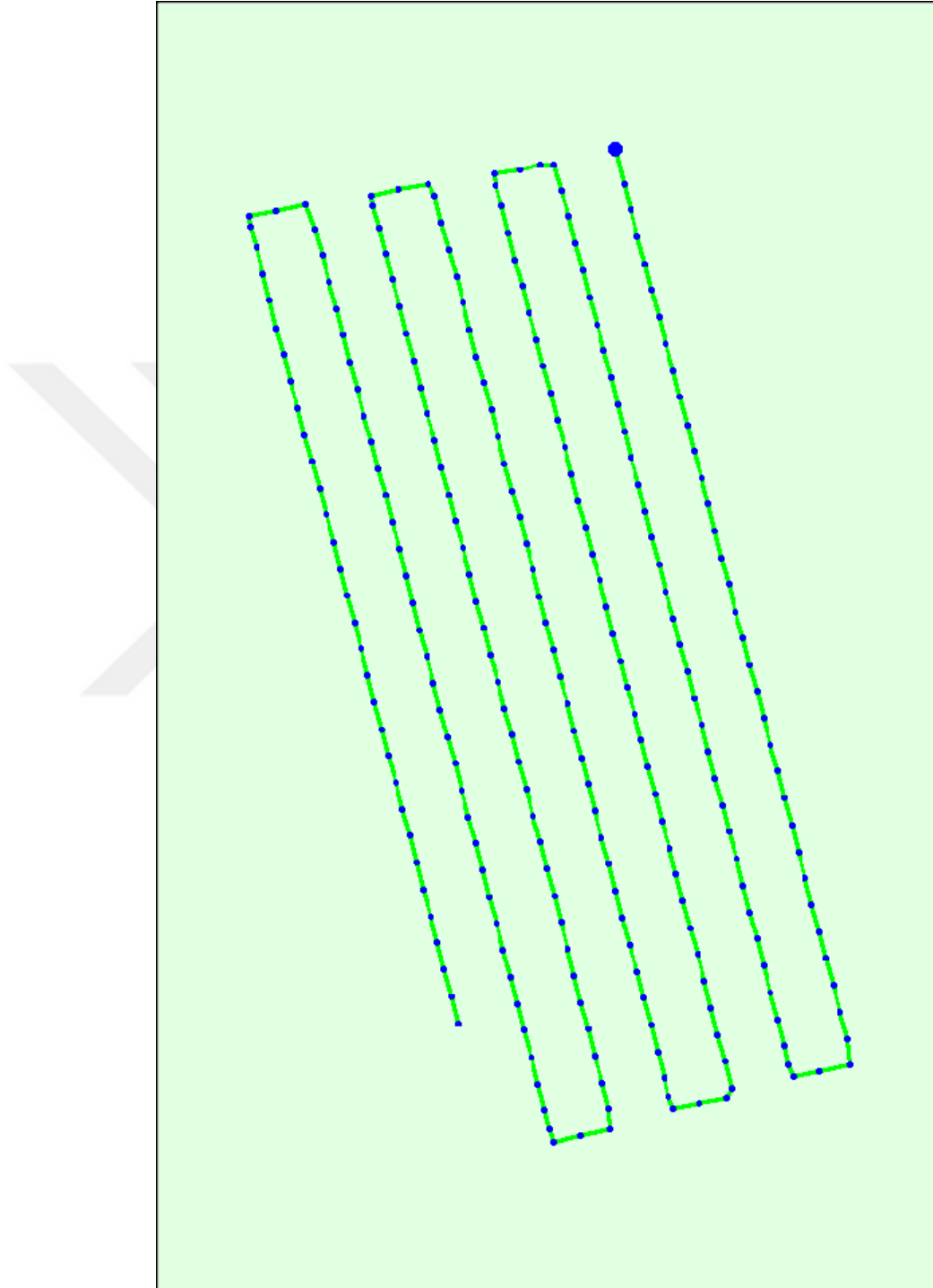
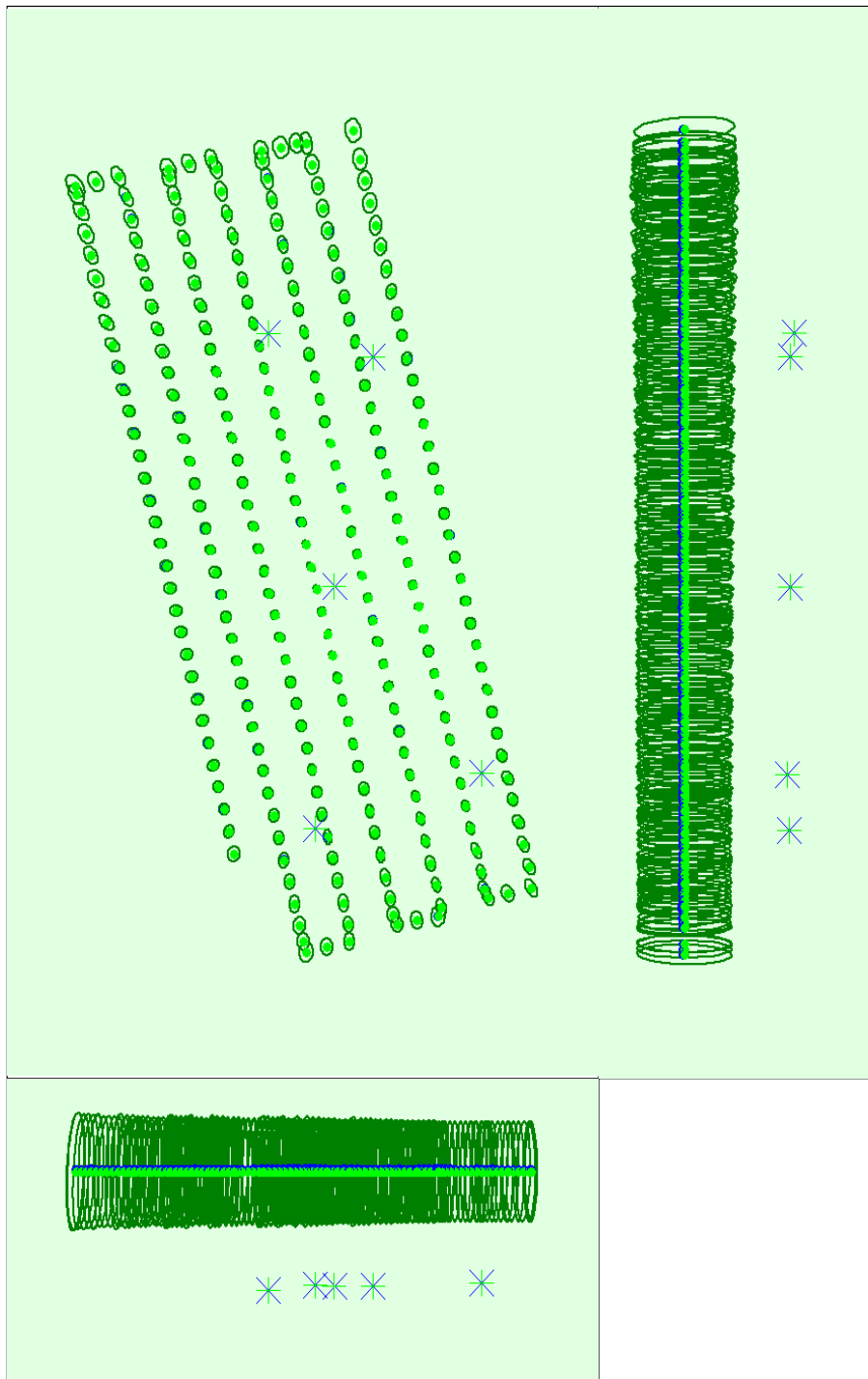


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 500xmagnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.



Absolute camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.003	0.023	0.006	0.005	0.002
Sigma	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000



Overlap

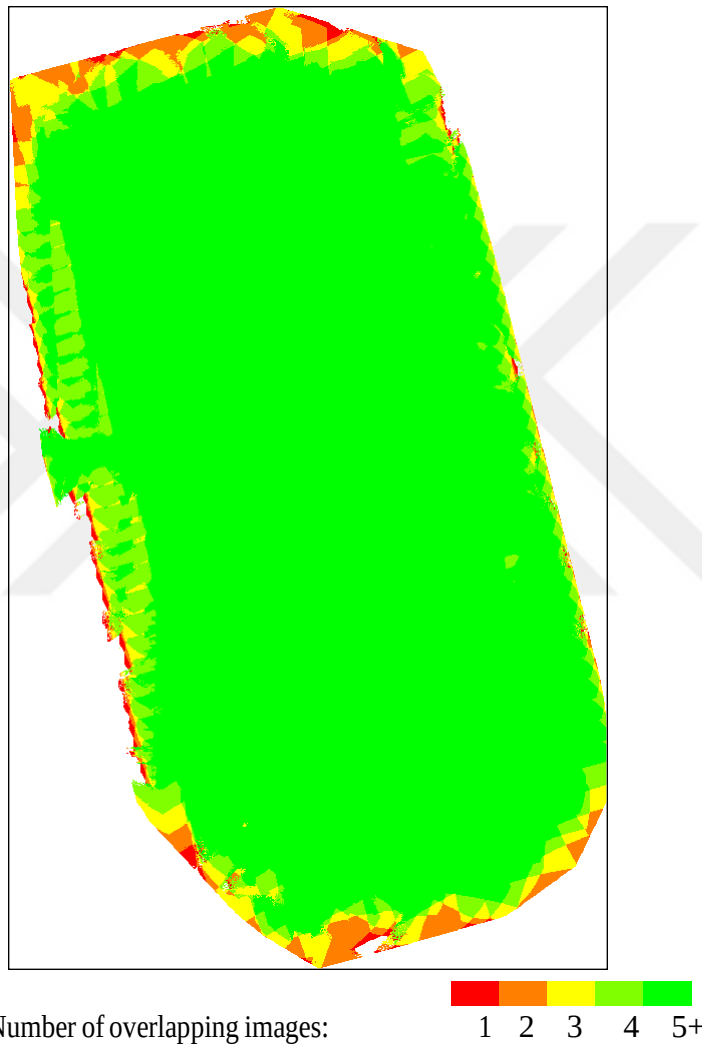


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	4260100
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1471946
Mean Reprojection Error [pixels]	0.155

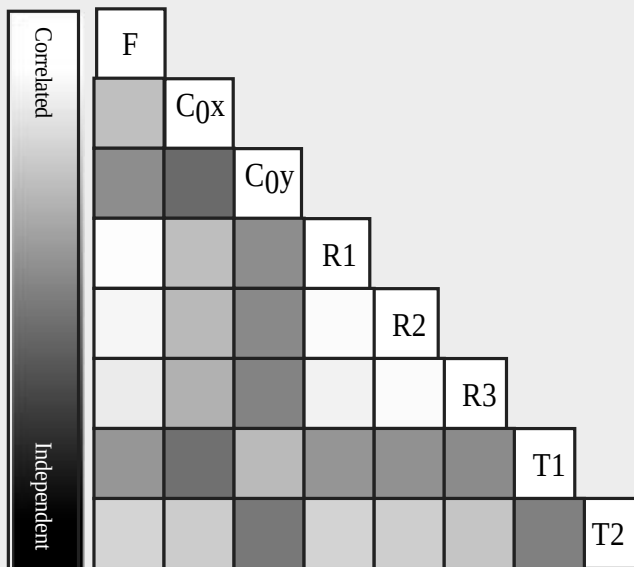
Internal Camera Parameters



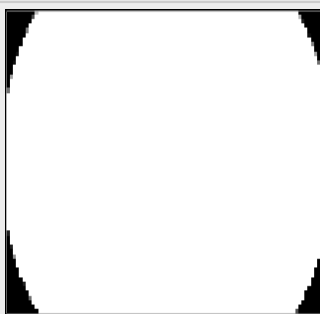
FC6310R_8.8_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.833 [mm] x 8.556 [mm]

EXIF ID: FC6310R_8.8_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3658.300 [pixel] 8.580 [mm]	2722.500 [pixel] 6.385 [mm]	1835.100 [pixel] 4.304 [mm]	-0.269	0.112	-0.033	0.000	-0.001
Optimized Values	3625.756 [pixel] 8.503 [mm]	2773.326 [pixel] 6.504 [mm]	1808.175 [pixel] 4.241 [mm]	-0.274	0.119	-0.034	0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	3.256 [pixel] 0.008 [mm]	0.096 [pixel] 0.000 [mm]	0.061 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, i.e. Any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.



2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	52485	16471
Min	45311	4821
Max	77374	25537
Mean	53617	16512



3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	959048
In 3 Images	245368
In 4 Images	104333
In 5 Images	55370
In 6 Images	32944
In 7 Images	21370
In 8 Images	14644
In 9 Images	10872
In 10 Images	7887
In 11 Images	5481
In 12 Images	3974
In 13 Images	2995
In 14 Images	2180
In 15 Images	1680
In 16 Images	1227
In 17 Images	844
In 18 Images	597
In 19 Images	382
In 20 Images	288
In 21 Images	209
In 22 Images	120
In 23 Images	80
In 24 Images	20
In 25 Images	9
In 26 Images	13
In 27 Images	6
In 28 Images	4
In 30 Images	1



2D Keypoint Matches

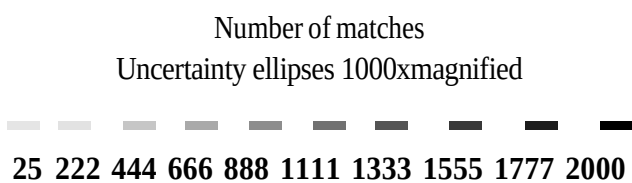
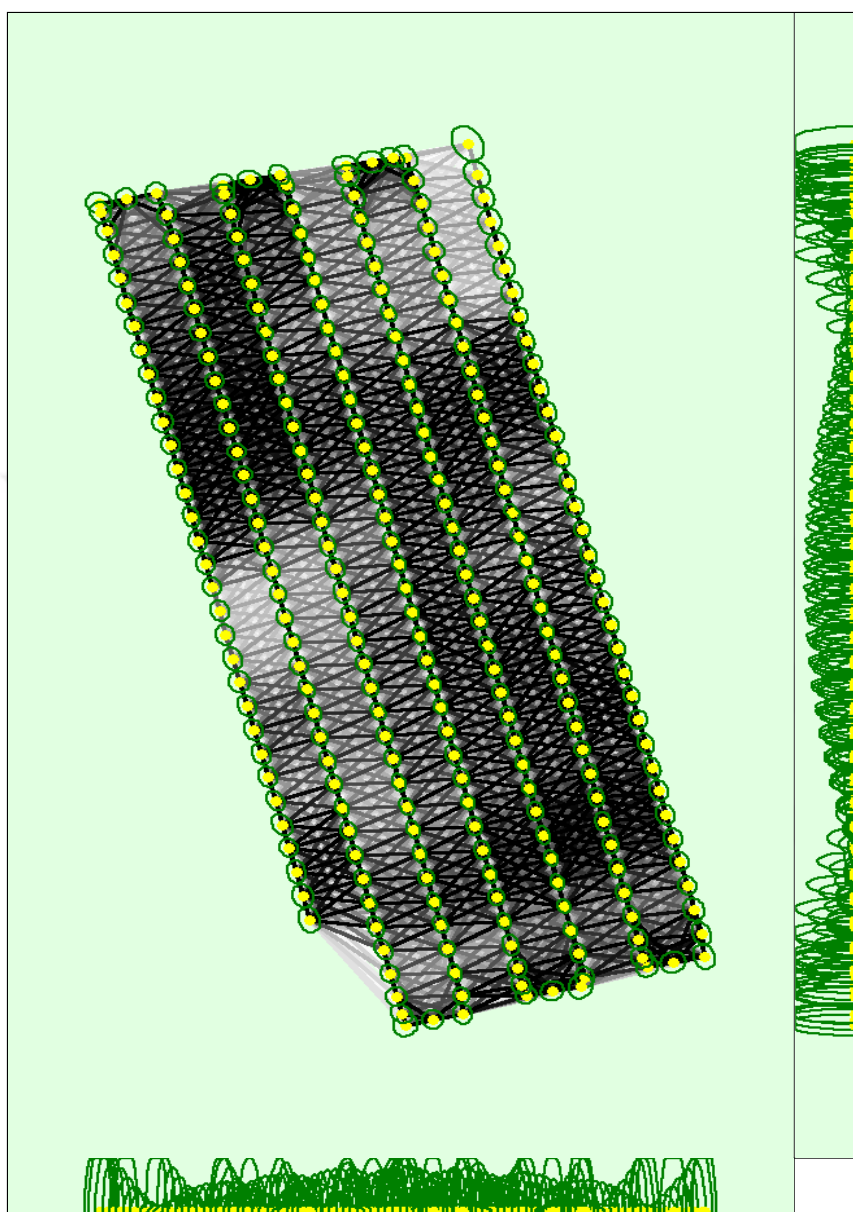


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.