T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

SERT X-IŞINLARINDA BELİRLENEN GALAKSİ KÜMELERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

Hatice Bahar ATALI

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ

Şubat, 2026

İSTANBUL

Bu çalışma 10.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı Astronomi ve Uzay Bilimleri Programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Yüksel KARATAŞ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Murat HÜDAVERDİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi

Prof. Dr. Tolga GÜVER
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kürşad YILDIZ
Erciyes Üniversitesi
Fen Fakültesi

- **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Proje Destekleri**

Hatice Bahar Atalı, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

- **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

Atalı, H. B. ve Aliş S., 2026, Building Clean Galaxy Samples From SDSS: An Assessment of Galaxy Selection, Turkish Journal of Astronomy & Astrophysics, Basım Aşamasında

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın planlanmasından tamamlanmasına kadar geçen süreçte, bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve yapıcı eleştirileriyle bana rehberlik eden, akademik bakış açısı ve titiz yaklaşımı sayesinde çalışmanın bilimsel niteliğinin güçlenmesinde belirleyici bir rolü olan ve üniversite yıllarımın en başından bu yana her daim desteğini esirgemeyen değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin analiz aşamalarında sağladığı teknik destekle sürece önemli ölçüde katkı sunan Dr. Eyüp Kaan ÜLGEN'e, tez süreci boyunca motivasyonumu korumamda önemli bir rol oynayan, görüş ve desteğini her zaman hissettiren arkadaşım Dr. Süleyman FİŞEK'e ve değerli Hocam Dr. F. Korhan YELKENCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimimde TÜBİTAK-BİDEB 2211-A Yurt İçi Doktora Burs Programıyla beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Sabrı, anlayışı ve desteğiyle bu sürecin her aşamasında yanımda olan sevgili eşim Koray ATALI'ya, motivasyonumun temel kaynağı olan canım oğlum Ata Kartal ATALI'ya ve akademik yolculuğum boyunca her daim yanımda olan aileme sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım. Onların manevi katkısı bu çalışmanın tamamlanmasında belirleyici olmuş; bu tez, yalnızca bireysel bir akademik emeğin değil, aynı zamanda paylaşılan sabrın ve özverinin bir yansıması haline gelmiştir.

Şubat, 2026 Hatice Bahar ATALI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1. GALAKSİ KÜMELERİ 4
2.1.1. Galaksi Kümelerinde Karakteristik Ölçekler: M_{200} ve R_{200} 8
2.1.2. Optik Dalga Boylarında Galaksi Kümeleri 10
2.1.2.1. Morfoloji-Yoğunluk İlişkisi 12
2.1.3. Sert X-Işınlarında Galaksi Kümeleri 16
2.2. GALAKSİ TÜRLERİ VE POPÜLASYONLARI 20
2.2.1. Erken Tip Galaksiler 22
2.2.1.1. Eliptik Galaksiler 22
2.2.1.2. Merceksi Galaksiler 23
2.2.2. Geç Tip Galaksiler 24
2.2.2.1. Spiral Galaksiler 24
2.2.2.2. Düzensiz Galaksiler 25
2.3. GALAKSİLERİN RENKLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI 26
3. MALZEME VE YÖNTEM **33**
3.1. SPEKTRUM-RÖNTGEN-GAMA TELESKOBU 33
3.1.1. eROSITA Dedektörü 34
3.1.2. Mikhail Pavlinsky ART-XC Dedektörü 36
3.1.2.1. ART-XC X-Işın Kataloğu 37

3.2. SLOAN DİJİTAL GÖKYÜZÜ TARAMASI 38
3.3. GALAKSİ KÜME ÖRNEKLEMLERİ 40
3.3.1. Sert X-Işınlarında Gözlenen Galaksi Kümeleri 40
3.3.2. Kontrol Örneklemi: Optik Dalga Boyunda Belirlenmiş Galaksi Kümeleri 42
3.4. SDSS VERİTABANINDAN GALAKSİLERİN SEÇİMİ 44
3.4.1. Kırmızıya Kayma Kriteri 45
3.4.2. R_{200} Yarıçaplarının Belirlenmesi 47
3.4.3. Parlaklık Limiti Kriteri 49
3.5. GAUSS KARIŞIM MODELİ (GMM) 51
4. BULGULAR 54
4.1. KÜME ÜYESİ GALAKSİLERİN BELİRLENMESİ 54
4.1.1. SDSS Temiz Fotometri Yaklaşımı 54
4.1.2. Ek Fotometrik Etiketlerin Önerilmesi 61
4.1.3. Örneklemin Ek Verilerle Ayıklanması 65
4.2. KÜME ÜYESİ GALAKSİLERİN POPÜLASYONLARININ BELİRLENMESİ . 68
4.2.1. Galaksi Popülasyonlarının Sayı Oranları 73
4.3. GALAKSİ POPÜLASYONLARININ KÜME MERKEZİNE UZAKLIKLARI ... 78
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 84
KAYNAKLAR 88
EKLER 98
EK 1. Tezden Üretilmiş Yayının Kapak Sayfası 98
ÖZGEÇMİŞ 99

ŞEKİL LİSTESİ

Page No

Şekil 2.1 Abell 2218 zengin ve kütleli bir galaksi kümesidir. Güçlü bir kütle çekimsel mercek olarak arka plandaki uzak galaksilerin görüntülerini büyütmekte ve yay biçiminde bozulmalara neden olmaktadır. © HST/NASA/ESA 6

Şekil 2.2 Kurşun Kümesi (1E 0657–56)'nin çoklu dalgaboyu görüntüsü. Görüntü, birleşen iki galaksi kümesini göstermektedir. Optik gözlemler (Magellan ve Hubble Uzay Teleskobu) galaksileri turuncu ve beyaz tonlarda ortaya koyarken, Chandra X-ışını Gözlemevi verileri küme içi sıcak gazı (pembe) göstermektedir. Arka plan galaksilerinin kütle çekimsel merceklenme sonucu bozulan görüntülerinden elde edilen kütle dağılımı, kümedeki toplam kütlenin büyük kısmının karanlık madde tarafından temsil edildiğini ortaya koymaktadır (mavi). Bu sistem, normal madde (sıcak gaz) ile karanlık maddenin uzaysal olarak ilk kez açık biçimde ayrıştığının gözlendiği örnek olarak kabul edilmektedir. ©ESA..... 8

Şekil 2.3 Galaksilere ait morfoloji yoğunluk ilişkisi (Dressler, 1980). 13

Şekil 2.4 Tipik bir galaksi kümesinde yerel yoğunluğa bağlı galaktik içeriğin şematik gösterimi (Capozziello ve Lattanzi, 2006)..... 14

Şekil 2.5 ESO VLT'ye takılı olan MUSE integral alan spektrografı ile yürütülen GASP projesinde gözlenen carpışma basıncı etkileri (Poggianti ve diğ., 2017b). ©ESO 15

Şekil 2.6 Suzaku uydusu üzerindeki X-ray Imaging Spectrometer (XIS) tarafından elde edilen Perseus Kümesi çekirdek bölgesine ait X-ışını tayfına bir örnek. Önemli elementlere karşılık gelen tayfsal çizgilerin konumları açık kırmızı taralı alanlar ile gösterilmiştir. ©Suzaku/JAXA 18

Şekil 2.7 Dört panelden oluşan bu bileşik görüntüde, Abell 1835, MS 1455.0+2232, RXJ 1347.5–1145 ve ZWCL 3146 galaksi kümeleri, Chandra X-ışını (mor) verilerinin Hubble ve SDSS optik gözlemleriyle birleştirilmesiyle gösterilmekte olup, karanlık enerji çalışmalarında kullanılan geniş bir küme örnekleminin parçasını temsil etmektedir (Morandi ve Sun, 2016)..... 19

Şekil 2.8 Hubble çatal diyagramı. Eliptik (E), merceksi (S0,SB0), çubuklu (SB) ve çubuksuz (S) spiral ile düzensiz (Irr) galaksiler gösterilmektedir. © Zooniverse, ESO. 21

Şekil 2.9 Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen bu görüntüde gösterilen NGC 2865, Dünya'dan yaklaşık 100 milyon ışık yılı uzaklıkta bulunan bir eliptik galaksidir. © ESA/Hubble & NASA..... 23

Şekil 2.10 Hubble Uzay Teleskobu tarafından görüntülenen merceksi galaksi NGC 4886, büyük ölçüde yaşlı yıldız popülasyonlarından oluşmakta olup belirgin spiral kollara sahip değildir. ©NASA/ESA/Hubble 24

Şekil 2.11 Çarkıfelek (Pinwheel) Galaksisi olarak da bilinen spiral galaksi M101'in Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen görüntüsü. ©NASA/ESA/CFHT/NOAO 25

Şekil 2.12 Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen bu görüntüde, düzensiz cüce galaksi NGC 5264 gösterilmektedir. © ESA/Hubble & NASA. 26

Şekil 2.13 SDSS ile gözlenen yaklaşık 148000 galaksinin (g<21) $r-i$ renk dağılımı. (Strateva ve diğ., 2001). 27

Şekil 2.14 Kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarına ait iki değişkenli dağılımlar. Logaritmik konturlar galaksi yoğunluklarını temsil ederken, düz çizgiler kırmızı galaksileri kesikli çizgiler mavi galaksileri göstermektedir. Kalın kesik noktalı siyah çizgi ise bu iki popülasyonu ayıran en uygun sınırı ifade etmektedir (Baldry ve diğ., 2004). 28

Şekil 2.15 Coma Süperkümesi için $g-i$ renk–i-bandı mutlak kadir diyagramı. Üst panel tüm galaksi örneklemini, alt paneller ise geç tip (sol) ve erken tip (sağ) galaksileri göstermektedir. Galaksiler morfolojik tiplerine göre kodlanmış olup, kırmızı kol ve mavi bulutun renk-parlaklık uzayındaki ayrımı açık biçimde görülmektedir (Gavazzi ve diğ., 2010). 30

Şekil 2.16 Galaksilerin mavi buluttan kırmızı kola evriminin şematik gösterimi. Galaksiler kütlelerine ve geçirdikleri etkileşmelere bağlı olarak farklı yollarla kırmızı kola ulaşırlar (Faber ve diğ., 2007). 31

Şekil 3.1 eROSITA ve ART-XC dedektörleriyle Spectrum-Roentgen-Gamma (Spektr-RG/SRG) Teleskobunun temsili gösterimi. Kaynak:`https://iki.cosmos.ru/en/research/missions/spektr-rg` 34

Şekil 3.2 Abell 3391 ve Abell 3395 etkileşen kümelerinin ROSAT, Planck, XMM-Newton ve eROSITA görüntüleri. eROSITA, XMM-Newton'dan daha yüksek çözünürlüklü ve daha geniş alan görüntüleyebilmektedir. ©T. Reiprich (Univ. Bonn), M. Ramos-Ceja (MPE), F. Pacaud (Univ. Bonn), D. Eckert (Univ. Geneva), J. Sanders (MPE), N. Ota (Univ. Bonn), E. Bulbul (MPE), V. Ghirardini (MPE), J. Erler (Univ. Bonn), A. Veronica (Univ. Bonn) 35

Şekil 3.3 ART-XC tarafından tüm gökyüzü taramasının ilk yılı boyunca 4–12 keV enerji aralığında tespit edilen X-ışını kaynaklarının Galaktik koordinatlardaki konumları gösterilmektedir. Sembollerin boyutu, her bir kaynağın X-ışını parlaklığını temsil etmekte olup, bu ölçek sağ üst köşede belirtilmiştir (Pavlinsky ve diğ., 2022). 37

Şekil 3.4 SDSS I-III taramalarında kullanılan fotometrik filtreler. 39

Şekil 3.5 SRG/ART-XC kataloğundaki kümeler ile sert X-ışın küme örnekleminin kırmızıya kayma (z) dağılımı. 42

Şekil 3.6 Hao ve diğ. (2010) kataloğundaki 55.494 galaksi kümesinin zenginlik dağılımı. 43

Şekil 3.7 Galaktik koordinatlarda (aitoff projeksiyonu) örneklem kümelerinin ve ARTSS1–5 kataloğunun gökyüzü dağılımı. 44

Şekil 3.8 Örneklemdeki 4065 galaksinin tayfsal kırmızıya kaymaları ile fotometrik kırmızıya kaymalarının karşılaştırması. 46

Şekil 3.9 Olası üye galaksilerin r ve i bandı parlaklık-hata grafikleri. Kesikli kırmızı çizgi S/N koşulunu, düz kırmızı çizgi her bant için hesaplanan parlaklık limitini göstermektedir. 49

Şekil 4.1 Her iki örneklemin r bandı parlaklıklarına bağlı etkin yarıçap dağılımları. 55

Şekil 4.2 Örneklem içerisine karışmış SDSS tarafından yanlış sınıflandırılan yıldızlar. 55

Şekil 4.3 Temiz fotometrinin dışladığı galaksilerin bazılarının SDSS görüntüleri. 59

Şekil 4.4 Temiz Fotometri örneklemine dahil olan, ancak görüntü incelemesi sonucu fotometrisi problemli olduğu belirlenen cisimlerden bazılarının SDSS görüntüleri. 59

Şekil 4.5 Problemli örneklemde, temiz veri ile geri kazanılmış galaksilere göre daha fazla bulunan fotometrik etiketlerin birlikte görülme matrisi. 63

Şekil 4.6 Fotometrik olarak `GALAXY` sınıfında yer almasına rağmen SDSS tayfsal veritabanında farklı sınıflara atanmış cisimlere ait temsili örnekler. Üst panelde tayfsal olarak `STAR` sınıfında, alt panelde ise `QSO` sınıfında yer alan örnek cisimler gösterilmektedir. 65

Şekil 4.7 Gaia DR3 kataloğu kullanılarak tespit edilen yüksek olasılıklı yıldız ve kuazarların bazılarının SDSS görüntüleri. Üstteki cisimler yıldız, alttaki cisimler kuazar örnekleridir. ... 66

Şekil 4.8 *r* bandı parlaklığına bağlı etkin yarıçap dağılımı. Mavi noktalar galaksi örneklemini, kırmızı noktalar Gaia, yeşil noktalar ise SDSS tarafından yıldız veya kuazar olarak sınıflandırılan cisimleri göstermektedir. 67

Şekil 4.9 X-ışın galaksi kümelerinin GMM analizi sonuçları. Solda bileşenlerin Gauss dağılımları, ortada renk-kadir diyagramları ve sağda bileşenlerin uzaysal dağılımları verilmektedir. 69

Şekil 4.9 devamı. 70

Şekil 4.10 Optik galaksi kümelerinin GMM analizi sonuçları. Solda bileşenlerin Gauss dağılımları, ortada renk-kadir diyagramları ve sağda bileşenlerin uzaysal dağılımları verilmektedir. 71

Şekil 4.10 devamı. 72

Şekil 4.11 Sert X-ışın kümeleri ile optik kümelerin kırmızı ve mavi galaksi sayı oranlarının dağılımı. 77

Şekil 4.12 Sert X-ışın ve optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi oranının normalize edilmiş bileşen uzaklıklarına (R/R_{200}) bağlı değişimi. 77

Şekil 4.13 Sert X-ışın galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları. 80

Şekil 4.14 Optik galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları. 81

Şekil 4.15 Sert X-ışın galaksi kümeleri ile optik galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları. 82

Şekil 4.16 Sert X-ışın ve optik galaksi kümelerinin kırmızı bileşenleri ile mavi bileşenlerinin karşılaştırmalı kümülatif dağılım histogramları. 83

TABLO LİSTESİ

Page No

Tablo 2.1 Galaksi küme ve gruplarının genel özellikleri (Bahcall, 1999)..... 5

Tablo 2.2 Farklı küme türlerinde galaksi morfolojilerinin yüzdesel dağılımı (Bahcall, 1999)..... 14

Tablo 3.1 Sert X-ışınları ile belirlenmiş galaksi küme örnekleminin RA, Dec, kırmızıya kayma (z) ve zenginlikleri (λ). 41

Tablo 3.2 Optik galaksi küme örnekleminin RA, Dec, kırmızıya kayma ve zenginlikleri. 43

Tablo 3.3 Sert X-ışın küme örnekleminin R_{200} ve M_{200} değerleri..... 48

Tablo 3.4 Optik küme örnekleminin R_{200} değerleri. 48

Tablo 3.5 Sert X-ışın örneklemindeki her küme için hesaplanan r ve i bandı limit parlaklıkları.. 50

Tablo 3.6 Optik küme örneklemindeki her küme için hesaplanan *r* ve *i* bandı limit parlaklıkları. 50

Tablo 4.1 SDSS Temiz Fotometri sorgusu kalite etiketleri, anlamları ve kullanım amaçları..... 57

Tablo 4.2 Temiz Fotometri tarafından veriden dışlanan 583 cismin ayıklanmasına neden olan fotometrik etiketlerin dağılımı. 58

Tablo 4.3 Görsel inceleme öncesi ve sonrası farklı örneklemlerin özeti. 60

Tablo 4.4 Belirlenen alt örneklemlerin fotometrik etiketlerinin dağılımı. 62

Tablo 4.5 Önerilen yeni SQL sorgusunun alt örneklemler üzerindeki sonuçları..... 64

Tablo 4.6 Sert X-ışın galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi sayıları ve yüzdesel oranları. En alt satırda tablodaki tüm kümelerin toplam değerleri ve yüzdesel oranları verilmektedir. 74

Tablo 4.7 Optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi sayıları ve yüzdesel oranları. En alt satırda tablodaki tüm kümelerin toplam değerleri ve yüzdesel oranları verilmektedir..... 75

Tablo 4.8 Sert X-Işın galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme merkezlerine medyan uzaklıkları ($\tilde{R}$) ve KS testi sonuçları. En alt satırda, iki popülasyon için tüm kümelerdeki medyan uzaklıkların ortalamaları verilmektedir..... 79

Tablo 4.9 Optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme merkezlerine medyan uzaklıkları ($\tilde{R}$) ve KS testi sonuçları. En alt satırda, iki popülasyon için tüm kümelerdeki medyan uzaklıkların ortalamaları verilmektedir..... 79

Tablo 5.1 X-ışını ile seçilmiş galaksi kümesi örneklerinde, renk, yıldız oluşumu veya morfoloji temelli geç-tür galaksi oranlarının karşılaştırılması. Bu çalışmalar, bu tez kapsamında kullanılan renk-temelli GMM sınıflandırmalarıyla doğrudan karşılaştırılabilir niteliktedir. .. 87

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

$z$phot	: Fotometrik kırmızıya kayma
$z$spec	: Tayfsal kırmızıya kayma
Δz	: Kırmızıya kayma aralığı
$Ngal$	: Galaksi sayısı
R_{200}	: Yoğunluğu kritik kütle yoğunluğunun 200 katı olan yarıçap
M_{200}	: R_{200} içinde tanımlanan küme kütlesi
$M_{\odot}$	: Güneş kütlesi
$L_{\odot}$	: Güneş'in ışıma gücü
M	: Kütle
M/L	: Kütle-parlaklık oranı (Mass-to-Light Ratio)
λ	: Galaksi kümesine ait zenginlik parametresi
S/N	: Sinyal-gürültü oranı
H_0	: Hubble sabiti ($z = 0$ için)
h	: İndirgenmiş Hubble sabiti ($H_0/100$)
Ω_{m}	: Evrendeki madde yoğunluğu
Ω_{Λ}	: Evrendeki karanlık enerji yoğunluğu
ρ_{cr}	: Kritik kütle yoğunluğu
k	: Eğrilik parametresi
π	: Pi sayısı
σ	: Standart sapma
G	: Evrensel kütle çekim sabiti
e	: Basıklık
a	: Yarı büyük eksen uzunluğu
b	: Yarı küçük eksen uzunluğu
D	: Kolmogorov–Smirnov istatistiği
***p*-değeri**	: İstatistiksel anlamlılık düzeyi
$\mathrm{f_{red}}$	: Kırmızı galaksi oranı
$\mathrm{f_{blue}}$	: Mavi galaksi oranı
Nred	: Kırmızı galaksi sayısı

Nblue	: Mavi galaksi sayısı
p_{red}	: Kırmızı bileşen olasılığı
p_{blue}	: Mavi bileşen olasılığı
$\tilde{\mathrm{R}}$	: Medyan Uzaklık
u, g, r, i, z	: Fotometrik bant parlaklıkları
$r-i$	: Renk indeksi
m	: Görünür parlaklık
kg	: Kilogram
m	: Metre
km	: Kilometre
K	: Kelvin
$'$	: Yay dakikası
$''$	: Yay saniyesi
Å	: Angström

Kısaltmalar **Açıklama**

kpc	: Kiloparsec
Mpc	: Megaparsec
UV	: Ultraviyole
PSF	: Point Spread Function
SDSS	: Sloan Digital Sky Survey
GMBCG	: Gaussian Mixture Brightest Cluster Galaxy
Λ***CDM***	: Lambda Cold Dark Matter
ICM	: Küme içi ortam (Intracluster Medium)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
RA	: Sağ açıklık (Right Ascension)
Dec	: Dik açıklık (Declination)
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
GMM	: Gauss Mixture Model
E	: Eliptik galaksiler
dSph	: Cüce seferoidler)
S0/SB0	: Merceksi galaksiler (normal / çubuklu)
Sa/Sb/Sc	: Spiral galaksiler (normal)
SBa/SBb/SBc	: Spiral galaksiler (çubuklu)

Irr : Düzensiz galaksiler

cD : Galaksi kümesi merkezindeki baskın galaksi

BCG : En parlak küme galaksisi

RASS : ROSAT All-Sky Survey

REFLEX : ROSAT-ESO Flux Limited X-ray Galaxy Cluster Survey

NORAS : Northern ROSAT All-Sky Galaxy Cluster Survey

XMM : X-ray Multi-Mirror Mission

XMM-LSS : XMM Large Scale Structure Survey

XXL : XXL X-ray Survey

CC : Cool core

NCC : Non-cool core

eRASS : eROSITA All-Sky Survey

ART-XC : Astronomical Roentgen Telescope – X-ray Concentrator

SRG : Spectrum–Roentgen–Gamma

IKI : Russian Academy of Sciences Space Research Institute

DLR : The German Aerospace Center

MPE : Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics

RFNC–VNIIEF : The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

MSFC : NASA Marshall Space Flight Center

AGN : Aktif galaksi çekirdeği

HMXB : Yüksek kütleli X-ışını çiftleri (High-Mass X-ray Binary)

CV : Kataklismik değişenler

APO : Apache Point Observatory

CCD : Charge-Coupled Device

BOSS : Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey

MaNGA : Mapping Nearby Galaxies at APO

SEGUE : Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration

APOGEE : Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment

eBOSS : Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey

POSS : Palomar Observatory Sky Survey

GALEX : Galaxy Evolution Explorer

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SERT X-IŞINLARINDA BELİRLENEN GALAKSİ KÜMELERİNİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

Hatice Bahar ATALI

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sinan ALİŞ

Bu tez çalışmasında SRG X-ışın teleskobunun ART-XC detektörü ile sert X-ışınlarında tespit edilmiş 9 küme ve 7 optikçe belirlenmiş küme incelenmiştir. X-ışın kümelerinde 1607 ve optikçe belirlenmiş kümelerde 1611 galaksi kullanılarak analizler yapılmıştır. Küme üyesi galaksiler renkleri kullanılarak erken ve geç tür popülasyonlara ayrılmıştır. Bu amaçla makine öğrenmesi tekniklerinden denetimsiz öğrenme algoritması olan GMM yaklaşımı benimsenmiştir. Her bir popülasyonun küme içindeki uzaysal dağılımları karşılaştırılmıştır. Hesaplanan uzaklıklardan itibaren elde edilen kümülatif dağılımlar 7 X-ışın kümesinde erken tür galaksilerin küme merkezlerine geç türlere göre daha yakın olduğunu göstermiştir. İki kümede, A586 ve A1835, popülasyonların küme merkezlerine göre benzer uzaysal dağılımda olduğu görülmüştür. Benzer şekilde optikçe belirlenmiş 7 kümenin 5'inde erken tür galaksiler merkeze daha yakın dağılırken, iki kümede iki popülasyon benzer dağılım göstermiştir. Tüm kümeler için sonuçlar birleştirildiğinde hem X-ışın kümelerinde hem de optikçe belirlenmiş kümelerde erken tür galaksiler küme merkezlerine daha yakın konumlarda bulunmaktadır. Bu durum Dressler (1980) tarafından ilk kez ortaya atılan morfoloji-yoğunluk ilişkisi ile uyumludur.

ŞUBAT 2026, 115 sayfa.

Anahtar kelimeler: galaksi kümeleri - galaksiler - galaksi popülasyonları - gökyüzü tarama projeleri

SUMMARY

Ph.D. THESIS

OPTICAL PROPERTIES OF GALAXY CLUSTERS DETECTED IN HARD X-RAYS

Hatice Bahar ATALI

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Sciences

Department of Astronomy and Space Sciences

Supervisor: Asst. Prof. Sinan ALİŞ

In this thesis, nine galaxy clusters detected in hard X-rays with the ART-XC detector onboard the SRG X-ray telescope and seven optically selected clusters were investigated. The analyses were carried out using 1,607 galaxies in the X-ray–selected clusters and 1,611 galaxies in the optically selected clusters. Cluster member galaxies were separated into early- and late-type populations based on their colors. For this purpose, the Gaussian Mixture Model (GMM), an unsupervised machine learning algorithm, was adopted. The spatial distributions of each population within the clusters were compared. The cumulative distributions derived from the calculated cluster-centric distances show that, in seven of the X-ray–selected clusters, early-type galaxies are located closer to the cluster centers than late-type galaxies. In two clusters, A586 and A1835, the two populations exhibit similar spatial distributions relative to the cluster centers. Similarly, among the seven optically selected clusters, early-type galaxies are more centrally concentrated in five clusters, while in the remaining two clusters both populations show comparable distributions. When the results from all clusters are combined, early-type galaxies are found to reside systematically closer to the cluster centers in both X-ray–selected and optically selected samples. This finding is consistent with the morphology–density relation first proposed by Dressler (1980).

Feb 2026, 115 pages.

Keywords: galaxy clusters - galaxies - galaxy populations - surveys

1. GİRİŞ

Galaksi kümeleri, 20. yüzyılın ilk yarısında yapılan optik gözlemlerle birlikte, galaksilerin uzaysal dağılımlarında belirgin yoğunluk artışları olarak tanımlanmaya başlamıştır. Bu alandaki öncü çalışmalardan biri, Fritz Zwicky'nin 1930'larda Coma Kümesi üzerine gerçekleştirdiği optik gözlemlerle, galaksilerin bu sistemler içerisinde yalnızca görsel birer yoğunlaşma olmadığını, aynı zamanda kütle çekimsel olarak birbirine bağlı olduklarını ortaya koyduğu çalışmadır. Küme galaksilerinin hız dağılımlarını Viryal Teoremi çerçevesinde analiz eden Zwicky, galaksilerin bu hızlarla küme içinde kalabilmesi için sistemin görünür maddeden çok daha fazla kütle içermesi gerektiğini hesaplamış; böylece modern kozmolojinin en büyük gizemlerinden biri olan karanlık maddenin ilk somut ipuçlarını literatüre kazandırmıştır (Zwicky, 1937).

Bunu izleyen yıllarda gerçekleştirilen geniş alanlı gökyüzü taramaları, galaksi kümelerinin sistematik biçimde tanımlanmasına olanak sağlamıştır. Bu bağlamda, George O. Abell tarafından oluşturulan galaksi kümesi katalogları; kümelerin zenginlik, yoğunluk ve uzaysal dağılımlarına dayalı olarak sınıflandırılmasını mümkün kılarak büyük ölçekli yapı çalışmalarında standart bir referans haline gelmiştir. Başlangıçta gökyüzü düzleminde iki boyutlu (açısal) bir dağılım sunan bu çalışmalar, Abell'in kümeleri yalnızca statik galaksi grupları olarak değil, evrenin dokusunu oluşturan temel yapı taşları olarak ele almasıyla büyük bir vizyon değişikliği yaratmıştır (Abell, 1958). Abell'in çalışmalarını takiben 1980'li yıllarda Alan Dressler tarafından gerçekleştirilen ayrıntılı optik çalışmalar, küme ortamının galaksi morfolojileri üzerindeki etkisini ortaya koyarak galaksi kümelerinin galaksi evriminde aktif bir rol oynadığını göstermiştir (Dressler, 1980). Bu çalışmalar, galaksi kümelerinin yalnızca büyük ölçekli yapı taşları değil, aynı zamanda çevresel süreçlerin galaksi özelliklerini belirlediği dinamik sistemler olduğunu ortaya koymuştur. Bunu izleyen dönemde kırmızıya kayma verilerinin optik gözlemlere sistematik biçimde eklenmesi, galaksilerin iki boyutlu izdüşümlerini üç boyutlu bir uzaysal dağılıma taşıyarak evrenin büyük ölçekli yapısının haritalanmasına olanak tanımıştır. Bu çalışmalar sonucunda, galaksi kümelerinin evrende rastgele dağılmadığı; aksine "süperkümeler" olarak adlandırılan daha büyük yapılar içinde yer aldığı ve bu yapıların arasında galaksiden yoksun geniş

boşlukların bulunduğu gözlemsel olarak ortaya konmuştur Geller ve Huchra (1989). Sonuç olarak, Abell'in katalogları ve bunu takip eden çalışmalar, galaksi kümelerinin istatistiksel olarak anlamlı ve kozmolojik açıdan güvenilir örneklemler olarak ele alınmasının önünü açarak modern kozmolojik analizlerin temelini oluşturmuştur.

Bu tarihsel ve istatistiksel perspektif, günümüzde galaksi kümelerini yalnızca gökyüzündeki yoğunlaşmalar olarak değil, evrendeki kütle çekimsel olarak bağlı en büyük ve en dinamik sistemler olarak tanımlamamıza olanak sağlamıştır. Artık hiyerarşik yapı oluşumu senaryosunun en üst basamağında yer alan bu devasa sistemler; galaksiler, sıcak küme içi ortam (ing. intracluster medium, ICM) ve karanlık maddeden oluşan çok bileşenli yapılarıyla, hem kozmolojik hem de astrofiziksel süreçlerin incelendiği eşsiz birer laboratuvar olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, galaksi kümelerinin sahip olduğu bu karmaşık yapının tam olarak anlaşılması, sadece optik verilerle sınırlı kalmayıp çoklu dalga boylu gözlemlerle incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Bu sayede elde edilen verilerin birleşimi, bu bileşenlerin fiziksel özelliklerinin ve birbirleriyle olan karmaşık etkileşimlerinin çok daha kapsamlı bir biçimde analiz edilmesine imkan tanımaktadır (Schneider, 2015).

Galaksi kümelerinin X-ışını gözlemleri; kümelerin kütle, sıcaklık ve yoğunluk gibi temel fiziksel parametrelerinin belirlenmesine olanak tanıyarak bu sistemlerin dinamik durumları hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. Özellikle X-ışını parlaklığı ve küme içi ortamın sıcaklığı gibi fiziksel niceliklerin küme kütlesiyle güçlü bir korelasyon içerisinde olması, galaksi kümelerinin kozmolojik çalışmalarda hassas birer araç olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır Bulbul ve diğ. (2024). Bu noktada X-ışını emisyonu, kümelerin nokta kaynaklardan farklı olarak yaygın kaynaklar şeklinde gözlenmesini sağlayarak, galaksilerin rastlantısal olarak aynı bakış doğrultusunda dizilmesinden kaynaklanan projeksiyon etkilerinin önüne geçmektedir. Bu yönüyle X-ışını gözlemleri, optik yöntemlerle karşılaştırıldığında, projeksiyon etkilerine daha az duyarlı olmaları sayesinde galaksi kümelerinin daha homojen ve güvenilir örneklemler halinde, geniş ölçeklerde kataloglanmasına olanak tanımaktadır (Costanzi ve diğ., 2019; Ramos-Ceja ve diğ., 2019). Bununla birlikte galaksi kümelerinin içsel dinamiklerini anlamak için optik gözlemler; galaksi popülasyonlarını, morfolojik dağılımları, renk-parlaklık ilişkilerini ve yıldız oluşum geçmişlerini incelemek açısından vazgeçilmez bir tamamlayıcıdır Schneider (2015).

Küme galaksilerinin optik özellikleri; maruz kaldıkları çevresel etkiler, geçmişteki birleşmeler ve küme içi fiziksel süreçler hakkında önemli ipuçları barındırır. Bu bağlamda, X-ışını verileriyle belirlenen galaksi kümelerinin optik özelliklerinin sistematik olarak incelenmesi, X-ışını seçiminin küme galaksi popülasyonları üzerindeki olası etkilerini ve fiziksel bağlantılarını ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Böyle bir bütüncül yaklaşım, galaksi kümelerini hem büyük ölçekli birer kozmolojik araç hem de galaksi evriminin şekillendiği dinamik laboratuvarlar olarak kavramamıza olanak sağlamaktadır (Cariddi ve diğ., 2018; Fasano ve diğ., 2006; Thomas ve Katgert, 2006).

Bu tez çalışmasının temel amacı, Spektrum-Röntgen-Gama (SRG) Teleskobu tarafından sert X-ışını bandında belirlenen galaksi kümelerinin optik özelliklerini araştırmaktır. Çalışmanın merkezinde, X-ışını seçimine dayalı kümelerdeki galaksi popülasyonlarının istatistiksel bir yaklaşımla belirlenmesi; bu popülasyonların küme içindeki sayıca oranlarının ve uzaysal dağılımlarının araştırılması yer almaktadır. Bu kapsamda, sert X-ışın gözlemlerine dayalı belirlenen örneklemlerin galaksi popülasyonları ve küme içindeki dağılımları, optik yöntemlerle belirlenmiş kontrol grubu kümeleriyle karşılaştırılmıştır. İki farklı örneklem grubu arasında yapılan bu sistematik kıyaslama, X-ışını tabanlı tespit yöntemlerinin küme içerisindeki galaksi popülasyonları ve onların uzaysal dağılımı üzerinde oluşturabileceği sistematik farklılıkları ortaya koymayı hedeflemiştir. Hesaplamalarda, ΛCDM standart kozmolojik modeli ($H_0 = 70\ \mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$) esas alınmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. GALAKSİ KÜMELERİ

Evrenin büyük ölçekli yapısı, hiyerarşik yapı oluşumu olarak adlandırılan bir senaryo çerçevesinde açıklanmaktadır. Bu yaklaşıma göre, madde başlangıçta küçük yoğunluk dalgalanmaları halinde çökmeye başlar; zamanla bu küçük yapılar birleşerek galaksileri, galaksi gruplarını ve nihayetinde galaksi kümelerini oluşturur. Dolayısıyla, hiyerarşik yapı oluşumu, "küçükten büyüğe" ilerleyen, sürekli ve dinamik bir evrim sürecini tanımlar. Bu bağlamda, galaksi kümeleri kozmik ağın düğüm noktalarında yer alan, kütle çekimsel olarak bağlı en büyük ve en geç evrimleşmiş sistemler olarak bu hiyerarşinin son adımını temsil ederler (Schneider, 2015). Tipik olarak 1-3 Mpc yarıçaplarda, 10^{13}-$10^{15}\,M_{\odot}$ kütle aralığında tanımlanan galaksi kümeleri, onlarca galaksiden oluşan küçük gruplardan, binlerce galaksi barındıran zengin kümelere kadar geniş bir ölçek sunar. Optik dalga boylarında, yüzlercesinden binlercesine değişen sayıda üye galaksiyle tanımlanan bu sistemler, X-ışını bandında 10^{43}-$10^{45}\,\mathrm{erg\,s^{-1}}$ mertebesinde ışıma güçlerine ulaşabilen, evrendeki en parlak baryonik yapılardır. Bu özellikleri sayesinde galaksi kümeleri, hem büyük ölçekli yapı oluşumunu hem de galaksi evrimini birlikte inceleyebilme olanağı sunan eşsiz kozmolojik laboratuvarlar olarak kabul edilmektedir (Kravtsov ve Borgani, 2012). **Tablo 2.1**'de Bahcall (1999) çalışmasında verilen galaksi küme ve gruplarının genel özellikleri karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir.

Bir galaksi kümesinin fiziksel yapısı üç ana bileşenden oluşur: galaksiler, küme içi gaz ve karanlık madde. Görsel bölgede görünür bileşen olan galaksiler, kümenin toplam kütlesinin yalnızca yaklaşık %3–5'ini oluşturur ve esas olarak optik ve yakın kızılötesi dalga boylarında gözlenir. Buna karşın baskın baryonik bileşen, küme içi ortam olarak adlandırılan sıcak ve iyonize gazdır. Gazın, merkez bölgelerindeki elektron sayı yoğunluğu $n_e \sim 10^{-3}$–10^{-2} cm^{-3} mertebesine ulaşırken, küme dış bölgelerinde bu değerler 10^{-4} cm^{-3} seviyelerine kadar düşmektedir. Toplam kütlenin yaklaşık %10–15'ini oluşturan bu seyrek plazma, 10^{7}–10^{8} K gibi son derece yüksek sıcaklıklara sahiptir ve X-ışını bandında gözlenir. Toplam kütlenin %80–85'ini temsil eden karanlık madde ise doğrudan ışınım yapmaz; varlığı ve dağılımı

Tablo 2.1 Galaksi küme ve gruplarının genel özellikleri (Bahcall, 1999).

Özellik	Kümeler	Gruplar
Zenginlik	30 – 300 galaksi	3 – 30 galaksi
Yarıçap	$(1-2)\,h^{-1}$ Mpc	$(0.1-1)\,h^{-1}$ Mpc
Radyal hız dağılımı	$400-1400$ km s^{-1}	$100-500$ km s^{-1}
Radyal hız dağılımı (medyan)	~ 750 km s^{-1}	~ 250 km s^{-1}
Kütle ($\leq 1.5\,h^{-1}$ Mpc)	$(10^{14}-2\times10^{15})\,h^{-1}\,M_\odot$	$(10^{12.5}-10^{14})\,h^{-1}\,M_\odot$
Parlaklık ($\leq 1.5\,h^{-1}$ Mpc)	$(6\times10^{11}-6\times10^{12})\,h^{-2}\,L_\odot$	$(10^{10.5}-10^{12})\,h^{-2}\,L_\odot$
$\langle M/L\rangle$	$\sim 300\,hM_\odot/L_\odot$	$\sim 200\,hM_\odot/L_\odot$
X-ışını sıcaklığı	$2-14$ keV	$\lesssim 2$ keV
X-ışını parlaklığı	$(10^{42.5}-10^{45})\,h^{-2}$ erg s^{-1}	$\lesssim 10^{43}\,h^{-2}$ erg s^{-1}
Küme sayı yoğunluğu	$(10^{-5}-10^{-6})\,h^3$ Mpc^{-3}	$(10^{-3}-10^{-5})\,h^3$ Mpc^{-3}
Küme korelasyon ölçeği	$(22\pm4)\,h^{-1}$ Mpc $(R\geq1)$	$(13\pm2)\,h^{-1}$ Mpc
Küme ve gruplardaki galaksilerin oranı	$\sim 5\%$	$\sim 55\%$

galaksi dinamikleri, X-ışını gazının davranışı ve kütle çekimsel merceklenme yoluyla dolaylı olarak kendini gösterir. Bunlara ek olarak, toplam kütlenin yaklaşık %0.1'lik çok küçük bir kısmı, küme içi manyetik alanlar ve rölativistik parçacıklardan oluşur. Bu bileşen kütle bütçesinde ihmal edilebilir olsa da, radyo haloları ve radyo artıklarının gözlenmesi gibi olgular yoluyla kümelerdeki enerji transferi ve dinamik süreçler hakkında önemli bilgiler sunar. Bu bileşenlerin birlikte incelenmesi, kümelerin hem baryonik hem de karanlık tarafını anlamanın anahtarıdır (Schneider, 2015).

Galaksi kümelerinin ilk sistematik kataloglarından biri, Abell (1958) tarafından Palomar Gözlemevi Gökyüzü Taraması (POSS) fotoğraf plakları üzerinde yapılan görsel incelemelere dayanarak 2712 galaksi kümesiyle oluşturulmuştur. Bu çalışmada galaksi kümeleri, gökyüzünde belirli bir açısal alan içinde gözlenen galaksi sayısındaki aşırı yoğunluklar olarak tanımlanmış; yıldız yoğunluğu ve sönümleme etkileri nedeniyle gözlemlerin zorlaştığı galaktik disk bölgesi katalog dışında bırakılmıştır. Abell'in tanımına göre bir kümenin, üçüncü en parlak galaksisinin görünür parlaklığı m_3 esas alınarak belirlenen $m_3 \leq m \leq m_3+2$ parlaklık aralığında en az 50 galaksi içermesi ve bu galaksilerin fiziksel olarak yaklaşık $1.5\,h^{-1}$ Mpc'ye karşılık gelen Abell yarıçapı (R_A) içinde yer alması gerekmektedir. Küme kırmızıya kaymaları, kümelerde onuncu en parlak galaksinin mutlak parlaklığının evrensel olduğu varsayımına dayalı olarak tahmin edilmiş ve bu nedenle katalog $0.02 \leq z \leq 0.2$ aralığıyla sınırlandırılmıştır. Optik gözlemlerin iki boyutlu izdüşümüne dayalı olması nedeniyle Abell kataloğu projeksiyon etkilerine ve öznel seçimlere açık olmakla birlikte, daha sonraki tayfsal çalışmalar bu yöntemin yaklaşık %30 belirsizlikle beklenenden yüksek doğruluk sağladığını göstermiştir. Kataloğun güney gökyüzünü kapsayan genişletilmiş



Şekil 2.1 Abell 2218 zengin ve kütleli bir galaksi kümesidir. Güçlü bir kütle çekimsel mercek olarak arka plandaki uzak galaksilerin görüntülerini büyütmekte ve yay biçiminde bozulmalara neden olmaktadır. © HST/NASA/ESA

sürümü Abell ve diğ. (1989) tarafından yayımlanmış ve toplam küme sayısı 4076'ya çıkarılmıştır.

Abell kataloğu, galaksi kümelerinin tanımlanmasında tarihsel bir dönüm noktası oluşturmasının yanı sıra, küme zenginliğinin nicel olarak tanımlanmasına da öncülük etmiştir. Kümelerin galaksi içeriği ve zenginliği, genellikle belirli bir parlaklık sınırının üzerindeki galaksi sayısı ile ifade edilmekte olup, bu büyüklüğün küme kütlesiyle istatistiksel olarak güçlü bir ilişki gösterdiği bilinmektedir (Abell, 1958; Rozo ve diğ., 2009). Buna göre, kütleli ve zengin kümeler yüzlerce hatta binlerce galaksi barındırırken, daha düşük kütleli sistemler galaksi grubu ölçeğinde kalmaktadır. Bu galaksilerin morfolojik bileşimi, küme ortamının galaksi evrimi üzerindeki etkilerini doğrudan yansıtmaktadır. Yoğun küme merkezlerinde erken tip galaksiler (eliptik ve merceksi) baskınken, geç tip ve yıldız oluşturan sarmal galaksiler daha çok kümenin dış bölgelerinde veya düşük yoğunluklu alt yapılarda bulunmaktadır. Bu gözlemsel eğilimler ilk kez Dressler (1980) tarafından sistematik olarak ortaya konan morfoloji–yoğunluk ilişkisi ile nicel bir çerçeveye oturtulmuştur. Söz konusu ilişki, galaksi morfolojisinin yalnızca içsel özelliklerle değil, aynı zamanda çevresel koşullarla da belirlendiğini göstermektedir. Yerel galaksi yoğunluğunun arttığı bölgelerde

erken tip galaksilerin oranı belirgin biçimde artmakta olup, bu durum yoğun küme ortamında etkin olan çeşitli fiziksel süreçlerle ilişkilendirilmektedir. Bunlar arasında, küme içi ortamda bulunan sıcak gazın galaksilerin soğuk gaz bileşenini süpürerek yıldız oluşumunu bastırdığı çarpma basıncı soyulması (Gunn ve Gott, 1972), kütle çekimsel kuvvetlerin galaksi yapısını bozduğu gelgit etkileşimleri (Farouki ve Shapiro, 1981) ve tekrarlayan galaksi–galaksi karşılaşmalarının neden olduğu galaksi tacizi süreçleri yer almaktadır (Moore ve diğ., 1996). Bu mekanizmaların bir sonucu olarak küme merkezlerinde, yıldız oluşumu büyük ölçüde bastırılmış ve yaşlı yıldız popülasyonlarına sahip galaksilerin oranı belirgin biçimde artmaktadır. Bu artış, morfolojik olarak eliptik ve merceksi (S0) galaksilerin baskın hale gelmesiyle birlikte, özellikle kırmızı ve pasif galaksilerin hem yerel çevresel yoğunluk hem de yıldız kütlesi ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir (Baldry ve diğ., 2006; Kauffmann ve diğ., 2004).

Galaksi kümelerinde küme içi ortamdaki sıcak gaz, hem enerji içeriğinin büyük bir bölümünü oluşturmakta hem de kümelerin X-ışını gözlemleriyle tanımlanmasında anahtar rol oynamaktadır. Bu gaz, kümenin derin kütle çekimsel potansiyel kuyusuna düşen baryonik maddenin şoklarla ısınması sonucu oluşur ve sıcaklığı $10^7 - 10^8$ K'e kadar yüksek mertebelere ulaşır. Bu ekstrem koşullar altında gaz, başlıca termal-bremsstrahlung (serbest–serbest ışıma) mekanizmasıyla X-ışını yayar; ayrıca ağır elementlerin iyonlaşmış hallerinden kaynaklanan çizgi ışıması da gözlenir. X-ışını parlaklığı elektron yoğunluğunun karesiyle doğru orantılı olduğundan, küme merkezlerinde belirgin bir parlaklık maksimumu ortaya çıkar. Gazın tayfsal özellikleri incelendiğinde, metal bolluğunun genellikle Güneş değerinin yaklaşık üçte biri civarında olduğu görülür; bu da küme içi ortamın yalnızca ilksel gazdan değil, galaksilerde gerçekleşen süpernova patlamaları ve galaktik rüzgarlar yoluyla zenginleşmiş maddeden oluştuğunu gösterir (Arnaud, 2005; Böhringer ve Werner, 2010; Sarazin, 1986).

Galaksi kümelerindeki en baskın ve aynı zamanda en gizemli bileşen karanlık maddedir. Karanlık madde, kümenin kütlesinin büyük çoğunluğunu oluşturmakta olup galaksilerin yörüngelerini ve küme içi gazın dağılımını belirler. Karanlık maddenin küme içindeki dağılımı, galaksi hız dispersiyonlarından ve X-ışını gözlemlerinden türetilen kütle profilleriyle dolaylı olarak izlenebilir; ancak en güçlü kanıtlar kütle çekimsel merceklenme çalışmalarıyla elde edilir (**Şekil 2.1**). Özellikle güçlü birleşme halindeki sistemlerde, baryonik gaz ile karanlık maddenin mekansal olarak ayrıldığı gözlenmiştir. Bu durum,



Şekil 2.2 Kurşun Kümesi (1E 0657–56)'nin çoklu dalgaboyu görüntüsü. Görüntü, birleşen iki galaksi kümesini göstermektedir. Optik gözlemler (Magellan ve Hubble Uzay Teleskobu) galaksileri turuncu ve beyaz tonlarda ortaya koyarken, Chandra X-ışını Gözlemevi verileri küme içi sıcak gazı (pembe) göstermektedir. Arka plan galaksilerinin kütle çekimsel merceklenme sonucu bozulan görüntülerinden elde edilen kütle dağılımı, kümedeki toplam kütlenin büyük kısmının karanlık madde tarafından temsil edildiğini ortaya koymaktadır (mavi). Bu sistem, normal madde (sıcak gaz) ile karanlık maddenin uzaysal olarak ilk kez açık biçimde ayrıştığının gözlendiği örnek olarak kabul edilmektedir. ©ESA

Kurşun Kümesi gibi çarpışan kümelerde (**Şekil 2.2**) açık biçimde ortaya konmuş ve karanlık maddenin çarpışmasız bir bileşen olduğuna dair en doğrudan gözlemsel kanıtlardan biri olarak kabul edilmiştir (Clowe ve diğ., 2006). Bu nedenle, galaksi kümeleri karanlık maddenin doğasını, dağılımını ve olası etkileşimlerini test etmek için evrendeki en önemli sistemler arasında yer almaktadır.

2.1.1. Galaksi Kümelerinde Karakteristik Ölçekler: M_{200} ve R_{200}

Galaksi kümeleri; çok sayıda galaksi, sıcak gaz ve karanlık madde içermeleri nedeniyle evrendeki kütle çekimsel olarak bağlanmış en yoğun yapılardan biridir. Bu tür büyük ölçekli yapıların fiziksel özellikleri, genellikle evrenin kritik kütle yoğunluğu ($\rho_{\rm cr}$) referans alınarak tanımlanmaktadır. Kritik yoğunluk, Friedmann denklemlerinin düz uzay geometrisi ($k = 0$) varsayımı altında elde edilen özel bir çözüme karşılık gelmektedir ve Denklem 2.1'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\rho_{\rm cr}(z) = \frac{3H^2(z)}{8\pi G} \quad (\rho_{\rm cr,0} = 1.8788 \times 10^{-26} h^2 \ {\rm kg\,m^{-3}}) \tag{2.1}$$

Burada $\rho_{\rm cr,0}$ bugünkü evren için hesaplanan kritik yoğunluk değerini ifade etmektedir.

Bir galaksi kümesinin iç yapısı ve dinamik durumu, küme merkezinden itibaren artan yarıçap boyunca değişen aşırı-yoğunluk bölgeleri kullanılarak karakterize edilmektedir. Kümenin merkezine yakın iç bölgelerde ortalama madde yoğunluğu, kritik yoğunluğun binlerce katına ulaşabilirken, dış bölgelere doğru bu oran kademeli olarak azalmaktadır. Bu nedenle literatürde kümeler, kritik yoğunluğun 2500, 500 ve 200 katına karşılık gelen karakteristik yarıçaplar (R_{2500}, R_{500} ve R_{200}) kullanılarak tanımlanmaktadır.

En iç bölgeleri temsil eden R_{2500} yarıçapı, kümenin çekirdek kısmına karşılık gelmekte olup, bu alanlarda sıcak gaz yoğunluğu yüksektir. Bu bölgeler, özellikle X-ışını gözlemlerinde yüksek sinyal-gürültü oranı sağlamaları nedeniyle ayrıntılı yapısal analizlerde tercih edilmektedir (Allen ve diğ., 2002; Ettori ve diğ., 2013). Daha dış bölgelerde tanımlanan R_{500}, kümenin önemli bir kısmını kapsayan ve gözlemsel olarak güvenilir kütle ölçümlerinin yapılabildiği bir ölçek olarak öne çıkmaktadır (Vikhlinin ve diğ., 2005).

Kümenin küresel yapısını ve dinamik olarak bağlanmış bölgesini tanımlayan en yaygın yarıçap ise R_{200}'dür. Bu yarıçap, küme merkezinden itibaren ölçülen ve içindeki ortalama kütle yoğunluğunun, evrenin kritik yoğunluğunun yaklaşık 200 katına ulaştığı sınırı ifade eder. R_{200}, kümenin büyük ölçüde dinamik dengeye ulaştığı ve viryalizasyonun geçerli olduğu bölgeyi temsil ettiğinden, çoğu çalışmada viryal yarıçap için pratik bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir (Cole ve Lacey, 1996; White, 2001).

Kritik yoğunluğun 200 katının seçilmesi, öncelikle küresel çökme modeline dayanmaktadır. Bu modelde, başlangıçta homojen kabul edilen küresel bir yoğunluk bölgesi, evrenin genişlemesine karşı koyarak kendi kütle çekimi altında çöker ve zamanla viryal dengeye ulaşır. Çökme sonrası viryalize olmuş yapının ortalama yoğunluğunun, çökme anındaki evrenin kritik yoğunluğunun birkaç yüz katı mertebesinde olduğu gösterilmektedir. Bu sonuç, galaksi kümelerinin dinamik olarak bağlanmış ve kararlı bölgelerinin, kritik yoğunluğun belirli bir katı kullanılarak tanımlanabileceğini ortaya koymakta ve R_{200}'ün fiziksel bir sınır olarak yorumlanmasına temel oluşturmaktadır. Bu tanım, dinamik zaman

ölçekleri kullanılarak da bağımsız biçimde gerekçelendirilebilir. R_{200} yarıçapında, M_{200} kütlesine sahip bir karanlık madde halosu içinde dairesel bir yörüngede hareket eden bir parçacığın yörüngesel periyodu, yalnızca bu yarıçap içinde kalan ortalama yoğunluğa bağlıdır ve halonun toplam kütlesinden bağımsızdır. Hem yörüngesel zaman ölçeği hem de serbest düşme zamanı, yoğunlukla yaklaşık olarak $t \propto \rho^{-1/2}$ şeklinde ölçeklenmektedir. Ortalama yoğunluğun 200 katı ($200\,\rho_{\rm cr}(z)$) olarak alınması durumunda, bu karakteristik zaman ölçeğinin, yapının oluştuğu kırmızıya kaymadaki evren yaşına mertebe olarak karşılık geldiği görülmektedir. Bu da R_{200} sınırında bulunan bir parçacığın, evrenin o andaki yaşı içinde en az bir yörünge tamamlayabileceği anlamına gelir (Schneider, 2015).

Bir sistemin gevşeme ve viryalizasyona ulaşma zamanının, parçacıkların yörüngesel zamanından daha kısa olamayacağı göz önüne alındığında, kritik yoğunluğun yaklaşık 200 katına karşılık gelen bölgelerin, dinamik olarak bağlanmış ve viryal dengeye yakın alanları temsil ettiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla R_{200} tanımı, hem küresel çökme modeline dayanan kuramsal beklentilerle hem de zaman ölçeği argümanlarıyla fiziksel olarak tutarlı ve uygulanabilir bir sınır sunmaktadır. Bu çerçevede tanımlanan M_{200}, R_{200} yarıçapı içerisinde kalan toplam kütleyi (karanlık madde, gaz ve baryonik bileşenler dahil) temsil etmekte olup,

$$M_{200} = \frac{4}{3}\pi R_{200}^3\, 200\,\rho_{\rm cr}(z) \tag{2.2}$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. M_{200} ve R_{200} birlikte kullanıldığında, bir galaksi kümesinin karakteristik kütle ve boyut ölçeğini tanımlayan tutarlı ve karşılaştırılabilir bir çerçeve sunmaktadır.

Sonuç olarak, farklı aşırı-yoğunluk tanımları kümenin iç yapısından dış sınırlarına kadar uzanan fiziksel süreçlerin incelenmesine olanak sağlarken, R_{200} ve M_{200} hem kuramsal çalışmalar hem de gözlemsel kütle tahminleri için en yaygın ve standart referans büyüklükler olarak öne çıkmaktadır (Cole ve Lacey, 1996; Rozo ve diğ., 2009; White, 2001).

2.1.2. Optik Dalga Boylarında Galaksi Kümeleri

Galaksi kümelerinin optik dalga boylarındaki gözlemleri, bu sistemlerin yıldız içeren bileşenlerini ve galaksi popülasyonlarını doğrudan incelemeyi mümkün kılar. Optik bantta gözlenen temel bileşen, küme potansiyeline hapsolmuş olan üye galaksilerdir; buna ek

olarak galaksiler arası ortama dağılmış yıldız popülasyonlarının oluşturduğu düşük yüzey parlaklıklı küme içi ışık (ing. Intracluster Light, ICL) ve merkezi en parlak galaksi (ing. Brightest Cluster Galaxy, BCG) de bu dalga boylarında tespit edilebilir. Buna karşın, küme içi ortamı oluşturan sıcak gaz ve karanlık madde, optik dalga boylarında doğrudan gözlenemez; bu bileşenlerin varlığı ve etkileri ancak galaksi dağılımı ve dinamikleri üzerinden dolaylı olarak ortaya koyulur (Schneider, 2015).

Optik gözlemler, galaksi kümelerinin tanımlanması ve kataloglanmasında tarihsel olarak temel bir rol oynamıştır. Kümeler, gökyüzünde galaksilerin istatistiksel olarak anlamlı bir yoğunluk gösterdiği bölgeler olarak belirlenir ve bu tanımlama çoğunlukla belirli bir parlaklık sınırının üzerindeki galaksilerin uzaysal yoğunluğu temel alınarak yapılır. Klasik çalışmalarda kümeler, iki boyutlu gökyüzü projeksiyonunda galaksi aşırı yoğunlukları üzerinden seçilmiş; bu yaklaşım Abell katalogları gibi erken dönem küme kataloglarının temelini oluşturmuştur. Modern optik taramalarda ise çok bantlı fotometri kullanılarak galaksilerin renk ve parlaklık dağılımları incelenmekte, böylece gerçek kümeler ile tesadüfi projeksiyon etkileri daha güvenilir biçimde ayırt edilebilmektedir.

Optik dalga boylarında galaksi kümelerini belirlemenin en güçlü araçlarından biri, renk–parlaklık uzayında ortaya çıkan ve kırmızı kol olarak adlandırılan yapıdır. Kümelerde baskın olan erken tip galaksiler, benzer yaş ve metal bolluğuna sahip yaşlı yıldız popülasyonları içerdiğinden, renk–parlaklık diyagramında dar ve iyi tanımlanmış bir doğru boyunca dizilir. Bu özellik, hem küme üyeliğinin belirlenmesinde hem de kümelerin kırmızıya kaymalarının fotometrik olarak tahmin edilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Kırmızı kol tabanlı yöntemler, özellikle geniş alanlı optik taramalarda kümelerin etkin ve homojen biçimde seçilmesini sağlamıştır (Gladders ve Yee, 2000; Koester ve diğ., 2007; Rykoff ve diğ., 2014).

Optik gözlemler, galaksi kümelerinin galaksi içeriğini ve zenginliğini karakterize etmede temel bir rol oynar. Küme zenginliği, belirli bir parlaklık eşiğinin üzerindeki üye galaksi sayısıyla tanımlanır ve istatistiksel olarak küme kütlesiyle ilişkilidir. Bu nedenle zenginlik, özellikle doğrudan kütle ölçümünün mümkün olmadığı durumlarda, küme kütlesi için bir gözlemsel vekil olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, zenginlik ölçümleri projeksiyon etkilerine ve üye seçimine duyarlı olduğundan, dikkatli bir arka plan düzeltmesi ve renk tabanlı üye ayrımı gerektirir (Rozo ve diğ., 2009; Rykoff ve diğ., 2012).

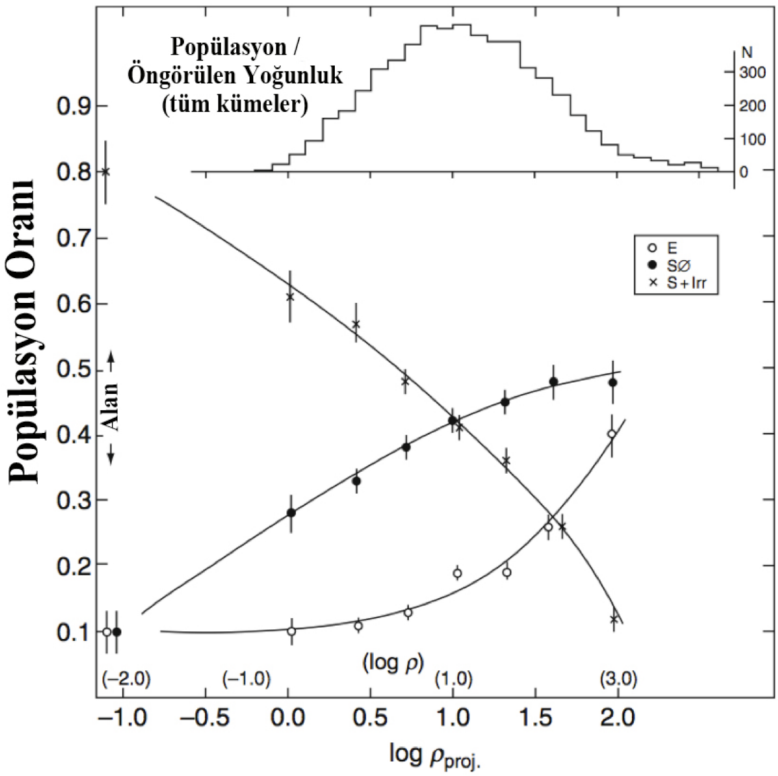
Optik dalga boyları, küme ortamının galaksi evrimi üzerindeki etkilerini incelemek açısından da kritik bilgiler sunar. Kümelerin merkezlerinde erken tip, düşük yıldız oluşum oranına sahip kırmızı galaksiler baskınken, kümenin dış bölgelerinde ve alt yapılarda geç tip, yıldız oluşturan mavi galaksilerin oranı artar. Bu mekansal ayrım, galaksi türü ile çevresel yoğunluk arasındaki güçlü ilişkiyi ortaya koyan morfoloji–yoğunluk ilişkisinin gözlemsel temelini oluşturur. Optik morfoloji ve renk dağılımları, çarpışma basıncıyla gaz sıyırma, gelgitsel etkileşimler ve galaksi birleşmeleri gibi çevresel süreçlerin galaksilerin gaz içeriğini ve yıldız oluşum süreçlerini anlamada doğrudan kanıtlar sunar (Baldry ve diğ., 2004; Dressler, 1980; Poggianti, 2004; Thomas ve Katgert, 2006).

Optik gözlemler aynı zamanda küme dinamikleri hakkında dolaylı bilgi sağlar. Üye galaksilerin tayfsal gözlemlerinden elde edilen kırmızıya kaymalar ve hız dağılımları, kümenin hız saçılımını ve dolayısıyla viryal teoremi aracılığıyla toplam kütlesini tahmin etmeye olanak tanır. Bu yöntem, özellikle dinamik olarak rahatlamış kümelerde etkili olmakla birlikte, birleşme halindeki sistemlerde hız alanındaki karmaşıklıklar nedeniyle belirsizlikler içerebilir. Bununla birlikte optik tayfsal veriler, küme alt yapılarının, küme içine düşen galaksi gruplarının ve birleşme izlerinin tespit edilmesinde vazgeçilmezdir (Carlberg ve diğ., 1997; Evrard ve diğ., 2008).

Sonuç olarak optik dalga boylarında yapılan gözlemler, galaksi kümelerinin yıldız içeren bileşenlerini, galaksi popülasyonlarını ve çevresel etkilerini ayrıntılı biçimde ortaya koyar. Kümelerin tanımlanması, zenginliklerinin belirlenmesi, galaksi türlerinin mekansal dağılımı ve dinamik özellikleri büyük ölçüde optik veriler üzerinden karakterize edilir. Bu nedenle optik astronomi, X-ışını ve kütle çekimsel merceklenme gözlemleriyle birlikte ele alındığında, galaksi kümelerinin çok bileşenli yapısını ve evrimsel geçmişini anlamada tamamlayıcı ve temel bir rol üstlenmektedir.

2.1.2.1. Morfoloji-Yoğunluk İlişkisi

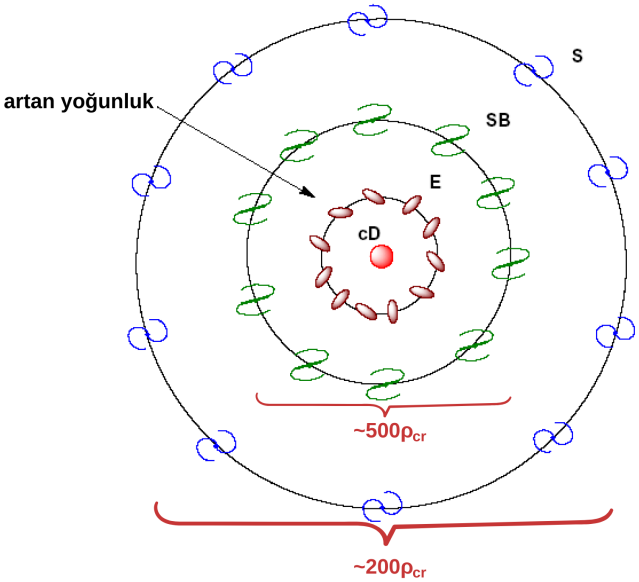
Galaksilerin morfolojik özellikleri ile bulundukları çevrenin yerel yoğunluğu arasında güçlü ve sistematik bir ilişki bulunduğu, ilk kez Dressler (1980) tarafından yapılan kapsamlı gözlemsel çalışmalarla ortaya konmuştur. Dressler, galaksi kümelerinde yer alan galaksilerin morfolojik türlerinin, içinde bulundukları ortamın yoğunluğuna bağlı olarak anlamlı biçimde değiştiğini göstermiş ve bu temel gözlemsel bağıntı literatürde morfoloji-yoğunluk ilişkisi olarak adlandırılmıştır. Bu ilişkiye göre, yüksek yoğunluklu çevrelerde, özellikle galaksi



Şekil 2.3 Galaksilere ait morfoloji yoğunluk ilişkisi (Dressler, 1980).

kümelerinin merkez bölgelerinde, erken tip galaksiler (eliptik ve S0) baskın popülasyonu oluştururken, düşük yoğunluklu bölgelerde ve alan ortamlarında geç tip galaksilerin (spiral ve düzensiz) oranı belirgin biçimde artmaktadır (**Şekil 2.3**). Küme merkezlerinden dış bölgelere doğru gidildikçe spiral galaksi oranında kademeli bir artış gözlenmesine rağmen, bu oran alan galaksileriyle karşılaştırıldığında genel olarak daha düşüktür (Bahcall, 1999). Bu durum, galaksi evriminde çevresel koşulların belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

Kümelerin galaktik içeriği, yerel yoğunluğa bağlı olarak sistematik biçimde değişmektedir. Tipik bir galaksi kümesinde, kümenin merkezi bölgeleri erken tip galaksiler tarafından baskınken, kümenin dış kısımlarına doğru gidildikçe geç tip galaksilerin oranı artmaktadır. Bu durumun şematik bir gösterimi **Şekil 2.4**'te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, kümenin en yoğun ve merkezi bölgelerinde eliptik ve merkezi baskın (cD) galaksiler yoğunlaşırken, orta yoğunluklu bölgelerde S0 ve çubuklu spiral galaksiler daha yaygın olarak görülmektedir. Kümenin dış bölgelerinde ve düşük yoğunluklu çevrelerde ise spiral galaksiler baskın popülasyonu oluşturmaktadır (Fasano ve diğ., 2015; Goto ve diğ., 2003; Postman ve diğ., 2005).



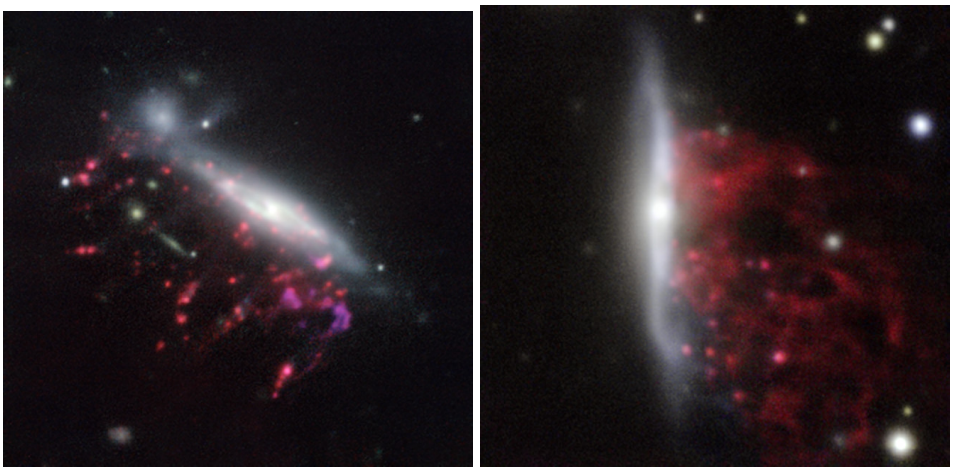
Şekil 2.4 Tipik bir galaksi kümesinde yerel yoğunluğa bağlı galaktik içeriğin şematik gösterimi (Capozziello ve Lattanzi, 2006).

Tablo 2.2 Farklı küme türlerinde galaksi morfolojilerinin yüzdesel dağılımı (Bahcall, 1999).

Küme Türü	**E**	**S0**	**Sp**	**(E+S0)/Sp**
Düzenli kümeler (cD)	35	45	20	4.0
Ara düzensiz kümeler (spiralce fakir)	20	50	30	2.3
Düzensiz kümeler (spiralce zengin)	15	35	50	1.0
Alan	10	20	70	0.5

Galaksi kümelerinin galaktik içeriklerine ilişkin nicel dağılımlar **Tablo 2.2**'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, zengin ve düzenli kümelerde erken tip galaksilerin (E ve S0) ana popülasyonu oluşturduğu, buna karşılık fakir veya düzensiz kümelerde ve küme dışı alan bölgelerinde geç tip galaksilerin baskın hale geldiği görülmektedir. Erken tip galaksilerin spiral galaksilere oranı ((E+S0)/Sp), kümenin düzenliliği ve çevresel yoğunluk azaldıkça belirgin biçimde düşmektedir (Bahcall, 1999). Bu bulgular, morfoloji-yoğunluk ilişkisinin küme türüne ve yerel çevresel koşullara güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermektedir.

Morfoloji–yoğunluk ilişkisi yalnızca galaksilerin şekilsel özellikleriyle sınırlı olmayıp, aynı zamanda fiziksel ve yıldız oluşum özellikleriyle de yakından bağlantılıdır. Yoğun çevrelerde bulunan galaksiler genellikle daha kırmızı renklere, düşük yıldız oluşum hızlarına ve sınırlı soğuk gaz içeriklerine sahipken; düşük yoğunluklu bölgelerde yer alan galaksiler çoğunlukla mavi renkli, gaz bakımından zengin ve aktif yıldız oluşumu gösteren sistemlerdir (Dressler, 1980; Kauffmann ve diğ., 2004). Bu gözlemsel bulgular, galaksi özelliklerinin zaman



Şekil 2.5 ESO VLT'ye takılı olan MUSE integral alan spektrografı ile yürütülen GASP projesinde gözlenen carpışma basıncı etkileri (Poggianti ve diğ., 2017b). ©ESO

içerisinde çevresel etkileşimler yoluyla önemli ölçüde değişebildiğini göstermektedir.

Yoğun ortamlarda etkili olan çeşitli fiziksel mekanizmalar, morfoloji-yoğunluk ilişkisinin ortaya çıkışını açıklamak amacıyla öne sürülmektedir. Bu mekanizmaların ortak etkisi, galaksilerin gaz içeriklerini azaltarak yıldız oluşumunu baskılamaları ve uzun vadede morfolojik dönüşümlere yol açmalarıdır. Bu süreçlerden en önemlisi çarpışma basıncıyla gaz sıyırma (ing. ram pressure stripping) mekanizmasıdır. Gunn ve Gott (1972) tarafından tanımlanan bu etkiye göre, gaz bakımından zengin bir spiral galaksi küme merkezine doğru yüksek hızlarla hareket ettiğinde, sıcak ve yoğun küme içi ortam tarafından uygulanan dinamik basınç nedeniyle diskindeki soğuk gazın önemli bir kısmını kaybetmektedir (**Şekil 2.5**). Bu gaz kaybı, yıldız oluşumu için gerekli ham maddenin ortadan kalkmasına neden olmakta ve galaksinin zamanla daha pasif, kırmızı ve erken tip morfolojiye sahip bir sisteme evrilmesine zemin hazırlamaktadır. Çarpışma basıncıyla gaz sıyırma özellikle küme merkezlerinde etkili olup, spiral galaksilerin S0 tipine dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır (Poggianti ve diğ., 2017a,b).

Bir diğer önemli çevresel etkileşme gelgit etkileridir. Galaksiler, kümenin toplam kütle çekim potansiyeli ve komşu galaksilerle olan etkileşimleri sonucunda dış bölgelerindeki yıldız ve gaz bileşenlerini kaybedebilmektedir. Bu süreç, galaksilerin disk yapılarında bozulmalara, asimetrilere ve kütle kaybına yol açarak morfolojik dönüşümleri hızlandırmaktadır. Özellikle düşük kütleli galaksiler, gelgit kuvvetlerine karşı daha savunmasız olduklarından, bu etkilerden daha güçlü bir şekilde etkilenmektedir (Dressler ve diğ., 1997; Read ve diğ., 2006).

Galaksi tacizi (ing. galaxy harassment), yoğun küme ortamlarında galaksilerin çok sayıda hızlı ve yakın karşılaşma yaşaması sonucunda ortaya çıkan kümülatif bir etkileşim sürecidir. Tekil karşılaşmalar genellikle yıkıcı olmamakla birlikte, zaman içerisinde tekrar eden bu hızlı etkileşimler galaksinin dinamik yapısını bozarak disk kalınlaşmasına, gaz kaybına ve yıldız oluşumunun baskılanmasına neden olmaktadır (Conselice ve diğ., 2001, 2002; Moore ve diğ., 1996).

Galaksi birleşmeleri, galaksi evriminde özellikle gruplarda ve küme eteklerinde önemli bir rol oynamaktadır (De Lucia ve Blaizot, 2007; Dubinski, 1998; Zabludoff ve Mulchaey, 1998). İki veya daha fazla spiral galaksinin birleşmesi sonucunda, sistemin açısal momentumu yeniden dağıtılmakta ve disk yapıları büyük ölçüde yok olmaktadır. Bu süreç, eliptik galaksilerin oluşumunu açıklayan temel senaryolardan biri olarak kabul edilmektedir (Toomre ve Toomre, 1972). Ancak, galaksi kümelerinin merkezlerinde galaksilerin bağıl hızlarının yüksek olması, birleşmelerin bu bölgelerde daha nadir gerçekleşmesine neden olmaktadır (Binney ve Tremaine, 1987; Pearson ve diğ., 2024).

Her ne kadar bu çevresel mekanizmaların her biri galaksi evriminde önemli roller üstlense de, hiçbiri morfoloji-yoğunluk ilişkisini tek başına ve tüm ayrıntılarıyla açıklamakta yeterli değildir (Postman ve diğ., 2005). Galaksi evrimi, yalnızca çevresel ortamın neden olduğu gaz tükenmesine değil; aynı zamanda galaksilerin kütle çekimsel etkileşimler sonucunda şekillenen içsel dinamiklerine, kütlelerine ve morfolojik geçmişlerine de güçlü bir şekilde bağlıdır (Boselli ve Gavazzi, 2006). Dolayısıyla, morfoloji-yoğunluk ilişkisi çevresel ve içsel süreçlerin birlikte işlediği çok boyutlu bir evrimsel çerçevenin sonucu olarak değerlendirilmektedir. Bu ilişkinin farklı kırmızıya kayma değerlerinde ayrıntılı biçimde incelenmesi (Dressler ve diğ., 1997; Goto ve diğ., 2003), galaksilerin küme ortamlarında geçirdiği evrimsel süreçlerin zaman içindeki değişimini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır.

2.1.3. Sert X-Işınlarında Galaksi Kümeleri

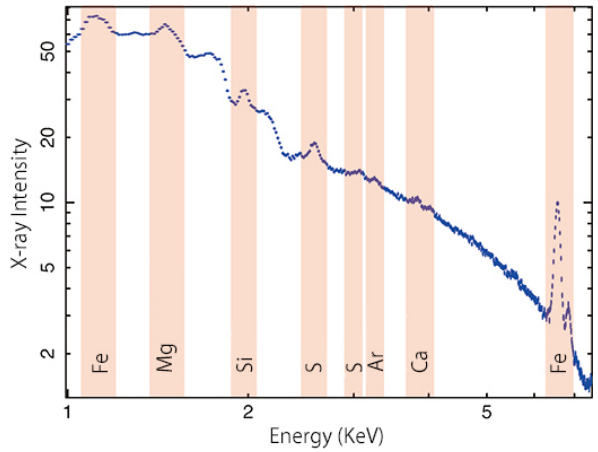
Galaksi kümelerinin X-ışını gözlemleri, bu sistemlerin baryonik içeriğini ve kütle çekimsel potansiyelini doğrudan incelemenin en etkili yollarından biridir. X-ışını bandında gözlenen temel bileşen, kümelerdeki galaksilerden ziyade, kümenin derin potansiyeline hapsolmuş olan küme içi ortamdır. Optik gözlemler galaksilerin uzaysal dağılımını ortaya koyarken,

X-ışını gözlemleri sıcak gaz bileşenini haritalayarak kümenin toplam kütle dağılımı ve dinamik durumu hakkında doğrudan bilgi sağlar (Sarazin, 1986). Bu nedenle X-ışını emisyonu, kümenin kütlesi ve evrimsel durumu ile güçlü biçimde ilişkilidir. Bu emisyonla tespit edilen galaksi kümeleri, uzaysal olarak geniş alanlara yayılan yaygın kaynaklar olarak karşımıza çıkar ve bu özellikleri sayesinde projeksiyon etkilerinden büyük ölçüde bağımsız şekilde kataloglanabilirler.

X-ışını gözlemleri, küme içi ortamın dağılımını ve termodinamik özelliklerini izlemek açısından özellikle kümenin iç bölgelerinde yüksek duyarlılık sağlar. Bunun temel nedeni, X-ışını yüzey parlaklığının elektron yoğunluğunun karesiyle güçlü biçimde ölçeklenmesidir (Sarazin, 1986). Küme içi gaz yoğunluğu merkezden dışa doğru hızla azaldığından, X-ışını emisyonu genellikle küme merkezlerinde tepe yapar ve yarıçap arttıkça belirgin biçimde zayıflar; buna bağlı olarak sinyal/gürültü oranı da yarıçapla birlikte düşer ve gözlemsel olarak güvenilir profiller çoğu çalışmada iç bölgelerde elde edilir. X-ışını çalışmalarında karakteristik bir ölçek olarak sıklıkla R_{500} yarıçapı kullanılmaktadır; R_{500}, ortalama yoğunluğun evrenin kritik yoğunluğunun 500 katına ulaştığı yarıçapı tanımlanır ve tipik küme profilleri için yaklaşık olarak $R_{500} \simeq 0.65$–$0.7R_{200}$ ilişkisine karşılık gelir (Arnaud ve diğ., 2010; Vikhlinin ve diğ., 2006). Buna karşılık R_{200} sınırına yakın bölgelerde düşük yüzey parlaklığı ve arka plan sistematikleri nedeniyle X-ışını gözlemleri daha belirsiz hale gelmekte ve bu bölgelerin hassas ölçümü güçleşmektedir. Bununla birlikte, yeterince derin ve geniş alanlı gözlemler sayesinde kümenin dış bölgeleri, özellikle küme içine düşen gazın ani yavaşlayıp ısınmasıyla ilişkili yığılma şokları ve viryal geçiş bölgeleri de incelenebilmektedir (Cavaliere ve Fusco-Femiano, 1976; Eckert ve diğ., 2012).

Galaksi kümelerinde X-ışınlarında ışımanın baskın mekanizması, yüksek sıcaklıktaki iyonize gazda gerçekleşen termal bremsstrahlung (serbest-serbest ışıma) sürecidir. $10^7 - 10^8$ K sıcaklıktaki küme içi ortamda elektronların iyonlarla saçılması sonucu sürekli bir X-ışını tayfı üretilir. Bu sürekli tayfın üzerine, başta demir (Fe) olmak üzere, silikon (Si) ve sülfür (S) gibi ağır elementlerin yüksek derecede iyonlaşmış hallerinden kaynaklanan çizgi ışıması eklenir (**Şekil 2.6**). Bu çizgiler, gazın sıcaklığının ve metal bolluğunun tayin edilmesine olanak tanıyarak küme içi ortamın termodinamik ve kimyasal özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesini mümkün kılar (Arnaud, 2005; Böhringer ve Werner, 2010).

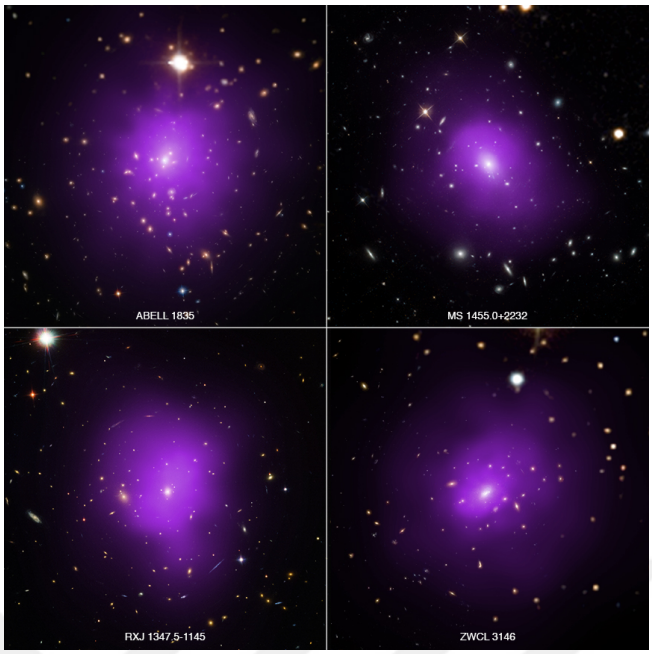
X-ışını yüzey parlaklığı ve sıcaklık dağılımları birlikte değerlendirildiğinde, kümenin kütle



Şekil 2.6 Suzaku uydusu üzerindeki X-ray Imaging Spectrometer (XIS) tarafından elde edilen Perseus Kümesi çekirdek bölgesine ait X-ışını tayfına bir örnek. Önemli elementlere karşılık gelen tayfsal çizgilerin konumları açık kırmızı taralı alanlar ile gösterilmiştir. ©Suzaku/JAXA

profili hidrostatik denge varsayımı altında hesaplanabilir. Gaz basıncı değişiminin kütle çekimsel kuvvetle dengede olduğu kabul edilerek elde edilen bu kütle tahminleri, özellikle dinamik olarak sakin ve simetrik kümelerde güvenilir sonuçlar vermektedir. Buna karşılık, birleşme halindeki kümelerde X-ışını morfolojisi çoğu zaman asimetrik, çok çekirdekli veya şok yapıları içeren karmaşık bir görünüm sergilemektedir. Bu tür yapılarda hidrostatik denge bozulduğundan, X-ışını gözlemleri, daha çok kümenin dinamik evrimini ve birleşme geçmişini ortaya koyan bir araç haline gelir (Schneider, 2015; Vikhlinin ve diğ., 2006).

X-ışını gözlemleri, galaksi kümelerinde soğuk çekirdekli (ing. cool-core) ve soğuk çekirdeksiz (ing. non-cool-core) yapıların ayırt edilmesinde temel bir rol oynar (Hudson ve diğ., 2010). Soğuk çekirdekli kümelerde merkezdeki gaz yoğunluğu yüksektir ve radyatif soğuma süresi evrenin yaşından daha kısadır; bu durum merkezde parlak ve görece düşük sıcaklıklı bir X-ışını çekirdeğinin ortaya çıkmasına neden olur. Buna karşılık, birleşme geçirmiş ya da dinamik olarak bozulmuş kümelerde belirgin bir merkezi soğuk çekirdek yapısı bulunmaz ve sıcaklık dağılımı daha düzensizdir. Bu ayrım, kümenin dinamik geçmişi ile enerji geri besleme süreçlerine ilişkin önemli bilgiler sunmaktadır. Bu gözlemsel çerçeve, başta Chandra X-ışın Gözlemevi ve XMM-Newton olmak üzere modern X-ışını teleskopları tarafından şekillendirilmiştir (Böhringer ve diğ., 2007; Cavagnolo ve diğ., 2009; Santos ve diğ., 2010). Chandra'nın yüksek açısal çözünürlüğü, küme çekirdeklerindeki ince yapıları, şok cephelerini ve soğuk sınırları ayrıntılı biçimde ortaya koyarken (**Şekil 2.7**); XMM-Newton'un geniş etkin alanı, sıcaklık ve metal bolluğu haritalarının yüksek tayfsal



Şekil 2.7 Dört panelden oluşan bu bileşik görüntüde, Abell 1835, MS 1455.0+2232, RXJ 1347.5–1145 ve ZWCL 3146 galaksi kümeleri, Chandra X-ışını (mor) verilerinin Hubble ve SDSS optik gözlemleriyle birleştirilmesiyle gösterilmekte olup, karanlık enerji çalışmalarında kullanılan geniş bir küme örnekleminin parçasını temsil etmektedir (Morandi ve Sun, 2016).

hassasiyetle çıkarılmasına olanak sağlamıştır. Bu gözlemler, özellikle çarpışan sistemlerde X-ışını bandında izlenen sıcak gaz ve kütle çekimsel merceklenme ile belirlenen toplam kütle dağılımı arasındaki mekansal ayrışmayı ortaya koymuş, karanlık maddenin çarpışmasız doğasına ilişkin güçlü kanıtlar sunmuştur (Clowe ve diğ., 2006).

X-ışınlarında küme çalışmaları, 1970 yılında fırlatılan ilk X-ışını uydusu Uhuru'nun en önemli keşiflerinden biri olan kütleli galaksi kümelerinin güçlü X-ışını emisyonunun tespit edilmesiyle yeni bir boyut kazanmıştır (Forman ve diğ., 1978; Gursky ve diğ., 1971). Daha sonra Einstein Gözlemevi, ilk görüntüleme X-ışını teleskobu olarak küme içi ortamın yapısının ilk kez ayrıntılı biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır(Gioia ve diğ., 1990). Bu çalışmalar, ROSAT Tüm Gökyüzü Taraması (RASS) ile geniş alanlı ve homojen küme kataloglarının üretilmesiyle daha da geliştirilmiş; REFLEX (Böhringer ve diğ., 2004) ve NORAS (Böhringer ve diğ., 2000) örnekleri X-ışını seçilmiş galaksi kümelerinin kozmolojik çalışmalar için güçlü bir temel oluşturmasını sağlamıştır. Daha derin ve geniş alanlı taramalar sunan XMM-Newton, XMM-LSS (Pierre ve diğ., 2007) ve XXL (Pierre ve diğ., 2016) projeleriyle orta ve yüksek kırmızıya kaymada homojen küme katalogları oluşturmuştur. Güncel olarak eROSITA ile yürütülen eROSITA Tüm Gökyüzü Taraması

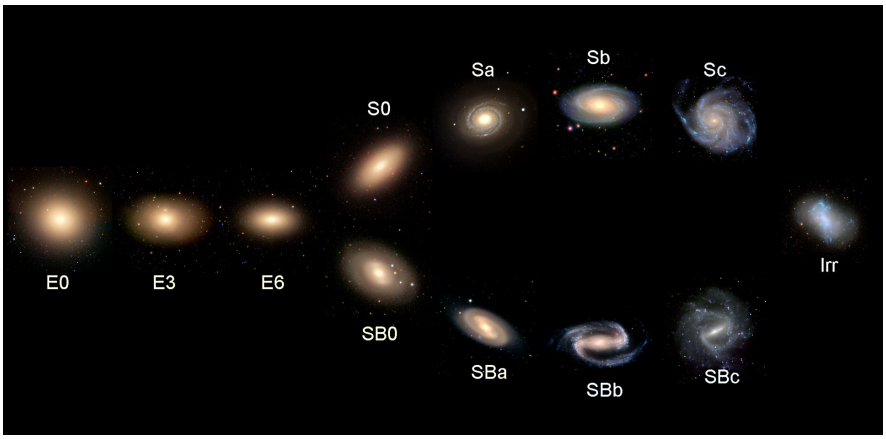
(eRASS), on binlerce galaksi kümesini içeren en geniş X-ışını seçilmiş örneği sağlayarak kozmolojik parametrelerin hassas ölçümüne ve çevresel galaksi evrimi çalışmalarına güçlü bir istatistiksel temel sunmaktadır (Bulbul ve diğ., 2024; Merloni ve diğ., 2020).

Sonuç olarak, X-ışını gözlemleri galaksi kümelerinin termodinamik yapısını, kütle dağılımını ve dinamik evrimini bütüncül biçimde ortaya koyarak bu sistemlerin kozmolojik ve astrofiziksel analizlerinde vazgeçilmez bir araç olmaya devam etmektedir (Borgani ve Kravtsov, 2011; Sarazin, 1986).

2.2. GALAKSİ TÜRLERİ VE POPÜLASYONLARI

Galaksiler; kütle çekimi etkisiyle bir arada tutulan yıldızlar, gaz, toz ve karanlık maddeden oluşan devasa sistemlerdir. Bu sistemlerin morfolojik ve fiziksel özelliklerine göre sistematik biçimde sınıflandırılması, galaksi popülasyonlarının evrimsel süreçlerini anlamada temel bir rol oynamaktadır. Galaksi sınıflandırmasına yönelik tarihsel olarak en yaygın kabul gören ve güncel çalışmalarda referans alınan yaklaşım, Edwin Hubble tarafından 1926 yılında önerilen morfolojik sınıflandırmadır (Hubble, 1926). Hubble'ın geliştirdiği bu sınıflandırma, galaksilerin gözlenen yapısal özelliklerine dayanan ilk kapsamlı ve sistematik çerçeveyi sunmaktadır. Bu sınıflandırma kapsamında galaksiler, morfolojileri esas alınarak üç temel gruba ayrılmıştır. Başlangıçta eliptik (E), spiral (S) ve düzensiz (Irr) galaksiler ana sınıfları oluştururken, daha sonraki çalışmalarda disk yapısına sahip olup belirgin spiral kollardan yoksun olan merceksi (S0) galaksiler de ayrı bir morfolojik sınıf olarak tanımlanmıştır (Hubble, 1936; Kormendy ve Bender, 1996).

Hubble sınıflandırması, galaksilerin morfolojik özelliklerini belirli bir düzen içerisinde görselleştirmekte olup, literatürde yaygın olarak Hubble çatal diyagramı ile temsil edilmektedir (**Şekil 2.8**). Bu diyagramda galaksiler, düzenli yapılardan daha düzensiz yapılara doğru kademeli bir biçimde sıralanmaktadır. Eliptik galaksiler bu diyagramın bir ucunda yer almakta olup, düzgün ve simetrik ışık profilleriyle ayırt edilmektedir; bu galaksilerde spiral kollar veya belirgin bir disk bileşeni bulunmamaktadır. Merceksi galaksiler ise disk yapısı içermelerine rağmen spiral kol özellikleri göstermemeleri nedeniyle eliptik ve spiral galaksiler arasında geçiş niteliği taşımaktadır. Spiral galaksiler, belirgin diskleri, kolları ve çubuk yapılarıyla daha karmaşık bir morfoloji sergilerken, düzensiz galaksiler belirli bir simetri ya da düzenli yapısal özellik göstermeyen sistemler olarak



Şekil 2.8 Hubble çatal diyagramı. Eliptik (E), merceksi (S0,SB0), çubuklu (SB) ve çubuksuz (S) spiral ile düzensiz (Irr) galaksiler gösterilmektedir. © Zooniverse, ESO.

tanımlanmaktadır (Sparke ve Gallagher, 2007).

Hubble, morfolojik dizilimi önerdiğinde, galaksilerin eliptik formdan başlayarak zamanla spiral formlara dönüştüğü yönünde bir evrimsel sıra izlediğini varsaymıştır. Günümüzde bu yaklaşımın, galaksilerin doğrudan evrimsel yollarını betimlemekten ziyade, gözlemsel olarak belirlenen morfolojik farklılıkları sınıflandırmaya yönelik bir çerçeve sunduğu genel olarak kabul görmektedir. Bununla birlikte, morfolojik sınıfların galaksilerin yıldız oluşum etkinliği, gaz içerikleri ve baskın yıldız popülasyonlarının yaşları gibi temel fiziksel özelliklerle güçlü ilişkiler sergilediği gösterilmiştir (Schneider, 2015).

Hubble sınıflandırmasında galaksiler, gözlenen morfolojik özelliklerine göre belirli bir düzen içerisinde sıralanmıştır. Hubble, eliptik galaksilerin zamanla spiral galaksilere evrildiğini öne sürmüş ve bu varsayıma dayanarak eliptik galaksileri “erken tip”, spiral galaksileri ise “geç tip” galaksiler olarak tanımlamıştır (Hubble, 1936). Ancak günümüzde bu terminolojinin, galaksilerin evrimsel yaşlarına ilişkin bir zaman sıralamasını değil; yalnızca galaksilerin yapısal, morfolojik ve fiziksel özelliklerine dayalı bir sınıflandırmayı ifade ettiği kabul edilmektedir.

Erken–geç tip ayrımı, başlangıçta galaksilerin görsel morfolojilerine dayansa da, daha sonraki gözlemsel ve kuramsal çalışmalar bu sınıflandırmanın çok daha geniş bir fiziksel temele sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda ayrım; galaksilerin gaz içerikleri, yıldız oluşum etkinlikleri, baskın yıldız popülasyonlarının yaşları ve bulundukları çevresel koşullar ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, eliptik ve merceksi galaksiler, düzenli ve kol içermeyen yapıları nedeniyle erken tip grubunda değerlendirilirken; disk ve spiral kol

yapıları sergileyen spiral ve düzensiz galaksiler geç tip sınıfına dahil edilmektedir (van den Bergh, 1998). Dolayısıyla, erken tip ve geç tip galaksi ayrımı yalnızca morfolojik bir düzen sunmakla sınırlı olmayıp, galaksi evrimini anlamaya yönelik fiziksel ve gözlemsel bir çerçeve sağlamaktadır. Bu çerçeve doğrultusunda, sonraki bölümlerde erken tip ve geç tip galaksiler; morfolojik özellikleri ve fiziksel yapıları ve evrimsel süreçleri açısından ayrı başlıklar altında ele alınacaktır.

2.2.1. Erken Tip Galaksiler

Erken tip galaksiler, Hubble çatal diyagramının sol kolunda yer alan ve genellikle düzenli ve simetrik bir yapı sergileyen sistemlerdir. Bu galaksilerin temel fiziksel özelliği, soğuk gaz rezervlerinin oldukça sınırlı olması ve buna bağlı olarak yıldız oluşum etkinliğinin durma noktasına gelmiş olmasıdır (Serra ve diğ., 2012; Yıldız ve diğ., 2017). Bu sistemler, baskın olarak yaşlı ve düşük kütleli yıldız popülasyonlarından oluştuğundan, fotometrik olarak kırmızı renklerde gözlenirler (Mo ve diğ., 2010).

Erken tip galaksilerin uzaysal dağılımı incelendiğinde, bu sistemlerin özellikle galaksi grupları ve galaksi kümeleri gibi yoğun çevrelerde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, galaksi evriminde çevresel süreçlerin belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır. Dressler (1980) tarafından tanımlanan morfoloji–yoğunluk ilişkisi, erken tip galaksilerin yüksek yoğunluklu bölgelerde baskın hale geldiğini ve galaksi morfolojisinin çevresel koşullarla güçlü bir şekilde bağlantılı olduğunu ortaya koymuştur.

2.2.1.1. Eliptik Galaksiler

Eliptik galaksiler, belirgin bir disk, spiral kol ya da çubuk yapısı içermeyen; düzgün ve simetrik bir ışık dağılımına sahip sistemler olarak tanımlanmaktadır (**Şekil 2.9**). Bu galaksiler, büyük ölçüde yaşlı yıldız popülasyonlarından oluşmaları ve güncel yıldız oluşumunun ihmal edilebilir düzeyde olması nedeniyle genellikle kırmızı renkte gözlenmektedir. Bu galaksilerde yıldızların hareketleri, düzenli bir dönmeden ziyade anizotropik hız dispersiyonlarıyla karakterize edilir. Özellikle parlak eliptik galaksilerde gözlenen basıklığın, dönmeden çok bu anizotropik kinematik yapıdan kaynaklandığı bilinmektedir (Bender, 1987). Bu nedenle eliptik galaksiler, dinamik açıdan dönme yerine hız dispersiyonu tarafından desteklenen sistemler olarak sınıflandırılmaktadır (Merritt, 1993).

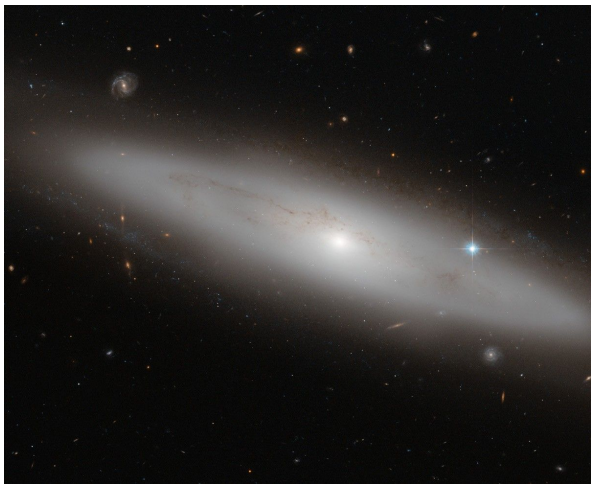


Şekil 2.9 Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen bu görüntüde gösterilen NGC 2865, Dünya'dan yaklaşık 100 milyon ışık yılı uzaklıkta bulunan bir eliptik galaksidir. © ESA/Hubble & NASA

Eliptik galaksilerin şekilleri, gözlenen eksen oranları kullanılarak nicel olarak tanımlanmaktadır. Bu amaçla kullanılan basıklık (eliptiklik) parametresi, $e = 1 - b/a$ şeklinde ifade edilir. Burada a ve b sırasıyla galaksinin yarı büyük ve yarı küçük eksenlerini temsil etmektedir. Eliptik galaksiler bu parametreye bağlı olarak E0–E7 aralığında sınıflandırılmakta olup, E0 sınıfı yaklaşık küresel bir yapıyı, E7 sınıfı ise belirgin biçimde yassı bir morfolojiyi temsil etmektedir. Bununla birlikte eliptik galaksiler yalnızca geometrik özelliklerine göre değil, fiziksel ölçekleri ve ışınım güçleri dikkate alınarak da alt gruplara ayrılmaktadır. Bu bağlamda literatürde normal eliptik (E), cüce eliptik (dE), dev eliptik (cD), cüce sferoid (dSph) ve mavi kompakt cüce (BCD) gibi farklı sınıflamalar kullanılmaktadır. Özellikle cD galaksiler, galaksi kümelerinin merkezlerinde konumlanan ve büyük kütleleriyle dikkat çeken özel bir alt sınıf oluşturmaktadır (Schneider, 2015).

2.2.1.2. Merceksi Galaksiler

Merceksi galaksiler, morfolojik özellikleri bakımından eliptik ve spiral galaksiler arasında ara bir konumda yer almaktadır. Bu galaksiler, disk bileşeni barındırmalarına rağmen spiral kollardan yoksundur ve aynı zamanda belirgin bir merkezi şişkin yapıya sahiptirler (**Şekil 2.10**). Bu özellikleri, merceksi galaksilerin tek bir evrimsel yolun ürünü olmadığını, aksine farklı fiziksel süreçlerin birleşimiyle oluşmuş olabileceklerini düşündürmektedir (Cappellari ve diğ., 2011).



Şekil 2.10 Hubble Uzay Teleskobu tarafından görüntülenen merceksi galaksi NGC 4886, büyük ölçüde yaşlı yıldız popülasyonlarından oluşmakta olup belirgin spiral kollara sahip değildir. ©NASA/ESA/Hubble

Merceksi galaksiler, merkezlerinde çubuk yapısı bulunup bulunmamasına göre S0 ve SB0 olarak sınıflandırılmaktadır (Schneider, 2015). Güncel çalışmalar, bu galaksilerin önemli bir kısmının, çevresel etkileşimler (örneğin carpışma-basıncıyla gaz sıyırma ve gelgit etkileşimleri) sonucu gazını kaybeden spiral galaksilerden evrimleşmiş olabileceğini ileri sürmektedir (Dressler, 1980; Gunn ve Gott, 1972).

2.2.2. Geç Tip Galaksiler

Geç tip galaksiler, aktif yıldız oluşumunu sürdüren, gaz bakımından zengin sistemlerdir ve bu özellikleriyle erken tip galaksilerden belirgin bir biçimde ayrılırlar. Bu galaksilerde yıldız popülasyonu hem genç hem de yaşlı yıldızları içerdiğinden, ışınıma en büyük katkı kısa ömürlü, yüksek kütleli ve mavi yıldızlardan gelmektedir. Bu nedenle, geç tip galaksiler genel olarak mavi renklerde gözlenmektedir (Kennicutt, 1983).

Geç tip galaksiler çoğunlukla düşük yoğunluklu çevrelerde bulunur ve yoğun küme ortamlarında erken tip galaksilere kıyasla daha az rastlanır. Bu durum, geç tip galaksilerin çevresel etkilere karşı daha hassas olduğunu ve evrimlerinin büyük ölçüde içsel süreçler tarafından belirlendiğini göstermektedir (Dressler, 1980).

2.2.2.1. Spiral Galaksiler

Spiral galaksiler; disk, merkezi şişkin bölge ve spiral kollar olmak üzere çok bileşenli bir yapıya sahiptir (**Şekil 2.11**). Spiral kollar, galaksi diskinde gözlenen en belirgin yapılar olup,



Şekil 2.11 Çarkıfelek (Pinwheel) Galaksisi olarak da bilinen spiral galaksi M101'in Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen görüntüsü. ©NASA/ESA/CFHT/NOAO

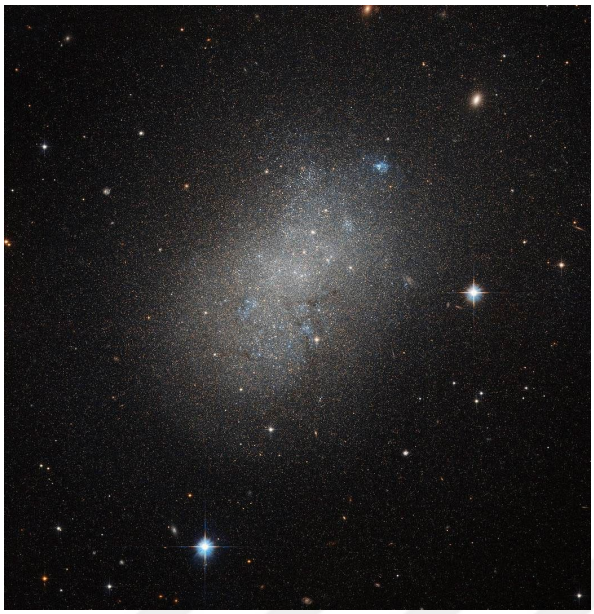
gaz ve yıldız yoğunluğunun arttığı bölgeleri temsil etmektedir. Merkezlerinde çubuk bulunup bulunmamasına göre spiral galaksiler çubuklu (SB) ve çubuksuz (S) olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

Spiral galaksilerin alt sınıfları, spiral kolların sıkılığı ve şişkin bölgenin diske oranı gibi kriterlere dayanmaktadır. Bu kapsamda Sa–Sd sınıfları tanımlanmakta olup, erken tip spiraller daha baskın bir şişkin yapıya sahipken, geç tip spiraller daha belirgin disk özellikleri sergilemektedir (Schneider, 2015).

Spiral kollarda etkili olan yoğunluk dalgaları, disk içerisindeki gazı sıkıştırarak yıldız oluşumunu tetiklemekte ve spiral galaksilerin yüksek yıldız oluşum oranlarını sürdürmesine olanak sağlamaktadır (Elmegreen, 1995).

2.2.2.2. Düzensiz Galaksiler

Düzensiz galaksiler, belirgin bir simetri ya da düzenli morfoloji sergilemeyen sistemlerdir (**Şekil 2.12**). Bu galaksilerin yapılarının, geçmişte yaşanan kütle çekimsel kararsızlıklar, yakın etkileşimler ve birleşmeler sonucunda şekillendiği düşünülmektedir. Yüksek gaz içerikleri sayesinde düzensiz galaksiler, evrende en yoğun yıldız oluşumunun gözlendiği galaksi türleri arasında yer almaktadır (Schneider, 2015).

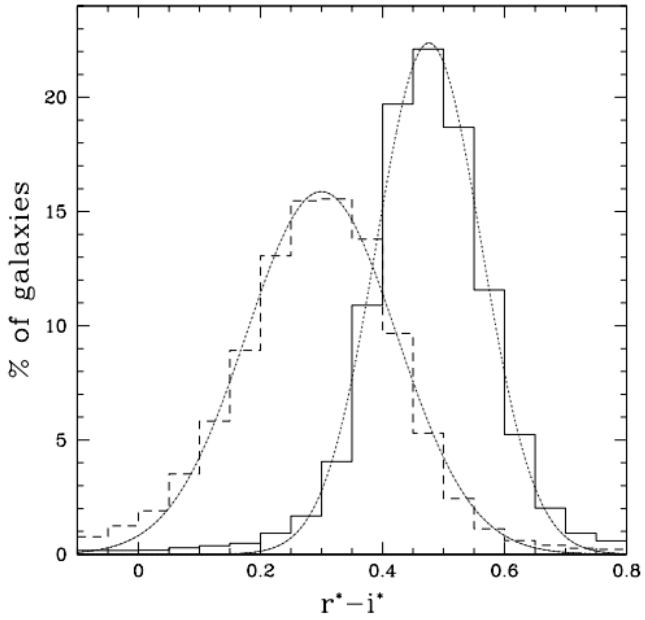


Şekil 2.12 Hubble Uzay Teleskobu tarafından elde edilen bu görüntüde, düzensiz cüce galaksi NGC 5264 gösterilmektedir. © ESA/Hubble & NASA.

2.3. GALAKSİLERİN RENKLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Geniş alanlı gökyüzü taramaları, galaksi popülasyonlarının temel fiziksel özellikler bakımından tekdüze bir dağılım sergilemediğini; aksine belirgin bir iki modlu (ing. bimodal) yapı gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu iki modlu yapının en açık gözlemsel göstergelerinden biri galaksi renk dağılımıdır. Galaksi rengi, yıldız popülasyonlarının yaş dağılımını ve yıldız oluşum etkinliğini yansıtan temel bir parametredir. Renk–parlaklık ve renk–kütle diyagramlarında genç, aktif yıldız oluşumuna sahip ve genellikle geç tip morfoloji gösteren galaksiler mavi bulut olarak adlandırılan bölgede kümelenmektedir. Buna karşılık, yaşlı yıldız popülasyonlarının baskın olduğu, yıldız oluşumunun büyük ölçüde bastırıldığı ve çoğunlukla erken tip morfolojiye sahip sistemler kırmızı kol adı verilen belirgin bir bölgede toplanmaktadır. Bu iki ana popülasyon arasında ise yıldız oluşumunun azalmaya başladığı geçiş aşamasındaki galaksileri temsil eden ve yeşil vadi olarak tanımlanan ara bir bölge bulunmaktadır (Schneider, 2015).

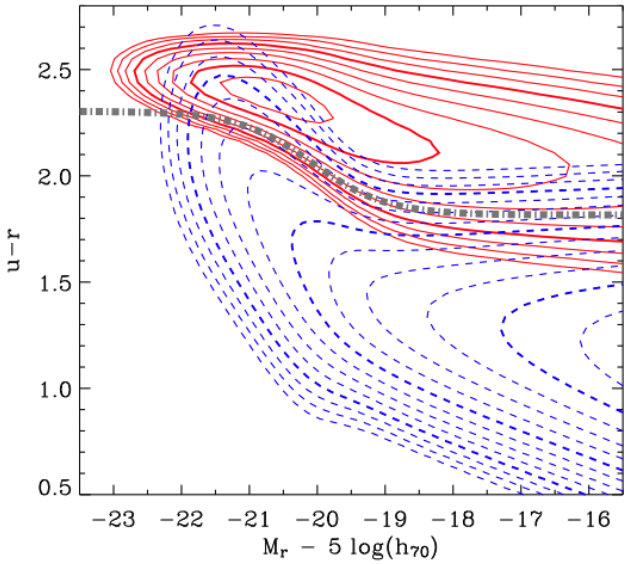
Galaksilerin renk dağılımlarındaki iki modlu yapının ilk güçlü istatistiksel kanıtlardan biri Strateva ve diğ. (2001) tarafından sunulmuştur. SDSS verilerini kullanan bu çalışma, galaksilerin $u - r$ renk dağılımında iki belirgin tepe bulunduğunu (Gauss dağılımı) ve iki tepe arasındaki ayırımın $u - r \simeq 2.22$ civarında olduğunu göstermiştir. Kırmızı dağılımdaki galaksilerin büyük ölçüde erken tip, mavi dağılımdakilerin ise geç tip morfolojiye



Şekil 2.13 SDSS ile gözlenen yaklaşık 148000 galaksinin (g<21) $r-i$ renk dağılımı. (Strateva ve diğ., 2001).

sahip olduğunun gösterilmesi, renk dağılımı ile galaksi morfolojisi arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, **Şekil 2.13**'te gösterilen ve aynı çalışma kapsamında sunulan $r-i$ renk dağılımında da, $u-r$ rengine göre seçilmiş mavi ve kırmızı alt örneklemler için ayrı histogramlar verilmiş ve bu dağılımlar Gauss fonksiyonları ile modellenmiştir. Bu dağılımda düşük renk indeksine sahip sistemler geç tip galaksileri temsil eden mavi popülasyonu, daha yüksek renk indeksine sahip sistemler ise erken tip galaksileri temsil eden kırmızı popülasyonu göstermektedir.

Galaksilerin rengi, içerdiği yıldız popülasyonlarının yaş dağılımı ve yıldız oluşum etkinliği hakkında doğrudan bilgi sunan temel bir parametredir. Kauffmann ve diğ. (2003a) SDSS tayflarını kullanarak $D_n(4000)$ kırılması ve Balmer absorpsiyon çizgileri yardımıyla galaksilerin yıldız oluşum geçmişlerini ve yıldız kütlelerini belirlemiş; bu tayfsal göstergelerin dağılımında belirgin bir iki modlu yapı bulunduğunu ortaya koymuştur. Mavi galaksiler genellikle genç yıldızların göstergesi olan güçlü emisyon çizgileri ve düşük $D_n(4000)$ değerleri ile karakterize edilirken, kırmızı kol galaksilerinde absorpsiyon çizgileri ve yüksek $D_n(4000)$ değerleri baskındır. Bu sonuçlar, galaksi popülasyonlarının genç ve aktif yıldız oluşumuna sahip sistemler ile yaşlı ve yıldız oluşumu bastırılmış sistemler olmak üzere iki temel rejime ayrıldığını göstermektedir. Kauffmann ve diğ. (2003b) ise bu ayrımın yaklaşık $3\times10^{10}M_{\odot}$ civarında bir geçiş kütlesi etrafında gerçekleştiğini ve galaksilerin



Şekil 2.14 Kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarına ait iki değişkenli dağılımlar. Logaritmik konturlar galaksi yoğunluklarını temsil ederken, düz çizgiler kırmızı galaksileri kesikli çizgiler mavi galaksileri göstermektedir. Kalın kesik noktalı siyah çizgi ise bu iki popülasyonu ayıran en uygun sınırı ifade etmektedir (Baldry ve diğ., 2004).

yıldız oluşum özellikleri ile yapısal parametreler bakımından iki farklı mod sergilediğini ortaya koymuştur.

Baldry ve diğ. (2004) tarafından sunulan iki modlu dağılım (**Şekil 2.14**), kırmızı kol ile mavi bulutun renk ve mutlak kadir değerlerine göre belirgin biçimde ayrıldığını göstermektedir. Ayrıca kırmızı ve mavi popülasyonlar için ayrı parlaklık fonksiyonları elde edilmiş ve bu iki popülasyonun dağılımlarının birbirinden farklı olduğu gösterilmiştir. İki dağılım arasındaki bu farklılıkların kırmızı popülasyonun önemli ölçüde büyük birleşmeler sonucunda oluşmuş olabileceği senaryosu ile uyumlu olduğu ortaya konmuştur.

Galaksi renklerinin çevre ile ilişkisi Hogg ve diğ. (2003) ve Balogh ve diğ. (2004) tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar, kırmızı galaksilerin yoğun ortamlarda daha yaygın olduğunu ve kırmızı galaksi sayı yoğunluğunun yerel yoğunluk arttıkça belirgin biçimde yükseldiğini göstermiştir. Ayrıca hem düşük hem de yüksek parlaklıktaki kırmızı galaksilerin yüksek yoğunluklu bölgelerde bulunabildiği ortaya konmuştur. Bu bulgular, kırmızı popülasyonun çevresel koşullara duyarlı bir dağılım sergilediğini göstermektedir.

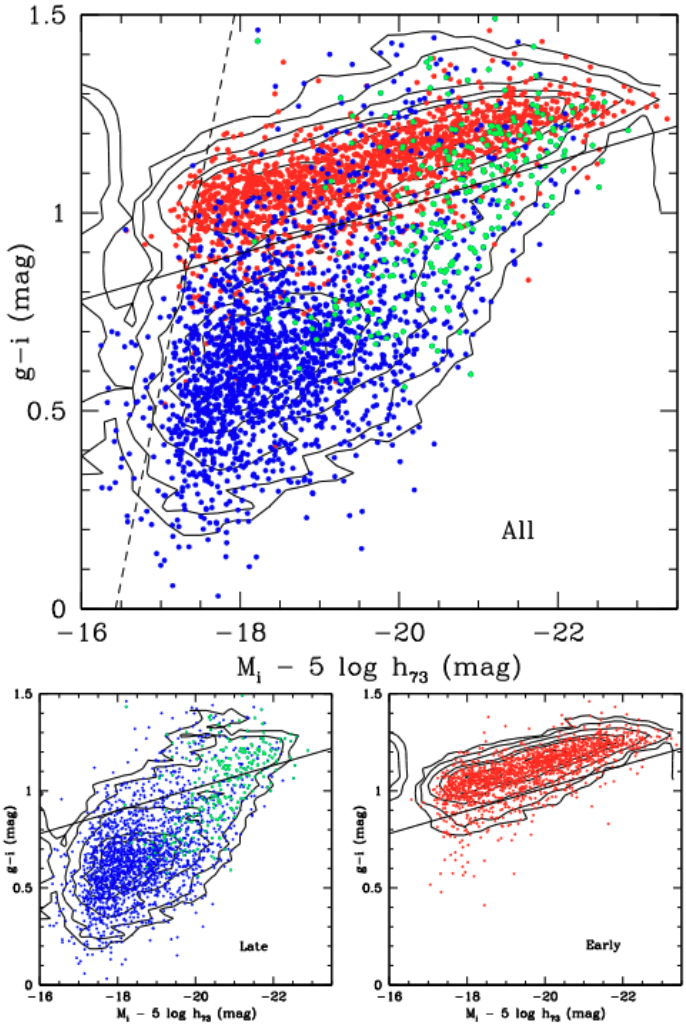
Wyder ve diğ. (2007) çalışmasında GALEX ve SDSS verileri birleştirilerek UV–optik renk dağılımı incelemiştir. UV bantların yıldız oluşumuna daha duyarlı olması nedeniyle, iki

popülasyon arasındaki ayrımın UV renklerde daha keskin olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, iki popülasyon arasında optikte belirlenmiş renklere kıyasla daha fazla sayıda ara popülasyon galaksisi bulunduğu ve yeşil vadi olarak adlandırılan geçiş bölgesinin UV renklerde daha görünür hale geldiği gösterilmiştir.

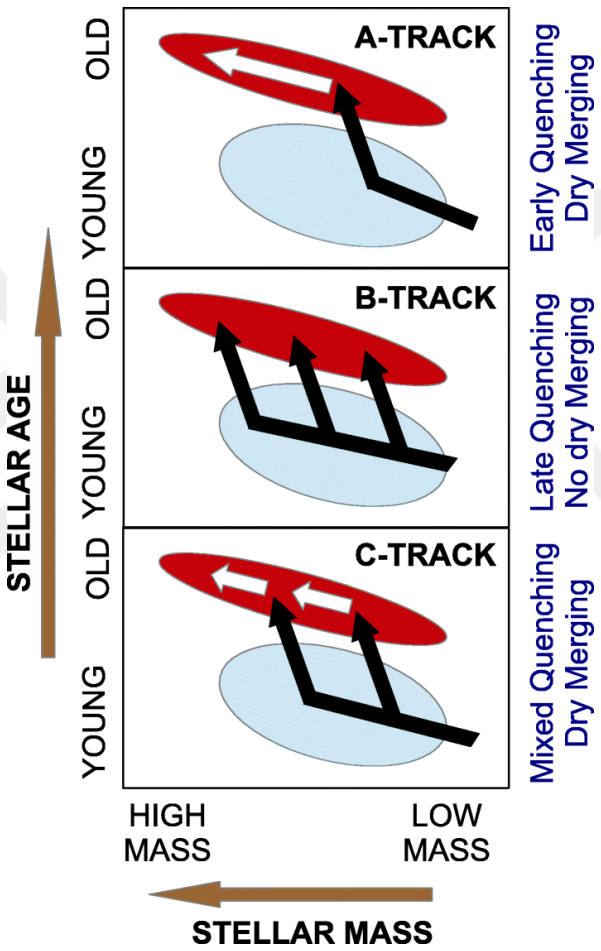
Gavazzi ve diğ. (2010) çalışmasında renk-parlaklık diyagramlarında gözlenen iki modlu yapı, morfolojik sınıflandırmalarla birlikte ele alınmıştır. Çalışmada, Coma Süperkümesi için sunulan ve **Şekil 2.15**'te verilen *i* bandı mutlak parlaklığına bağlı $g-i$ renk diyagramı, erken ve geç tip galaksilerin renk-parlaklık uzayındaki dağılımlarını açık biçimde ayırt etmektedir. Erken tip galaksilerin (dE-E-S0-S0a) büyük ölçüde kırmızı kol üzerinde yoğunlaştığı, geç tip disk hakim galaksilerin (Sbc-Irr-BCD) ise mavi bulut bölgesinde yer aldığı görülmektedir. Sa-Sb morfolojisine sahip, şişkin bölgesi baskın disk galaksilerinin kırmızı kol ile mavi bulut arasında konumlandığı gösterilmiştir. Bu galaksiler, geçiş bölgesi olan yeşil vadide tanımlamakta ve galaksi evriminde önemli bir ara aşamaya işaret etmektedir. Yeşil vadide bulunan galaksilerin yıldız oluşum hızları azalmaya başlamış olmakla birlikte, henüz tamamen pasif hale gelmemiştir. Bu durum, iki modlu yapının keskin bir sınıflandırmadan ziyade evrimsel bir süreklilik içerdiğini göstermektedir.

Kozmik zaman boyunca galaksi popülasyonlarının evrimini inceleyen çalışmalar, $z \sim 1$ döneminden (yaklaşık 8 milyar yıl öncesi) günümüze kadar kırmızı kol galaksilerinin sayı yoğunluğunun ve toplam yıldız kütlesinin belirgin biçimde arttığını göstermektedir (Bell ve diğ., 2004; Faber ve diğ., 2007). Buna karşılık, mavi ve aktif yıldız oluşturan galaksilerin sayı yoğunluğu aynı dönemde görece sınırlı bir değişim sergilemiştir. Bu sonuçlar, kırmızı popülasyondaki artışın önemli ölçüde mavi bulut galaksilerinin yıldız oluşumlarını durdurarak (sönümleme, ing. quenching) kırmızı kola geçmesiyle açıklanabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kırmızı dizide gerçekleşen sınırlı sayıda gaz bakımından fakir birleşmenin de bu kütle birikimine katkı sağladığı düşünülmektedir (**Şekil 2.16**). Bu bulgular, galaksi popülasyonlarında gözlenen iki modlu yapının son 8 milyar yılda işleyen sönümleme mekanizmaları ve birleşmelerle şekillenen evrimsel süreçlerin bir sonucu olduğunu göstermektedir.

Kauffmann ve diğ. (2004) tarafından gösterildiği üzere, galaksilerin yapısal özellikleri (örneğin boyut ve konsantrasyon) temel olarak kütle tarafından belirlenirken, yıldız oluşum etkinliği çevresel koşullara karşı yüksek derecede duyarlılık göstermekte ve yoğun



Şekil 2.15 Coma Süperkümesi için $g-i$ renk–i-bandı mutlak kadir diyagramı. Üst panel tüm galaksi örneklemini, alt paneller ise geç tip (sol) ve erken tip (sağ) galaksileri göstermektedir. Galaksiler morfolojik tiplerine göre kodlanmış olup, kırmızı kol ve mavi bulutun renk-parlaklık uzayındaki ayrımı açık biçimde görülmektedir (Gavazzi ve diğ., 2010).



Şekil 2.16 Galaksilerin mavi buluttan kırmızı kola evriminin şematik gösterimi. Galaksiler kütlelerine ve geçirdikleri etkileşmelere bağlı olarak farklı yollarla kırmızı kola ulaşırlar (Faber ve diğ., 2007).

ortamlarda $\sim$1 milyar yılı aşan uzun zaman ölçeklerinde sönümlenmektedir. Bu bulgular, çevresel süreçlerin galaksilerin yapısal dönüşümünden ziyade yıldız oluşum geçmişini etkilediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, galaksi popülasyonlarında gözlenen iki modlu yapı; yıldız oluşum geçmişi, yıldız kütlesi, çevresel yoğunluk ve kozmik zaman boyunca gerçekleşen sönümleme ve birleşme süreçleri ile ilişkili bir evrimsel ayrışmayı yansıtmaktadır. Bu bağlamda, kırmızı kol ve mavi bulut olarak tanımlanan iki temel mod, galaksi evriminde rol oynayan fiziksel mekanizmaların incelenmesi açısından kullanışlı bir kavramsal çerçeve sağlamaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

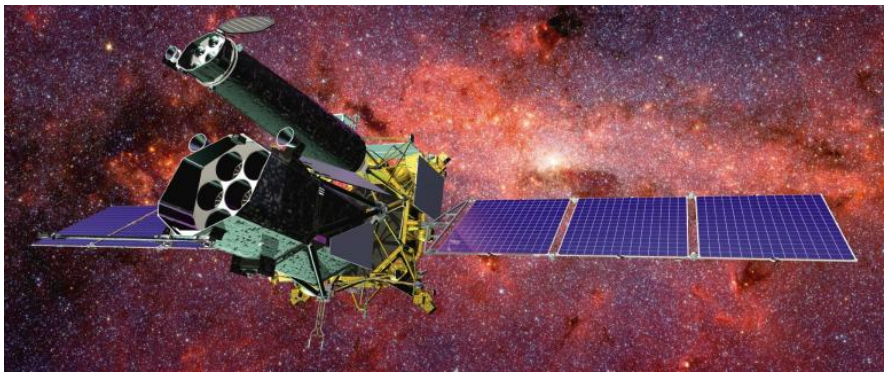
3.1. SPEKTRUM-RÖNTGEN-GAMA TELESKOBU

13 Temmuz 2019 tarihinde Kazakistan'daki Baykonur Uzay Üssü'nden Rusya-Almanya iş birliğiyle fırlatılan Spektrum-Röntgen-Gama (Spektr-RG/SRG) uydu teleskobu görevini tamamladığında ROSAT (ROentgen SATellite) Tüm Gözkyüzü Taraması'ndan sonra yapılmış en yüksek çözünürlüklü ve en duyarlı tüm gökyüzü x-ışın taraması olacaktır[1] . Bu teleskop, Rusya Uzay Ajansı (Roscosmos) ve Rusya Uzay Araştırma Enstitüsü (IKI) ile Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) ve Max-Planck Dünya Dışı Fizik Enstitüsü (MPE) arasında yürütülen uluslararası iş birliğine dayalı olarak evrenin 0.2-30 keV X-ışını bandındaki büyük ölçekli yapısını ve yüksek enerjili astrofiziksel süreçlerini incelemek üzere tasarlanmıştır. SRG teleskobunun 0.2–12 keV enerji bandında gerçekleştirilen ilk tüm gökyüzü X-ışın taraması ve ilk tüm gökyüzü X-ışını zamansal değişkenlik taramasının 6 aylık periyotlarla toplam 8 gözlem döneminde yapılması planlanmıştır. 4 yıl süren gözlemlerin ardından ise 30 keV'a kadar sert X-ışını aralığında seçilen cisimlerin ve gökyüzü bölgelerinin gözlemlerinin yapılması hedeflenmiştir. SRG Teleskobu, Dünya–Güneş sisteminin ikinci Lagrange noktası (L2) çevresindeki yörüngede görev yapmakta olup, bu konumun sağladığı düşük parçacık arka planı ve yüksek termal kararlılık sayesinde uzun süreli ve homojen X-ışını gözlemleri gerçekleştirebilmektedir.

SRG Teleskobu birbirinden bağımsız iki dedektörden oluşmaktadır (**Şekil 3.1**). Bunlar; Rusya'nın yürüttüğü 4-30 keV bandında gözlem yapan Mikhail Pavlinsky ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope – X-ray Concentrator) sert X-ışın dedektörü ve Almanya tarafından yürütülen 0.2-10 keV bandında gözlem yapan eROSITA (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array) yumuşak X-ışın dedektörleridir. Bu iki dedektörün birlikte çalışması, evrenin yumuşak ve sert X-ışını bantlarını kapsayan geniş bir enerji aralığında incelenmesine olanak tanımaktadır.

Teleskobun fırlatılmasının ardından 3 ay süren kalibrasyon testleri ve test gözlemlerinin

[1] Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle Almanya yaptırım uygulamış ve eROSITA gözlemleri durmuştur.



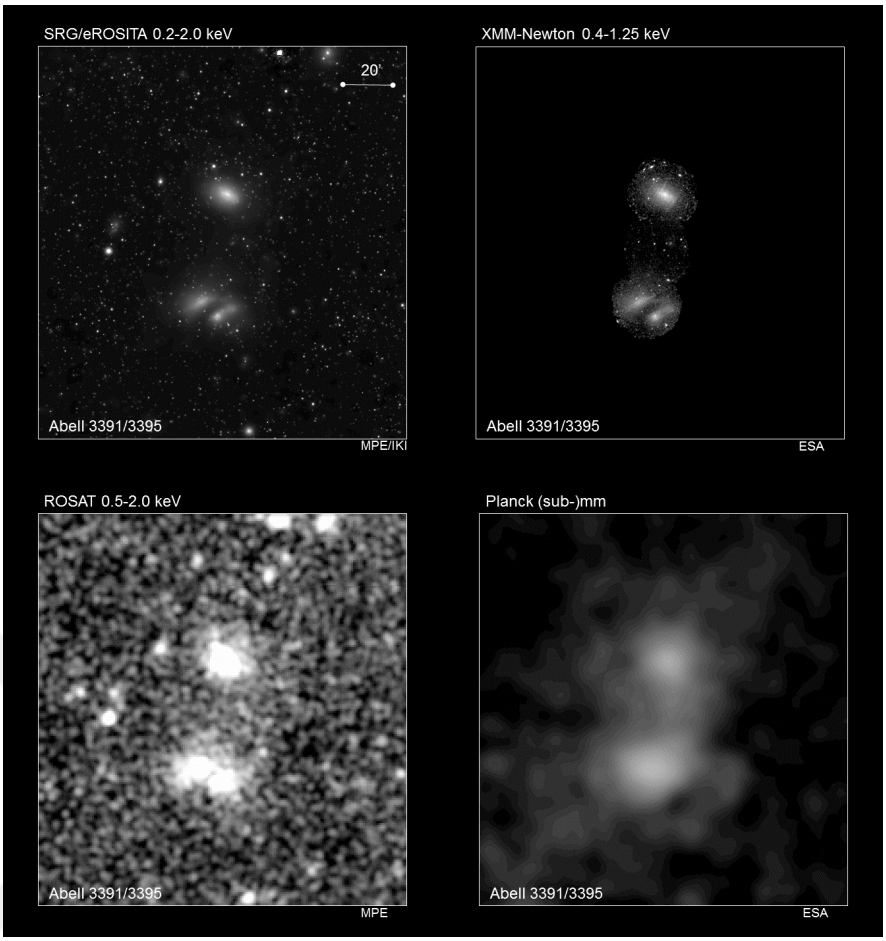
Şekil 3.1 eROSITA ve ART-XC dedektörleriyle Spectrum-Roentgen-Gamma (Spektr-RG/SRG) Teleskobunun temsili gösterimi. Kaynak:`https://iki.cosmos.ru/en/research/missions/spektr-rg`

ardından Aralık 2019'da tarama gözlemlerine başlanmıştır. Ancak, 22 Şubat 2022 tarihi itibarıyla Almanya'nın kararıyla eROSITA dedektörü güvenli moda alınmış olup Rusya tarafında ise teleskop, yeni bir gözlem programı kapsamında faaliyetine devam etmektedir.

SRG'nin bilimsel hedefleri; X-ışınlarında keşfedilecek yaklaşık 100.000 yeni galaksi kümesi ile evrenin büyük ölçekte benzersiz bir haritasını çıkarmak ve elde edilecek madde yoğunluğu ile kozmolojik parametreleri modellemek, süper kütleli karadeliklerin kozmolojik evrimini araştırmak, yeni aktif kaynakları tespit etmek ve aktif galaksi çekirdeklerinin (AGN) kırmızıya kayma boyunca dağılımını incelemek, yıldızlararası ortamı ve galaksiler arası ortamı araştırmak amacı taşımaktadır (Merloni ve diğ., 2020; Pavlinsky ve diğ., 2021).

3.1.1. eROSITA Dedektörü

eROSITA, MPE tarafından geliştirilmiş olup, her biri 54 paraboloid-hiperboloid ayna kabuğu içeren Wolter-I geometrisinde düzenlenmiş yedi adet ayna modülünden oluşan bir optik tasarıma sahiptir. Dedektörün dairesel görüş alanı 1.03° derece olup $26''$ açısal çözünürlüğe sahiptir. 0.2-10 keV yumuşak X-ışını enerji bandında çalışan eROSITA, yaklaşık $10^{-14} - 10^{-15}$ $erg\ cm^{-2}\ s^{-1}$ mertebesinde akılara kadar ulaşan yüksek hassasiyetli gözlemler gerçekleştirebilmektedir. Yaklaşık 100.000 galaksi kümesinin keşfiyle evrenin geniş ölçekli yapı haritasının oluşturulması ve evrenin madde yoğunluğunun belirlenmesi hedeflenmektedir. eROSITA'nın yüksek spektral çözünürlüğü (**Şekil 3.2**), yakın galaksi kümelerinin sıcaklık, yoğunluk ve basınç dağılımlarını içeren ayrıntılı termodinamik yapılarının incelenmesine olanak tanımaktadır. Bu gözlemler, galaksi kümelerindeki termal yapının evrimini ve kırmızıya kaymaya bağlı kimyasal zenginleşme süreçlerini ortaya



Şekil 3.2 Abell 3391 ve Abell 3395 etkileşen kümelerinin ROSAT, Planck, XMM-Newton ve eROSITA görüntüleri. eROSITA, XMM-Newton'dan daha yüksek çözünürlüklü ve daha geniş alan görüntüleyebilmektedir. ©T. Reiprich (Univ. Bonn), M. Ramos-Ceja (MPE), F. Pacaud (Univ. Bonn), D. Eckert (Univ. Geneva), J. Sanders (MPE), N. Ota (Univ. Bonn), E. Bulbul (MPE), V. Ghirardini (MPE), J. Erler (Univ. Bonn), A. Veronica (Univ. Bonn)

koymayı amaçlamaktadır.

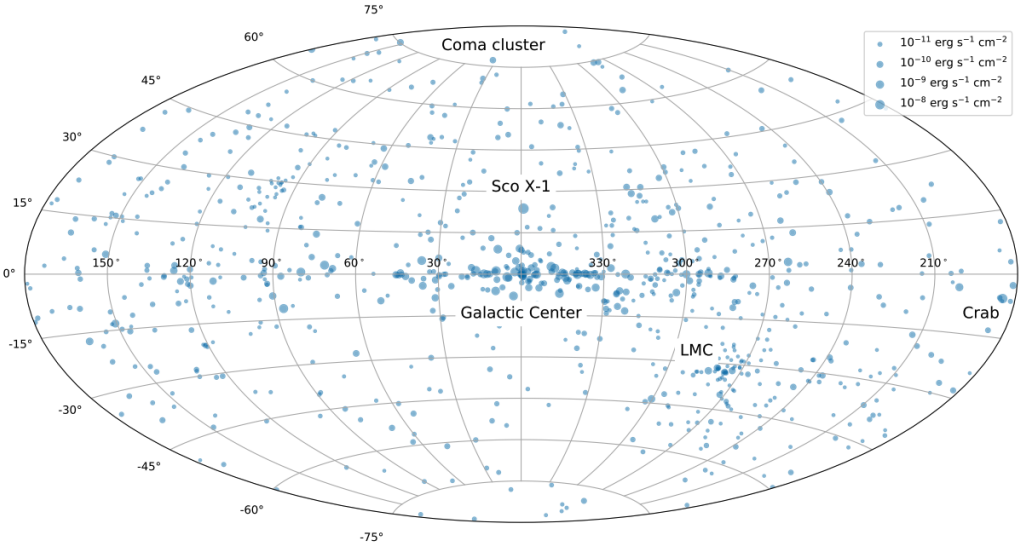
Bunlara ek olarak, yüksek kırmızıya kaymalarda tespit edilecek galaksi kümeleri, kozmolojik modellerin ve büyük ölçekli yapı oluşum senaryolarının güçlü gözlemsel testlerinin gerçekleştirilmesine imkan sağlayacaktır. Evrenin üç boyutlu yapısının ortaya çıkarılması amacıyla birkaç milyon aktif galaksi çekirdeğinin (AGN) tespit edilmesi planlanırken, aynı zamanda nötron yıldızları, süpernova kalıntıları ve X-ışını çiftleri gibi yüksek enerjili astrofiziksel kaynakların incelenmesiyle galaktik ölçekteki yüksek enerji süreçlerinin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesi hedeflenmektedir (Predehl ve diğ., 2021).

3.1.2. Mikhail Pavlinsky ART-XC Dedektörü

ART-XC (Astronomical Roentgen Telescope - X-ray Concentrator), SRG uzay teleskobunun sert X-ışını dedektörüdür. ART-XC, Rusya Bilimler Akademisi Uzay Araştırma Enstitüsü (IKI) ile Rusya Federal Nükleer Merkezi–Tüm Rusya Deneysel Fizik Araştırma Enstitüsü (RFNC-VNIIEF) tarafından geliştirilmiş; X-ışını optikleri ise RFNC-VNIIEF ve NASA'nın Marshall Uzay Uçuş Merkezi (MSFC) bünyesinde bağımsız olarak tasarlanmış, üretilmiş ve kalibre edilmiştir. Bu çok uluslu katkı, ART-XC'yi sert X-ışını bandında geniş alan taramaları için optimize edilmiş özgün bir enstrüman haline getirmiştir.

ART-XC, 4–30 keV enerji bandında çalışan, Wolter-I geometrisinde düzenlenmiş yedi adet birbirine hizalanmış ayna modülünden oluşan bir X-ışını dedektörüdür; her modül 28 ayna kabuğu içermektedir. ART-XC yaklaşık $36'$ görüş alanı (FoV) sunmakta ve $53''$ mertebesinde açısal çözünürlük sağlamaktadır. Sert X-ışını bandında yüksek algılama verimliliği sunan dedektör yapısı sayesinde ART-XC, 4–30 keV bandında yaklaşık $10^{-12} - 10^{-13}$ $erg\ cm^{-2}\ s^{-1}$ düzeylerine ulaşan yüksek hassasiyetli gözlemler gerçekleştirebilmektedir. Bu teknik özellikler, özellikle yumuşak X-ışınlarında soğurulma nedeniyle zayıflayan veya görünmeyen kaynakların tespiti için kritik öneme sahiptir (Pavlinsky ve diğ., 2022, 2021).

ART-XC'nin başlıca bilimsel hedefleri arasında, 4–12 keV bandında yüksek hassasiyetli ilk tüm gökyüzü taramasını gerçekleştirerek tarama sonunda yaklaşık 5000 yeni X-ışını kaynağını tespit etmek yer almaktadır. Düşük kırmızıya kaymalarda büyük kütleli yaklaşık 500 galaksi kümesinin keşfi ve bu kümelerin eROSITA gözlemleriyle birlikte değerlendirilerek küme içi sıcak gazın fiziksel özelliklerinin incelenmesi, kozmolojik parametre tahminlerinin iyileştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır. Ayrıca ART-XC, aktif galaktik çekirdekler (AGN), yüksek kütleli X-ışını çiftleri (HMXB), kataklismik değişenler (CV) ve süpernova kalıntıları gibi yüksek enerjili astrofiziksel cisimlerin popülasyon özelliklerini incelemeyi ve geçici X-ışını kaynaklarını araştırmayı hedeflemektedir. Bunun yanı sıra, Galaktik Merkez, Norma Kolu ve Küçük Macellan Bulutu gibi seçilmiş bölgelerde 4–30 keV bandında gerçekleştirilen geniş alan taramalarıyla, yoğun ve karmaşık yüksek enerjili kaynak ortamlarının ayrıntılı biçimde haritalandırılması hedeflenmektedir..



Şekil 3.3 ART-XC tarafından tüm gökyüzü taramasının ilk yılı boyunca 4–12 keV enerji aralığında tespit edilen X-ışını kaynaklarının Galaktik koordinatlardaki konumları gösterilmektedir. Sembollerin boyutu, her bir kaynağın X-ışını parlaklığını temsil etmekte olup, bu ölçek sağ üst köşede belirtilmiştir (Pavlinsky ve diğ., 2022).

3.1.2.1. ART-XC X-Işın Kataloğu

SRG/ART-XC dedektörünün Aralık 2019 ile Aralık 2020 arasında 6 aylık 2 gözlem döneminin tamamlanmasıyla elde edilen ilk yıl gözlem sonuçları Pavlinsky ve diğ. (2022) çalışmasında yayınlanmıştır. Buna göre SRG/ART-XC ile 4-12 keV enerji bandı aralığında 867 X-ışın kaynağı gözlenmiştir (**Şekil 3.3**). ART-XC ilk yıl kataloğu, galaktik ve galaksi-dışı çok sayıda X-ışını kaynağını içeren geniş bir örneklem sunmaktadır. 867 kaynağın %13'ü sınıflandırılamamış cisimlerden oluşsa da, sınıflandırılabilen 750 cismin önemli bir kısmı galaksi-dışı olup bunların dağılımı galaktik popülasyon ile karşılaştırılabilir düzeydedir. Galaktik kaynaklar; kataklismik değişenler, düşük ve yüksek kütleli X-ışını çiftleri ile sıcak yıldızlar ve süpernova kalıntılarından oluşmaktadır. Galaksi-dışı kaynaklar ise büyük ölçüde aktif galaksi çekirdekleri tarafından domine edilmekte olup, bu grubu izleyen en önemli popülasyon galaksi kümeleridir. İlk yıl kataloğu 52 bilinen galaksi kümesini içermektedir. Bu sonuç, ART-XC'nin hem bireysel yüksek enerjili astrofiziksel kaynakları hem de büyük ölçekli yapıları incelemek için güçlü bir veri seti sağladığını göstermektedir (Pavlinsky ve diğ., 2022).

İlk yıl kataloğunun ardından, Sazonov ve diğ. (2024) tarafından yayımlanan ARTSS1–5

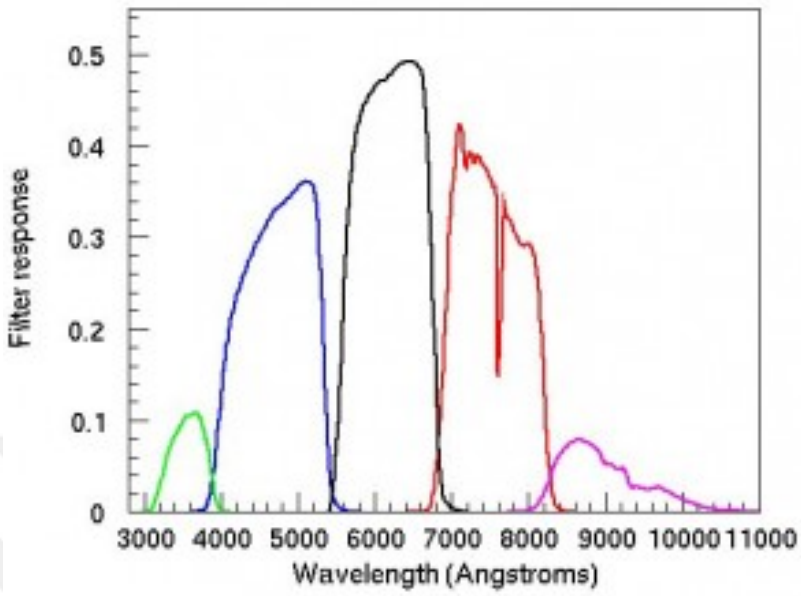
kataloğunda toplam 1545 kaynak listelenmiştir. Bu kaynaklar arasında 48 galaksi kümesi bulunmaktadır. İkinci katalogda raporlanan küme sayısının ilk kataloğa kıyasla daha az olmasının temel nedeni, ART-XC kaynak arama algoritmasının esas olarak noktasal X-ışını kaynaklarının tespiti için tasarlanmış olmasından dolayı yaygın cisimlerin benimsenen eşik değerin altında kalmış olmasıdır. Bu nedenle, süpernova kalıntıları ve galaksi kümeleri gibi yaygın astrofiziksel cisimler, özellikle gökyüzünde geniş açısal alanlar kaplayan Coma ve Virgo gibi parlak galaksi kümeleri, yüksek X-ışını parlaklıklarına rağmen bu katalogda yer almamaktadır. Sonuç olarak, ilk yıl kataloğunda yer alan bazı kümeler ikinci katalogdan çıkarılmış; bunların yerine devam eden taramalar sırasında tespit edilen ve literatürde daha önce bilinen 16 galaksi kümesi eklenmiştir.

3.2. SLOAN DİJİTAL GÖKYÜZÜ TARAMASI

Sloan Dijital Gökyüzü Taraması (Sloan Digital Sky Survey; SDSS)[2] , evrenin büyük ölçekli yapısını, galaksi dağılımlarını ve kozmolojik parametreleri incelemeyi amaçlayan, modern gözlemsel astronominin en kapsamlı gökyüzü tarama projelerinden biridir. Teknik altyapısının kurulmasının ardından SDSS, ana bilimsel gözlemlerine 2000 yılında başlamış ve geçen süreçte astronomi literatüründe büyük hacimli ve homojen bir veri seti üretmiştir. Proje, sunduğu açık erişimli veriler sayesinde kozmoloji, galaksi evrimi, yıldız astrofiziği ve aktif galaktik çekirdek çalışmaları için temel bir başvuru kaynağı haline gelmiştir.

SDSS gözlemleri, Amerika Birleşik Devletleri'nin New Mexico eyaletinde bulunan ve yaklaşık 3°'lik geniş bir görüş alanına sahip olan Apache Point Gözlemevi'ndeki (APO) 2.5 metrelik optik teleskopla gerçekleştirilmiştir. Tarama kapsamında ağırlıklı olarak kuzey gökyüzü gözlenmiş, güney gökyüzünde ise sınırlı ancak bilimsel açıdan değerli alanlar taramaya dahil edilmiştir. Teleskobun fotometrik gözlemler için kullanılan temel enstrümanı, her biri 2048×2048 piksel çözünürlüğe sahip 30 adet SITe/Tektronix CCD içeren bir kamera sistemidir. Gözlemler, gökyüzünün şeritler halinde taranmasıyla gerçekleştirilir ve bu yöntem sayesinde her bir yönlenmede yaklaşık 54 saniyelik poz süreleri kullanılmaktadır. Bu gözlem stratejisi, geniş alanların homojen fotometrik doğrulukla taranmasını mümkün kılmıştır. Fotometrik tarama, u, g, r, i ve z olmak üzere beş geniş bant filtresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu filtrelerin merkezi dalga boyları sırasıyla 3551 Å (u), 4686 Å (g),

[2] https://www.sdss.org



Şekil 3.4 SDSS I-III taramalarında kullanılan fotometrik filtreler.

6166 Å (r), 7480 Å (i) ve 8932 Å (z) olup, gözlemler ultraviyole ile yakın kırmızıöte arasındaki geniş bir dalgaboyu aralığını kapsamaktadır (**Şekil 3.4**). Toplamda yaklaşık 14.555 derece karelik bir gökyüzü alanı taranmış ve bu süreçte 1.2 milyardan fazla gök cismi fotometrik olarak kataloglanmıştır. Çok bantlı bu veri seti, yıldızlar, galaksiler ve kuazarların renkleri ile fiziksel özellikleri hakkında yüksek hassasiyetli bilgiler sunmaktadır.

Fotometrik verilerin yanı sıra SDSS, geniş kapsamlı tayfsal gözlemler de sağlamıştır. Tayfsal gözlemler, teleskobun odak düzlemine yerleştirilen alüminyum plakalar üzerine monte edilen fiber optik kablolar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. İlk evrelerde plaka başına 640 fiber kullanılırken, BOSS (The Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey - Genişletilmiş Baryon Salınımı Tayfsal Taraması) ile bu sayı 1000 fibere çıkarılmıştır. MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at APO - APO'da Yakın Galaksilerin Haritalanması) ile 1423 fiber kullanılmıştır. Başlangıçta yaklaşık 3800-9200 Å dalga boyu aralığında çalışan tayfçekerler, BOSS ve sonraki projelerle birlikte 3800–10400 Å aralığını kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Tayfsal çözünürlük ortalama $R \simeq 2000$ düzeyindedir ve bugüne kadar 5 milyondan fazla gök cismi için güvenilir kırmızıya kayma ölçümleri elde edilmiştir. Bu veriler, evrenin üç boyutlu büyük ölçekli yapısının incelenmesine olanak sağlamaktadır (Eisenstein ve diğ., 2005).

SDSS, bilimsel hedefleri doğrultusunda beş ana evreye ayrılmıştır. SDSS-I ve SDSS-II (2000-2008) dönemlerinde geniş alanlı fotometrik ve tayfsal gökyüzü taramaları gerçekleştirilmiş; bu süreçte Samanyolu'nun yıldız içeriğini incelemeye yönelik SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration - Galaktik Anlayış ve Keşif için Sloan Uzantısı) projesi ile süpernova gözlemleri yürütülmüştür. SDSS-III (2008-2014) evresinde BOSS projesi kapsamında baryon akustik salınımlar kullanılarak evrenin genişleme tarihi ölçülmüş, APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment - Apache Point Gözlemevi Galaktik Evrim Deneyi) ile kırmızıöte dalga boylarında yüksek çözünürlüklü tayfsal veriler elde edilmiştir. SDSS-IV (2014-2020) döneminde MaNGA projesi aracılığıyla galaksilerin iç yapıları integral alan tayfölçüm yöntemiyle incelenmiş, eBOSS (The Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey - Genişletilmiş Baryon Salınımı Tayfsal Taraması) ile kozmolojik parametrelere yönelik kısıtlamalar geliştirilmiştir. 2020 yılında başlayan SDSS-V, robotik fiber sistemleri kullanarak tüm gökyüzünü kapsayan tayfsal gözlemler gerçekleştirmeyi ve sistematik veriler üretmeyi hedeflemektedir.

SDSS'nin kozmolojiye katkıları arasında galaksilerin ve kuazarların büyük ölçekli dağılımlarının istatistiksel olarak incelenmesi, baryon akustik salınımların ölçülmesi yoluyla evrenin genişleme hızının belirlenmesi (Eisenstein ve diğ., 2005) ve karanlık enerji modellerine yönelik kısıtlamaların geliştirilmesi yer almaktadır. Homojen ve yüksek kaliteli veri yapısı sayesinde SDSS katalogları, hem gözlemsel hem de kuramsal çalışmalar için yaygın olarak kullanılan standart referans veri setleri haline gelmiştir. Açık erişim politikası ve uzun süreli veri üretimi nedeniyle SDSS, astronomi literatüründe en fazla referans verilen gözlemsel projelerden biri konumundadır.

3.3. GALAKSİ KÜME ÖRNEKLEMLERİ

3.3.1. Sert X-Işınlarında Gözlenen Galaksi Kümeleri

Bu tez çalışmasının temel amacı, sert X-ışınlarında belirlenen galaksi kümelerinin optik özelliklerini incelemek olduğu için küme örneklemi oluşturulurken optik veri erişilebilirliği örneklem seçiminde belirleyici faktörlerden biri olmuştur. Bu kapsamda, SRG/ART-XC dedektörünün ilk yıl kataloğunda (Pavlinsky ve diğ., 2022) belirlenmiş 52 galaksi kümesi

içinden SDSS DR17 (Data Release 17; Abdurro'uf ve diğ. (2022))[3] veritabanında optik gözlem verisi bulunan 13 galaksi kümesi çalışmanın sert X-ışın galaksi küme örneklemine dahil edilmiştir. Tez çalışması devam ederken Sazonov ve diğ. (2024) tarafından bu kataloğa eklenen yeni galaksi kümeleri içerisinden SDSS DR17'de optik verisi bulunan 5 galaksi kümesi daha örnekleme dahil edilmiştir. Böylece, SRG/ART-XC ile belirlenen toplam 18 galaksi kümesinin küme içi popülasyonları ve bu popülasyonların küme merkezine olan ortalama uzaklıkları incelenmiştir.

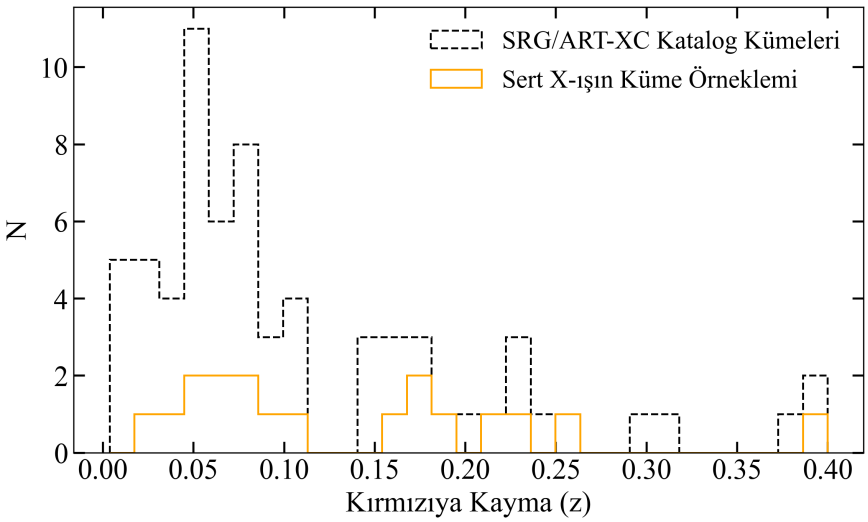
Sert X-ışın galaksi küme örneklemine dahil edilen galaksi kümelerine ait koordinat, kırmızıya kayma ve zenginlik bilgileri **Tablo 3.1**'de verilmiştir. Kümelerin zenginlik değerleri Abell ve diğ. (1989) çalışmasından elde edilmiştir. RBS 1460 galaksi kümesinin zenginlik değeri ise Wen ve Han (2013) çalışmasından alınmıştır.

Tablo 3.1 Sert X-ışınları ile belirlenmiş galaksi küme örnekleminin RA, Dec, kırmızıya kayma (z) ve zenginlikleri (λ).

No	Galaksi Kümesi	RA (deg)	Dec (deg)	z	λ
1	Abell 85	10.46004	-9.30532	0.0555	59
2	Abell 586	113.08197	31.63154	0.1707	190
3	Abell 644	124.35883	-7.52019	0.0704	42
4	Abell 1689	197.87292	-1.34109	0.1832	228
5	Abell 1795	207.19736	26.58198	0.0625	115
6	Abell 1835	210.26433	2.87250	0.2516	48
7	Abell 1914	216.48916	37.83161	0.1678	105
8	Abell 2034	227.51635	33.51579	0.1137	105
9	Abell 2065	230.59437	27.73894	0.0719	109
10	Abell 2142	239.61027	27.23108	0.0897	89
11	Abell 2199	247.14386	39.54050	0.0306	88
12	Abell 2219	250.07392	46.70943	0.2255	159
13	Abell 2255	258.23334	64.06834	0.0803	102
14	Abell 2256	255.90641	78.62295	0.0580	88
15	MCXC J2211.7-0349	332.93661	-3.82575	0.4265	159
16	MKW 3s	230.45325	7.72798	0.0447	61
17	RBS 1460	226.03072	-2.80301	0.2172	66
18	RBS 1639	260.04132	26.62960	0.1603	–

SRG/ART-XC ilk yıl ve ARTSS1-5 kataloglarında yer alan toplam 68 galaksi kümesinin ve bu çalışmanın sert X-ışın örneklemine seçilen 18 galaksi kümesinin kırmızıya kayma değerleri NASA/IPAC Galaksi Dışı Veritabanı'ndan (NASA/IPAC Extragalactic Database;

[3] https://www.sdss4.org/dr17/

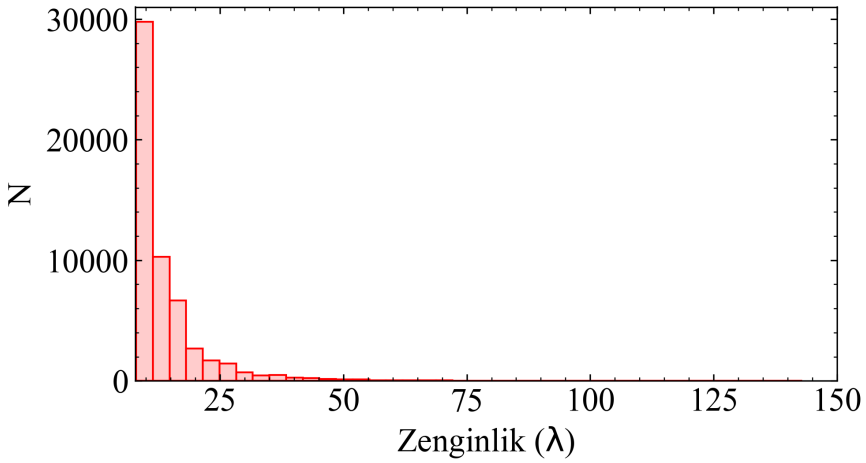


Şekil 3.5 SRG/ART-XC kataloğundaki kümeler ile sert X-ışın küme örnekleminin kırmızıya kayma (z) dağılımı.

NED) alınmış ve dağılımları **Şekil 3.5**'de gösterilmiştir.

3.3.2. Kontrol Örneklemi: Optik Dalga Boyunda Belirlenmiş Galaksi Kümeleri

Sert X-ışını galaksi küme örnekleminin optik özelliklerinin incelenebilmesi amacıyla, optik dalga boyunda tanımlanmış bir kontrol örneklemi oluşturulmuştur. Bu örneklem belirlenirken, sert X-ışını galaksi küme örneklemi ile uyumlu olacak şekilde belirli seçim kriterleri esas alınmıştır. Bu kapsamda, kontrol örneklemini oluşturan galaksi kümeleri; veri homojenliğini sağlamak amacıyla SDSS gözlem verilerine dayalı olarak belirlenmiş, ART-XC dedektörünün gözlem yaptığı alanlarda yer alan ancak sert X-ışını bandında tespit edilemeyen sistemler arasından seçilmiştir (**Şekil 3.7**). Ayrıca bu kümelerin, sert X-ışını küme örneklemi ile benzer kırmızıya kayma aralığında bulunması ve benzer zenginlik değerlerine sahip olması diğer temel seçim kriterlerini oluşturmuştur. Bu kriterler doğrultusunda kontrol örneklemi, SDSS verileri kullanılarak Hao ve diğ. (2010) tarafından Gaussian Mixture Brightest Cluster Galaxy (GMBCG) algoritmaları ile oluşturulan galaksi küme kataloğundan seçilmiştir. Söz konusu katalog, sert X-ışını galaksi küme örneklemi ile uyumlu olacak şekilde $0.1 < z < 0.55$ kırmızıya kayma aralığında toplam 55.424 galaksi kümesi içermektedir. Sert X-ışını küme örneklemi ile karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla katalogdaki en zengin galaksi kümeleri esas alınmıştır. Katalogdaki zenginlik dağılımı **Şekil 3.6**'da gösterilmektedir. İlk aşamada, katalogdan $z < 0.5$ ve katalogda belirtilen zenginlik parametresi (Ngal) $\lambda > 50$ olan 394 galaksi kümesi seçilmiştir. Bu



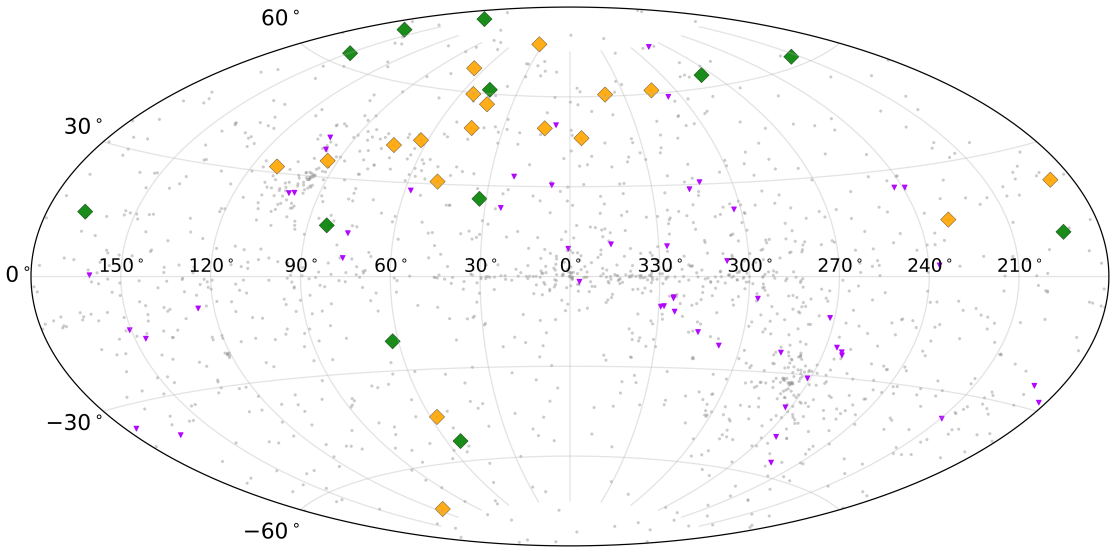
Şekil 3.6 Hao ve diğ. (2010) kataloğundaki 55.494 galaksi kümesinin zenginlik dağılımı.

kümelerin $0.1 < z < 0.5$ aralığında aralığında dengeli bir dağılım göstermesini sağlamak amacıyla kırmızıya kayma aralığı $\Delta z = 0.1$ olacak şekilde dört alt aralık tanımlanmış ve her aralıktan 10 küme seçilerek toplam 40 küme belirlenmiştir. GMBCG algoritmasının olası belirsizlikleri göz önünde bulundurularak seçilen 40 küme, SDSS alan görüntüleri kullanılarak görsel olarak incelenmiştir. Belirgin galaksi yoğunluğu gösteren 12 galaksi kümesi nihai kontrol örneklemi olarak seçilmiştir. Kontrol örneklemini (optik küme örneklemi) oluşturan galaksi kümelerine ait koordinat, kırmızıya kayma ve zenginlik bilgileri **Tablo 3.2**'te verilmiştir.

Tablo 3.2 Optik galaksi küme örnekleminin RA, Dec, kırmızıya kayma ve zenginlikleri.

No	**Galaksi Kümesi**	**RA (deg)**	**Dec (deg)**	**z**	λ
1	J126.86844+22.54605	126.86844	22.54605	0.3910	130
2	J126.37107+47.13351	126.37107	47.13351	0.1290	88
3	J132.53297+36.07048	132.53297	36.07048	0.3764	127
4	J137.30312+10.97476	137.30312	10.97476	0.1763	104
5	J139.47262+51.72705	139.47262	51.72705	0.2168	131
6	J141.02212+14.17266	141.02212	14.17266	0.1356	72
7	J155.61850+50.10551	155.61850	50.10551	0.1584	75
8	J178.82501+23.40494	178.82501	23.40494	0.1429	115
9	J180.10563+03.34704	180.10563	3.34704	0.1327	73
10	J203.83372+41.00115	203.83372	41.00115	0.2283	131
11	J231.03093+29.88897	231.03093	29.88897	0.1135	82
12	J358.55704-10.41902	358.55704	-10.41902	0.0776	91

Şekil 3.7'de ART-XC dedektörünün ARTSS1–5 kataloğu kullanılarak aitoff projeksiyonunda, galaktik koordinatlarda çizilmiş gökyüzü dağılımı gösterilmektedir. Bu



Şekil 3.7 Galaktik koordinatlarda (aitoff projeksiyonu) örneklem kümelerinin ve ARTSS1–5 kataloğunun gökyüzü dağılımı.

dağılımda turuncu elmaslar sert X-ışını küme örnekleminde yer alan 18 galaksi kümesini, mor üçgenler SRG/ART-XC kataloglarında bulunan ancak sert X-ışını örneklemine dışındaki 50 galaksi kümesini, gri noktalar ise ARTSS1–5 kataloğundaki diğer kaynakları temsil etmektedir. Optik kontrol örneklemini oluşturan 12 küme ise yeşil elmaslarla gösterilmekte olup sert X-ışın örneklemi ile benzer gökyüzü dağılımına sahiptir. Görüldüğü üzere, optik kontrol örneklemi, ART-XC dedektörünün gözlem yaptığı bölgelerde yer almakta olup sert X-ışını bandında tespit edilemeyen kümelerden oluşmaktadır. Bu durum, optik örneklemin karşılaştırmalı analiz için uygun bir kontrol grubu olduğunu desteklemektedir.

3.4. SDSS VERİTABANINDAN GALAKSİLERİN SEÇİMİ

Bu çalışma kapsamında belirlenen galaksi kümelerine ait galaksilerin fotometrik ve tayfsal özellikleri, SDSS DR17 veritabanı kullanılarak elde edilmiştir. Galaksi kümelerinin merkez koordinatları esas alınarak, her bir kümenin R_{200} değerine karşılık gelen açısal yarıçap içinde kalan cisimlerin belirlenmesi amacıyla SQL (Structured Query Language) sorgusu uygulanmıştır. Sorgulama sırasında, SDSS tarafından `PhotoObj` tablosunda `GALAXY` olarak sınıflandırılmış, `PRIMARY` etiketine sahip tüm cisimler örnekleme dahil edilmiştir. `PRIMARY` etiketi, SDSS tarama görüntülerinin örtüştüğü bölgelerde yinelenen tespitlerin önlendiğini

ve tekil, tutarlı bir fotometrik kalibrasyonun sağlandığını ifade etmektedir. Bu nedenle örneklem, `PRIMARY` olarak işaretlenmiş cisimlerle sınırlandırılmıştır. Böylece cisimlerin koodinatları, u, g, r, i ve z fotometrik bantlarındaki parlaklıkları, etkin yarıçapları, fotometrik kırmızıya kayma değerleri ve mevcut olanlar için tayfsal kırmızıya kayma değerleri elde edilmiştir.

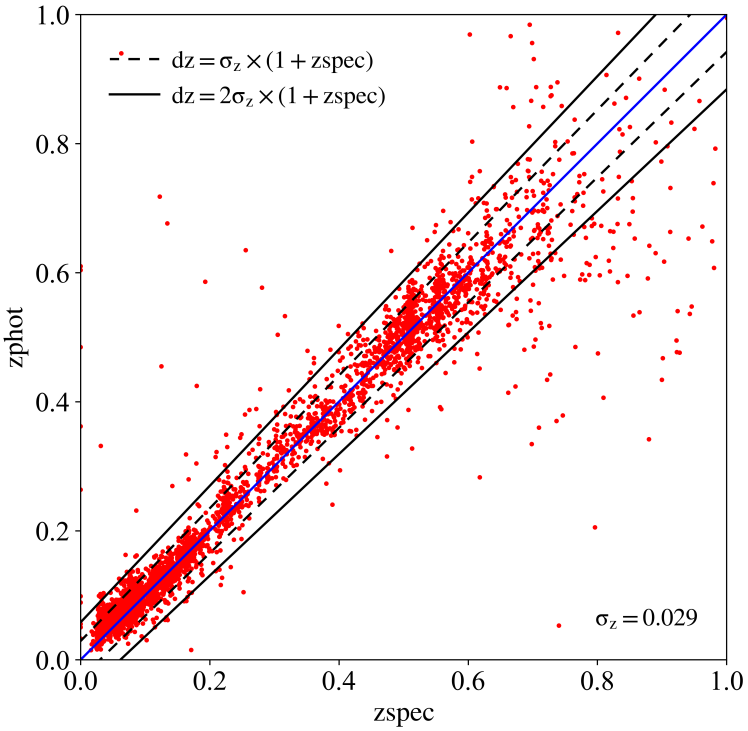
Galaksi kümelerine ait olası küme üyesi galaksilerin belirlenebilmesi amacıyla SQL sorgusu ile elde edilen cisimlere kırmızıya kayma ve limit parlaklık kriterleri uygulanmıştır.

3.4.1. Kırmızıya Kayma Kriteri

Galaksi kümelerine ait olası üye galaksilerin belirlenebilmesi için, ön ve arka plan galaksilerini örneklemden ayıklamak amacıyla kırmızıya kaymaya dayalı seçim kriteri uygulanmıştır. Görüş doğrultusu boyunca yer alan küme üyesi olmayan galaksilerin örneklemden ayırt edilmesinde tayfsal kırmızıya kaymalar en ideal yöntem olmakla birlikte, günümüzde yeterli geniş alan kapsamına sahip bir tayfsal taramanın bulunmaması nedeniyle bu yaklaşım pratikte sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada küme üyesi galaksilerin seçimi için fotometrik kırmızıya kaymalar kullanılmıştır.

Fotometrik kırmızıya kayma yöntemi, galaksilerin tayfsal enerji dağılımlarının tahmin edilmesine dayanan ve galaksi dışı astronomide yaygın olarak kullanılan etkili bir tekniktir (Salvato ve diğ., 2019). Fotometrik kırmızıya kayma tahminlerinin doğruluğu, gözlemsel veri miktarının artması ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemlerin etkin biçimde kullanılmasıyla birlikte önemli ölçüde iyileşmiştir. SDSS tarafından kullanılan çok bantlı görüntüleme sayesinde, tespit edilen tüm cisimler için fotometrik kırmızıya kayma değerleri sağlanmaktadır.

SDSS için geliştirilen ilk fotometrik kırmızıya kayma tahminleri şablon eşleştirme ve ampirik yöntemlere dayanmaktadır (Csabai ve diğ., 2003; Wray ve Gunn, 2008). Daha güncel veri sürümlerinde, özellikle DR17'de, fotometrik kırmızıya kayma hesaplamaları ağırlıklı olarak makine öğrenmesi temelli yöntemler kullanılarak yapılmaktadır (Oyaizu ve diğ., 2008; Roster ve diğ., 2024). SDSS'in geniş tayfsal galaksi örneklemi, makine öğrenmesi tabanlı fotometrik kırmızıya kayma tahminleri için verimli bir eğitim seti sunmakta ve bu sayede SDSS fotometrik kırmızıya kaymalarının doğruluğu, optik dalga boyunda benzer beş bantlı görüntüleme taramalarına kıyasla daha yüksek olmaktadır (Aliş,



Şekil 3.8 Örneklemdeki 4065 galaksinin tayfsal kırmızıya kaymaları ile fotometrik kırmızıya kaymalarının karşılaştırması.

2024).

Fotometrik kırmızıya kayma analizine geçilmeden önce, bu çalışmada kullanılan SDSS fotometrik kırmızıya kayma değerlerinin galaksi örneklemi için doğruluğu test edilmiştir. Bu amaçla, galaksi küme merkezleri etrafında 2 Mpc yarıçaplı bir alan içerisinde SDSS tayfsal verileri sorgulanmış ve toplam 4065 galaksi için tayfsal kırmızıya kayma bilgisi elde edilmiştir. Bu yarıçap, küme alanlarında tayfsal kırmızıya kaymaya sahip en fazla sayıda galaksiyi kapsaması amacıyla seçilmiştir. İlerleyen analizlerde ise küme yarıçapı olarak R_{200} kullanılmıştır.

Tayfsal ve fotometrik kırmızıya kaymalar arasındaki karşılaştırma için SDSS tarafından fotometrik kırmızıya kaymaların doğruluğu ve hassasiyeti için verilen $\sigma_z = 0.029$[4] kullanılmış ve sonuçlar **Şekil 3.8**'te gösterilmiştir. Galaksilerin yaklaşık %94'ünün 2σ sınırları içerisinde yer alması nedeniyle, bu aralık olası küme üyesi galaksilerin belirlenmesinde kırmızıya kayma belirsizliği olarak kabul edilmiştir.

[4] https://www.sdss4.org/dr17/algorithms/photo-z/

Buna göre, aşağıdaki koşulu sağlayan galaksiler olası küme üyesi olarak seçilmiştir:

$$z_{cl} - dz < z_{gal} < z_{cl} + dz \tag{3.1}$$

Burada $dz = \sigma_z \times (1 + z_{cl})$ olarak tanımlanmaktadır. Bu ifadede, z_{gal} galaksilerin fotometrik kırmızıya kayma değerlerini, z_{cl} ise NED ile elde edilen galaksi kümesine ait kırmızıya kayma değerini temsil etmektedir.

3.4.2. R_{200} Yarıçaplarının Belirlenmesi

Her iki örneklemde yer alan galaksi kümelerinin olası küme üyesi galaksileri, her bir kümenin R_{200} yarıçapı içerisinde bulunma durumları araştırılarak elde edilmiştir. R_{200}, bir galaksi kümesinin merkezinden itibaren ortalama madde yoğunluğunun, evrenin kritik madde yoğunluğunun 200 katına ulaştığı yarıçapı tanımlamakta olup, kümenin dinamik olarak bağlı ve viryalleşmiş bölgesini temsil eden karakteristik bir fiziksel ölçektir (Bkz.2.1.1.). Bu sebeple, fiziksel olarak anlamlı bir ölçeği temsil ettiğinden küme alanları bu yarıçap ile sınırlandırılmıştır.

Bu çalışmada, sert X-ışın küme örneklemine dahil olan kümelerin R_{200} yarıçapları literatürde verilen M_{200} kütle değerleri kullanılarak hesaplanmıştır ve **Tablo 3.3**'te sunulmuştur. R_{200} yarıçaplarının hesaplanmasında, R_{200} yarıçapı içinde kalan ortalama yoğunluğun, ilgili kırmızıya kaymadaki kritik yoğunluğun 200 katına eşit olduğu varsayımına dayanan 2.2 denklemi kullanılmıştır. Bu hesaplamalar, Python ortamında COLOSSUS[5] kütüphanesi kullanılarak ΛCDM standart kozmolojik model varsayımıyla gerçekleştirilmiştir.

Kontrol örneklemi olan optik küme örneklemindeki kümelerin R_{200} yarıçapları, Hao ve diğ. (2010) çalışmasında verilen küme zenginliğine dayanan 3.2 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_{\rm scale} = 0.133 \times \left(N_{\rm gals}^{0.5\,{\rm Mpc}}\right)^{0.539} \tag{3.2}$$

Bu bağıntıda tanımlanan $R_{\rm scale}$ parametresi, R_{200} yarıçapına karşılık gelmektedir. Kümelere ait 0.5 Mpc yarıçapı içerisindeki galaksi sayıları ($Ngals$) **Tablo 3.2**'de verilmiş olup, bu değerler kullanılarak hesaplanan R_{200} değerleri ise **Tablo 3.4**'te yer almaktadır.

[5] https://bitbucket.org/bdiemer/colossus/src/master/

Tablo 3.3 Sert X-ışın küme örnekleminin R_{200} ve M_{200} değerleri.

No	Galaksi Kümesi	R_{200} (Mpc)	M_{200} ($M_{\odot}$)	Referans
1	Abell 85	1.28	5.09×10^{14}	Schellenberger ve Reiprich (2017)
2	Abell 586	1.36	6.91×10^{14}	Okabe ve Smith (2016)
3	Abell 644	1.46	7.67×10^{14}	Ettori ve diğ. (2019)
4	Abell 1689	1.92	–	Hao ve diğ. (2010)
5	Abell 1795	1.78	1.39×10^{15}	Herbonnet ve diğ. (2020)
6	Abell 1835	1.67	1.40×10^{15}	Okabe ve Smith (2016)
7	Abell 1914	2.19	2.86×10^{15}	Barrena ve diğ. (2013)
8	Abell 2034	1.25	5.06×10^{14}	Monteiro-Oliveira ve diğ. (2018)
9	Abell 2065	1.69	1.20×10^{15}	Herbonnet ve diğ. (2020)
10	Abell 2142	1.79	1.45×10^{15}	Herbonnet ve diğ. (2020)
11	Abell 2199	1.15	3.66×10^{14}	Machado ve diğ. (2022)
12	Abell 2219	1.55	1.09×10^{15}	Okabe ve Smith (2016)
13	Abell 2255	1.60	1.03×10^{15}	Ettori ve diğ. (2019)
14	Abell 2256	1.61	1.02×10^{15}	Schellenberger ve Reiprich (2017)
15	MCXC J2211.7-0349	1.84	2.28×10^{15}	Hilton ve diğ. (2021)
16	MKW 3s	0.88	1.66×10^{14}	Schellenberger ve Reiprich (2017)
17	RBS 1460	1.75	1.55×10^{15}	Hilton ve diğ. (2021)
18	RBS 1639	1.24	5.23×10^{14}	Okabe ve Smith (2016)

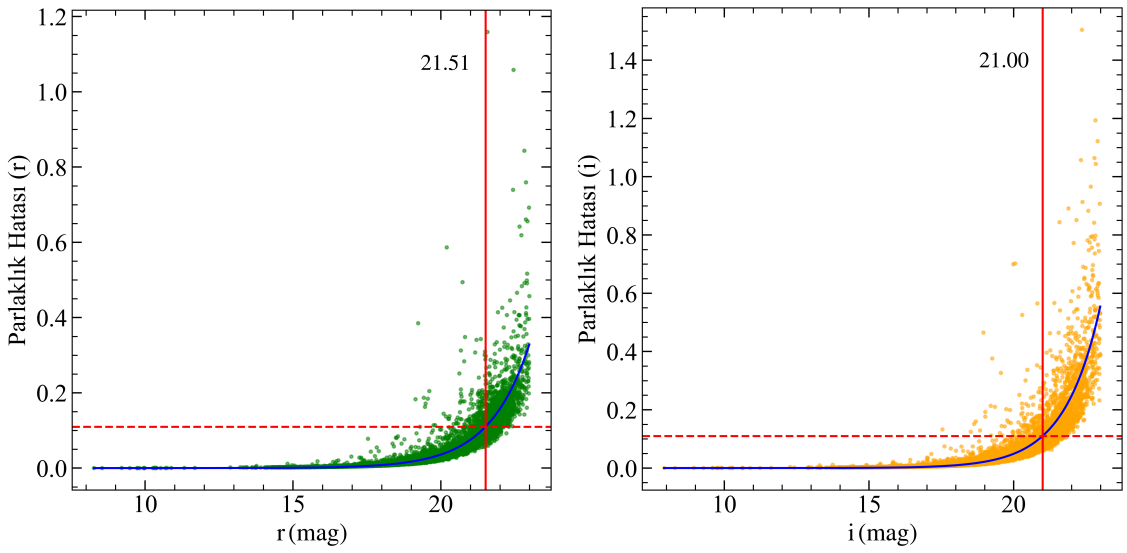
Tablo 3.4 Optik küme örnekleminin R_{200} değerleri.

No	Galaksi Kümesi	R_{200} (Mpc)
1	J126.86844+22.54605	1.83
2	J126.37107+47.13351	1.49
3	J132.53297+36.07048	1.81
4	J137.30312+10.97476	1.63
5	J139.47262+51.72705	1.84
6	J141.02212+14.17266	1.33
7	J155.61850+50.10551	1.36
8	J178.82501+23.40494	1.71
9	J180.10563+03.34704	1.34
10	J203.83372+41.00115	1.84
11	J231.03093+29.88897	1.43
12	J358.55704-10.41902	1.51

Abell 1689 galaksi kümesi, Hao ve diğ. (2010) kataloğunda J197.87292-01.34109 adıyla yer almaktadır. Bu cisim tez çalışması sırasında kontrol örnekleminde bulunmakta olup SRG/ART-XC dedektörünün ikinci kataloğu olan Sazonov ve diğ. (2024) kataloğuna eklenmesiyle birlikte sert X-ışın örneklemine dahil edilmiştir. Bu kümenin R_{200} yarıçapı 3.2 bağıntısıyla hesaplanmıştır.

3.4.3. Parlaklık Limiti Kriteri

SDSS verilerinde sönük parlaklıklarda artan fotometrik belirsizlikler ve buna bağlı olarak yıldız-galaksi ayrımının güvenilirliğinin azalması nedeniyle, galaksilere parlaklık limiti kriteri uygulanmıştır. Zayıf fotometriye sahip galaksileri dışlamak için sinyal/gürültü oranı $S/N > 10$ koşulu getirilmiştir. **Şekil 3.9**'da r ve i bantları için fotometrik hatanın parlaklığın bir fonksiyonu olarak değişimi gösterilmiştir. Sert X-ışın ve optik küme örneklemleri için hesaplanan r ve i bandı parlaklık limitleri **Tablo 3.5** ve **Tablo 3.6**'da verilmiştir. SDSS'te güvenilir yıldız-galaksi ayrımı için Abazajian ve diğ. (2003) çalışmasında verilen parlaklık limitleri ile uyumlu olacak şekilde limit parlaklıklar $r \leq 21^m$ ve $i \leq 21^m$ olarak belirlenmiştir. Bu yöntemle fotometrik ölçüm belirsizlikleri sınırlandırılmış, limit parlaklıktan daha sönük cisimler örneklemin dışında bırakılmıştır.



Şekil 3.9 Olası üye galaksilerin r ve i bandı parlaklık-hata grafikleri. Kesikli kırmızı çizgi S/N koşulunu, düz kırmızı çizgi her bant için hesaplanan parlaklık limitini göstermektedir.

Tablo 3.5 Sert X-ışın örneklemindeki her küme için hesaplanan r ve i bandı limit parlaklıkları.

No	Galaksi Kümesi	Limit Parlaklık (r)	Limit Parlaklık (i)
1	Abell 85	21.16	20.56
2	Abell 586	21.58	21.12
3	Abell 644	21.52	20.84
4	Abell 1689	21.45	20.85
5	Abell 1795	21.38	20.80
6	Abell 1835	21.27	20.77
7	Abell 1914	21.77	21.12
8	Abell 2034	21.62	21.06
9	Abell 2065	21.42	20.78
10	Abell 2142	21.68	21.00
11	Abell 2199	21.36	20.69
12	Abell 2219	21.64	21.07
13	Abell 2255	21.57	21.14
14	Abell 2256	20.97	20.60
15	MCXC J2211.7-0349	21.42	21.03
16	MKW3s	21.37	20.56
17	RBS1460	21.57	21.08
18	RBS1639	21.80	21.40

Tablo 3.6 Optik küme örneklemindeki her küme için hesaplanan *r* ve *i* bandı limit parlaklıkları.

No	Galaksi Kümesi	Limit Parlaklık (r)	Limit Parlaklık (i)
1	J126.86844+22.54605	21.73	21.33
2	J126.37107+47.13351	21.41	21.00
3	J132.53297+36.07048	21.77	21.43
4	J137.30312+10.97476	21.82	21.27
5	J139.47262+51.72705	21.60	21.13
6	J141.02212+14.17266	21.48	21.14
7	J155.61850+50.10551	21.45	20.89
8	J178.82501+23.40494	21.45	20.84
9	J180.10563+03.34704	21.36	20.66
10	J203.83372+41.00115	21.83	21.26
11	J231.03093+29.88897	21.46	20.82
12	J358.55704-10.41902	21.10	20.53

3.5. GAUSS KARIŞIM MODELİ (GMM)

Gauss Karışım Modeli (GMM) (ing. Gaussian Mixture Model), veri kümesinin tek bir normal dağılımla açıklanamayacak kadar karmaşık olabileceği varsayımından yola çıkarak, veriyi farklı parametrelere sahip birden fazla Gauss dağılımının birleşimi olarak modelleyen bir yöntemdir (Bishop, 2006). GMM analizinin en ayırt edici özelliği, veri noktaları ile alt popülasyonlar arasındaki ilişkinin başlangıçta bilinmediği durumlarda sergilediği olasılıksal yaklaşımdır. Alt popülasyon etiketleri önceden tanımlanmadığı için model, verinin içsel olasılık yoğunluklarını kullanarak gizli yapıları denetimsiz bir öğrenme süreciyle ayrıştırır.

Bu çalışmada, galaksi kümeleri içindeki farklı galaksi popülasyonlarını renk özelliklerine göre belirlemek amacıyla bu olasılıksal modelleme tercih edilmiştir. Bu yöntem, özellikle galaksilerin renk uzayında eliptik kümelenmeler sergilediği ve her bir alt popülasyonun kendine özgü varyans-kovaryans özelliklerine sahip olduğu durumlarda, klasik kümeleme yöntemlerine kıyasla verinin doğal dağılımını çok daha isabetli bir şekilde temsil etmektedir.

GMM analizi, temel olarak veri kümesinin tek bir yapıdan değil, K sayıda farklı normal dağılımın (Gauss bileşeninin) bir araya gelmesiyle oluştuğunu varsayar (McLachlan ve Peel, 2000). Bu modelde her bir bileşen, kendi ortalama vektörü, kovaryans matrisi ve karışım ağırlığı ile tanımlanır. Matematiksel olarak GMM şu şekilde ifade edilebilir:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^{K} \pi_k \mathcal{N}(\mathbf{x} \mid \mu_k, \Sigma_k), \tag{3.3}$$

burada π_k karışım ağırlıklarını, μ_k bileşen ortalamalarını ve Σ_k kovaryans matrislerini göstermektedir.

Bu tez çalışmasında Python programlama dili tabanlı Scikit-learn kütüphanesinden (Pedregosa ve diğ., 2011) yararlanılarak galaksi kümelerinin kırmızı(erken) ve mavi(geç) küme üyesi popülasyonlarını belirlemek amacıyla iki bileşenli ($K = 2$) bir Gauss Karışım Modeli (GMM) analizi kurgulanmıştır. Analiz, galaksilerin fiziksel karakteristiklerini temsil eden kırmızıya kayma ve $r - i$ renk değerlerinden oluşan iki boyutlu bir parametre uzayında yürütülmüştür. Çalışma alanındaki tüm galaksiler için tayfsal kırmızıya kayma değerleri mevcut olmadığından, Bölüm 3.4.1.'de tayfsal verilerle doğruluğu test edilmiş olan fotometrik kırmızıya kaymalar kullanılmıştır.

Örneklem oluşturulurken, küme popülasyonunun tamlığını (ing. completeness) korumak adına küme merkezinden itibaren 2σ kırmızıya kayma aralığı tercih edilmiştir. Bu geniş aralığın beraberinde getirdiği ön ve arka plan galaksi karışımı riskini yönetmek amacıyla, kırmızıya kayma değerleri GMM analizine doğrudan bir özellik olarak dahil edilmiştir. Böylece fotometrik veriden kaynaklanabilecek belirsizlikler, modelin istatistiksel ayrıştırma özelliği ile kontrol altına alınmıştır.

Her bir Gauss bileşeninin, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri ve verinin doğal dağılımını gerçekçi bir şekilde temsil edebilmesi için "full covariance" yapısı tercih edilmiştir. Bu seçim, modelin galaksiler arasındaki renk ve kırmızıya kayma ilişkisini sadece basit birer daire şeklinde değil, verinin gerçekteki eğimine ve yayılımına uygun eliptik şekillerde görülmesine olanak tanır. Böylece model, veriyi zorlamadan onun doğal geometrisine uyum sağlar.

Model parametrelerinin tahmininde, GMM literatüründe standart bir yaklaşım olan Beklenti-Maksimizasyonu (Expectation-Maximization; EM) algoritması uygulanmıştır (Dempster ve diğ., 1977). Bu yinelemeli süreçte algoritma, başlangıçtaki parametre tahminlerini, mevcut galaksi verileriyle kıyaslayarak her adımda daha isabetli değerlere ulaşacak şekilde günceller. Analiz kapsamında, algoritmanın istatistiksel olarak kararlı bir noktaya (yakınsama) ulaşmasını sağlamak amacıyla maksimum iterasyon sınırı yüksek tutulmuş; ayrıca sonuçların tekrarlanabilirliğini güvence altına almak için başlangıç parametreleri sabitlenmiştir.

Hesaplama sürecinin başarısı, modelin veriye ne kadar iyi uyum sağladığını gösteren log-likelihood fonksiyonu ile ölçülür. Algoritma, her iterasyonda bu toplam uyum skorunu maksimize etmeye çalışır. İki adım arasındaki log-likelihood artışının ihmal edilebilir bir düzeye ulaşması, modelin verideki alt grupları en iyi şekilde temsil eden optimum parametrelere ulaştığını gösterir. Artışın durmasıyla ulaşılan bu kararlı yapı, galaksilerin fiziksel alt popülasyonlara ayrıştırılmasındaki belirsizliği minimize ederek hesaplama sürecini sonlandırır. Bu analitik sürecin neticesinde, her bir galaksi için sınıflandırıldığı bileşene ait olma olasılığını temsil eden nicel değerler (p_{red}: kırmızı/erken tür popülasyonuna ait olma olasılığı; p_{blue}: mavi/geç tür popülasyonuna ait olma olasılığı) elde edilmiştir. Bu olasılıklar, galaksilerin küme üyeliği konusundaki belirsizliği istatistiksel bir çerçevede tanımlamamıza olanak tanır. Analiz sonucu elde edilen örneklemin güvenilirliğini artırmak

ve yanlış pozitif üye atamalarını minimize etmek amacıyla, $p \geq 0.70$ şeklinde bir seçim eşiği uygulanmıştır. Bu yüksek olasılık kriterinin seçilmesinin nedeni, küme üyeliği şüpheli olabilecek galaksileri örneklem dışı bırakmak, fiziksel açıdan birbiriyle tutarlı ve istatistiksel olarak homojen galaksi popülasyonları oluşturmaktır. Sonuç olarak, GMM ile istatistiksel ayrıştırma uygulanmış bu nihai örneklemde, fotometrik veriden kaynaklanabilecek gürültünün de filtrelenmesi amaçlanmıştır.

4. BULGULAR

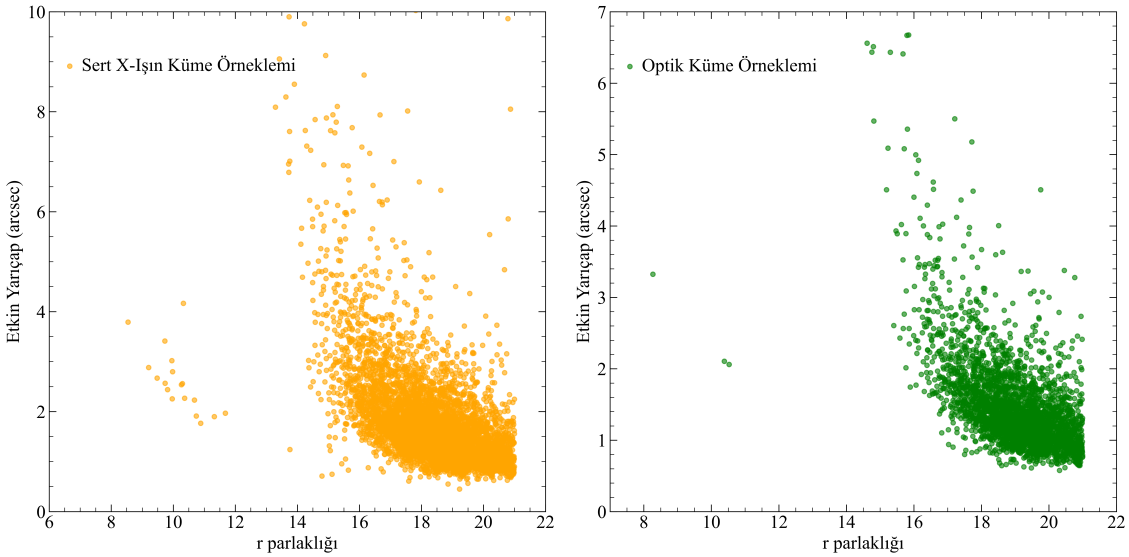
4.1. KÜME ÜYESİ GALAKSİLERİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde, Bölüm 3.4.'te ayrıntıları verilen SDSS DR17 veritabanı kullanılarak elde edilen; bulunduğu kümenin kırmızıya kaymasıyla uyumlu, R_{200} yarıçapı içerisinde yer alan ve SDSS parlaklık limitinden daha parlak olan cisimler incelenmiştir. Bu kapsamda, sert X-ışını örnekleminde 5167, optik küme örnekleminde ise 3105 olmak üzere toplam 8272 cismin, SDSS fotometrik veri işleme hattından kaynaklanabilecek olası yanlış sınıflandırmaları değerlendirilmiştir.

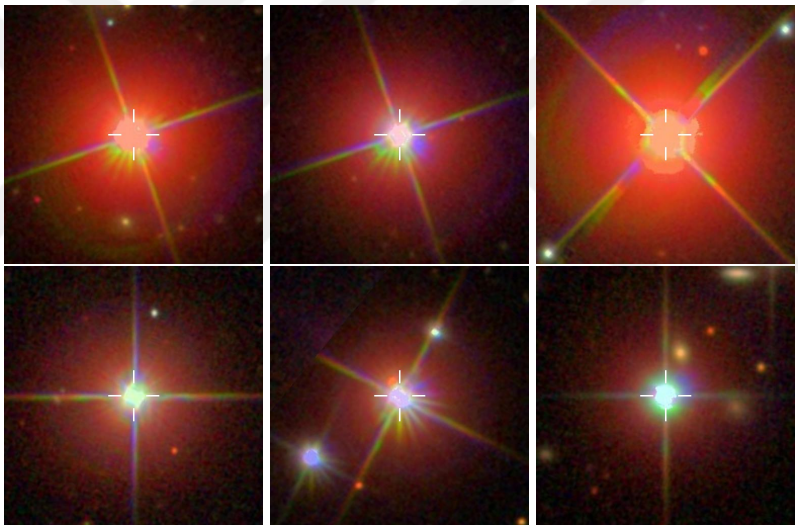
SDSS fotometrik veri işleme hattı, tespit edilen her kaynağa bir sınıflandırma (yıldız, galaksi veya kuazar) atamakta ve doygunluk, ayrıştırma (ing. deblending) hataları, artefaktlar ya da kozmik ışın bulaşması gibi ölçüm problemlerini tanımlayan bir dizi fotometrik kalite etiketi üretmektedir (Stoughton ve diğ., 2002). Bu nedenle, yalnızca "GALAXY" sınıflandırmasına dayanarak kaynak seçimi yapmak, sağlam bir bilimsel örneklem oluşturmak için yeterli değildir. Bu durumu sınamak amacıyla, oluşturulan örneklemdeki cisimlerin r bandı parlaklıklarına bağlı etkin yarıçapları incelenmiştir. Sert X-ışın kümeleri ile kontrol örneklemi olarak kullanılan optik kümeler için parlaklığa bağlı etkin yarıçap dağılımları **Şekil 4.1**'de verilmiştir. Her iki dağılımın parlak ucunda yer alan ve galaksi bulutundan ayrılmış cisimler, örneklem içinde bulunan yanlış sınıflandırılmış yıldızlardır (**Şekil 4.2**). Bu durum, yıldız–galaksi ayrımında yalnızca katalog temelli sınıflandırmaların her zaman yeterli olmayabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, elde edilen başlangıç örnekleminin saflığını artırmak amacıyla bir dizi işlem uygulanmıştır.

4.1.1. SDSS Temiz Fotometri Yaklaşımı

Galaksi örneklemlerinin fotometrik açıdan güvenilir biçimde oluşturulabilmesi için SDSS tarafından önerilen yaklaşımlardan biri Temiz Fotometri (ing. Clean Photometry) sorgusudur. Bu yaklaşım; doygunluk, hatalı merkez belirleme, ayrıştırma sorunları, interpolasyon problemleri ve kozmik ışın bulaşması gibi fotometrik ölçümleri olumsuz etkileyebilecek durumları işaretleyen belirli kalite etiketlerini taşıyan kaynakları örneklemden dışlamayı



Şekil 4.1 Her iki örneklemin *r* bandı parlaklıklarına bağlı etkin yarıçap dağılımları.



Şekil 4.2 Örneklem içerisine karışmış SDSS tarafından yanlış sınıflandırılan yıldızlar.

amaçlar. Böylece, otomatik sorgular aracılığıyla daha güvenilir ve homojen bir örneklem elde edilmesi hedeflenir[6] .

Bu çalışmada, Temiz Fotometri yaklaşımı r-bandı gözlemleri için uygulanmış olup, güvenilirliği düşük veya problemli fotometrik ölçümler içeren cisimlerin örneklemden dışlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, yüksek sinyal/gürültü oranına sahip cisimleri ifade eden `BINNED1` koşulu zorunlu tutulmuş; böylece zayıf, düşük çözünürlüklü veya düşük sinyal/gürültüye sahip cisimler dışlanmıştır. Fotometrik ölçümleri olumsuz etkileyebilecek `PEAKCENTER`, `NOTCHECKED`, `PSF_FLUX_INTERP`, `BAD_COUNTS_ERROR`,

[6] https://www.sdss4.org/dr17/tutorials/flags/

NOPROFILE ve SATURATED etiketlerini taşıyan cisimler örneklemden çıkarılmıştır. Buna ek olarak, düşük sinyal/gürültü oranlarında hatalı ayrıştırma durumlarını temsil edebilen DEBLEND_NOPEAK etiketine sahip cisimler yalnızca fotometrik belirsizlikleri yeterince küçükse (psfMagErr_r ≤ 0.2) örnekleme dahil edilmiş; merkez fotometrisini olumsuz etkileyebilecek INTERP_CENTER ve COSMIC_RAY etiketlerini eş zamanlı olarak taşıyan cisimler ise örneklemin dışında bırakılmıştır. Bu ölçütler, fotometrik güvenilirliği artırmaya yönelik görece katı etiket temelli bir filtreleme sürecini tanımlamakta olup, kullanılan etiketlerin anlamları **Tablo 4.1**'te verilmiştir.

Başlangıç örneklemine uygulanan kırmızıya kayma aralığı kriteri, R_{200} yarıçapı ve parlaklık limiti kriterleri uygulanarak gerçekleştirilen Temiz Fotometri sorgulaması sonucunda sert X-ışın ve optik küme örneklemlerini oluşturan 30 galaksi kümesi için toplam 7689 cisim elde edilmiştir. Bu durum, bir önceki adımda tanımlanan 8272 cismin 583'ünün Temiz Fotometri kriterleri tarafından dışlandığını göstermektedir.

Temiz Fotometri tarafından dışlanan 583 cismin *r*-bandı fotometrik kalite etiketleri ayrıntılı biçimde incelenmiş ve etiketlerin dağılımı **Tablo 4.2**'te sunulmuştur. *r*-bandına ait etiket bilgisi, hem bitmask biçimindeki flags_r değeri hem de SDSS tarafından sağlanan dbo.fPhotoFlagsN(p.flags_r) fonksiyonu aracılığıyla elde edilen çözümlenmiş metinsel karşılıkları kullanılarak analiz edilmiştir. SDSS fotometrik kataloğunda kalite etiketleri her bant için 64-bitlik bir tam sayı ile kodlanmakta olup, her bit belirli bir fotometrik durum veya uyarı etiketine karşılık gelmektedir; bu nedenle tek bir kaynak birden fazla kalite etiketi taşıyabilmektedir.

Bit düzeyinde gerçekleştirilen analizde, flags_r değerindeki etkin bitler belirlenerek ilgili SDSS etiket tanımları (örneğin SATURATED, INTERP_CENTER) ile eşleştirilmiştir. Süreç Python ortamında otomatikleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, SDSS'in sağladığı metinsel etiket çözümleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Böylece fotometrik kalite etiketlerinin örneklem içindeki frekansları ve birlikte-görülme (ing. co-occurrence) örüntüleri nicel olarak değerlendirilmiştir.

Etiket temelli analizlere ek olarak, Temiz Fotometri tarafından dışlanan tüm cisimlerin görüntüleri SDSS Region kütüphanesi kullanılarak elde edilmiş ve ilgili fotometrik etiket bilgileriyle birlikte görsel olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, Temiz Fotometri tarafından dışlanan 583 cisimden 399'unun (%68.4) görüntülerinde belirgin bir problem

Tablo 4.1 SDSS Temiz Fotometri sorgusu kalite etiketleri, anlamları ve kullanım amaçları.

Fotometrik Etiket	Tanımı	Kullanım Amacı
BINNED1	Arka plan gürültüsünün 5σ algılama eşiğini sağlayan, sinyal/gürültü oranı yüksek, gerçek astronomik kaynaklara karşılık gelen cisimleri tanımlar.	Bu etikete sahip olan cisimler örnekleme dahil edilir. Olumlu bir etikettir.
NOPROFILE	Cisim çok küçük olduğu veya görüntü karesinin kenarına çok yakın bulunduğu için radyal parlaklık profili hesaplanamamıştır.	Fotometrik verilerin hatalı olabileceği anlamına gelir. Bu etikete sahip cisimler veriden çıkarılır. Ancak elde edilen cisimlerin hiçbiri bu bayrağı taşımamaktadır.
PEAKCENTER	İlgili cismin merkezi, istatistiksel bir merkez belirleme yerine görüntüdeki en parlak piksel konumu olarak atanmıştır. Bu durum, genellikle parlak bir kaynaktan ayrıştırılan küçük ve zayıf cisimlerde görülmekte olup, PEAKCENTER etiketi ile işaretlenmektedir.	Bu etiket, söz konusu cismin gerçek bir astrofiziksel kaynak olmayabileceğine dair bir uyarı niteliği taşımaktadır.
NOTCHECKED	Deblending algoritması bazı pikselleri inceleyememiş ya da işleme dahil edememiştir.	Cismin gerçek ışık profili güvenilir olmayabilir. Bu da yanlış sınıflandırmaya sebep olabilir. Bu etikete sahip cisimler bu sorgulamayla veriden elenmiştir.
PSF_FLUX_INTERP	PSF akısının %20'den fazlası interpolasyonla doldurulmuştur. Bu durum, akı ölçümünün doğruluğu konusunda şüphe uyandırabilmektedir.	Uygulamada, bu etikete sahip cisimlerin çoğunda PSF fotometrisi yeterli olmakla birlikte, aykırı değerlerin görülme sıklığı artabildiği için elenmiştir.
SATURATED	Cisim bir veya birden fazla doymuş piksel içermektedir.	Yıldız ve galaksi ayrımını etkileyebilir. Bu etikete sahip cisimler bu sorgulamayla veriden elenmiştir.
BAD_COUNTS_ERROR	Birçok piksel doygunluk, kozmik ışın, sensör hatası veya parlak komşu cisim etkisi nedeniyle güvenilir değildir.	Fotometrisi güvenilmezdir. Bu etikete sahip cisimler elenmiştir.
DEBLEND_NOPEAK	Cisim, deblending işlemi sonucunda "CHILD" alt bileşeni olarak oluşturulmuş, ancak bir tepe noktasına sahip değildir.	Cisim hatalı deblending içerebilir. Bu etikete sahip cisimler genellikle elenir; ancak r bandı PSF parlaklık hatası psfMagErr_r için ≤ 0.2 koşulunu sağlayanlar örnekleme dahil edilmiştir.
INTERP_CENTER	Cismin merkezinin 3 piksel yakınında interpolasyon uygulanmış pikseller bulunmaktadır.	Merkez ışık profili güvenilir olmayabilir. Cisim aynı anda COSMIC_RAY etiketini de taşıyorsa veriden elenmiştir.
COSMIC_RAY	Cisim kozmik ışın olarak yorumlanan bir piksel içermektedir.	Tek başına fotometriyi bozmaz; ancak INTERP_CENTER ile birlikte bulunuyorsa veriden elenmiştir.

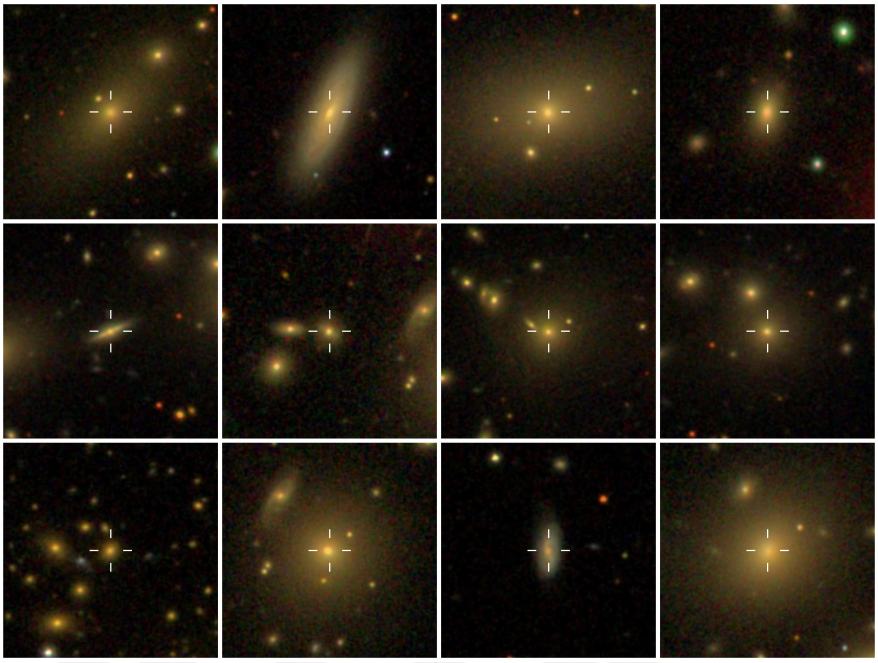
Tablo 4.2 Temiz Fotometri tarafından veriden dışlanan 583 cismin ayıklanmasına neden olan fotometrik etiketlerin dağılımı.

Fotometrik Etiket	**Cisim Sayısı**
BINNED1=0	15
NOPROFILE=1	0
PEAKCENTER=1	168
PSF_FLUX_INTERP=1	129
NOTCHECKED=1	173
SATURATED=1	144
BAD_COUNTS_ERROR=1	5
DEBLEND_NOPEAK=1 & psfMagErr_r $>$ 0.2	25
INTERP_CENTER=1 & COSMIC_RAY=1	31

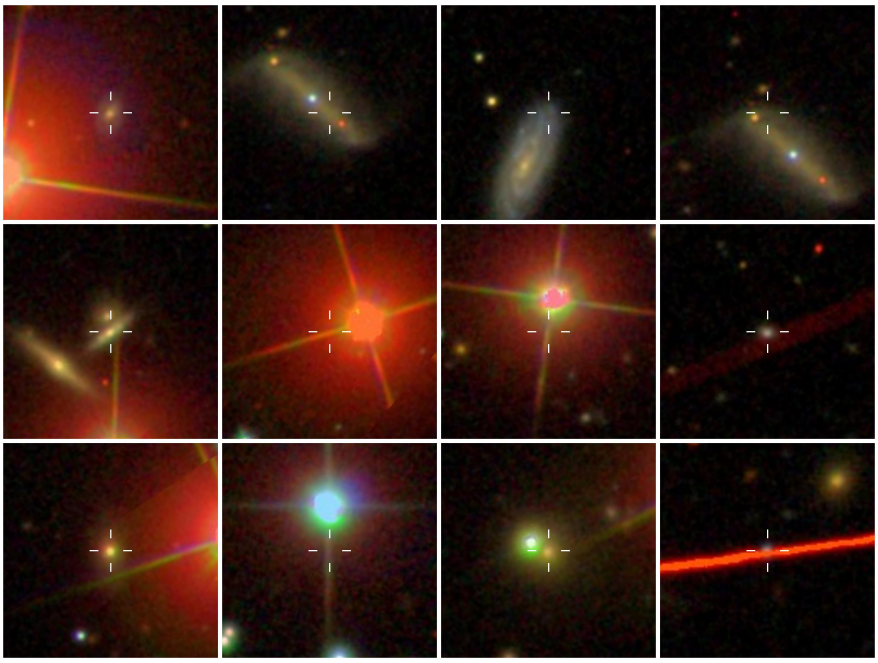
göstermediği ve galaksi olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir (**Şekil 4.3**). Buna karşılık, 184 cisim (%31.6) artefaktlar, yıldız bulaşması veya parlak yıldızlara yakınlık gibi nedenlerle fotometrik açıdan güvenilmez olarak sınıflandırılmıştır; bu gruba ait bazı örnek görüntüler **Şekil 4.2**'de sunulmuştur. Bu bulgular, yoğun galaksi kümesi ortamlarında Temiz Fotometri yaklaşımının yalnızca açıkça problemli kaynakları değil, aynı zamanda bilimsel çalışmanın amacına bağlı olarak kullanılabilecek kayda değer bir oranda galaksiyi de örneklem dışında bırakabildiğini göstermektedir.

Bu motivasyon doğrultusunda, Temiz Fotometri uygulandıktan sonra elde edilen ve toplam 7689 cisimden oluşan "temiz" örneklemin tamamı da görsel olarak incelenmiştir. Öznel yanlılığı en aza indirmek amacıyla, beş deneyimli araştırmacı görüntüleri bağımsız biçimde değerlendirmiş ve ortak bir çerçeve benimsenmiştir. Bu inceleme sonucunda, temiz örneklemde 450 cismin (%5.8) gerçekte artefaktlar içerdiği ya da problemli bölgelerde yer aldığı ve bu nedenle örneklemden dışlanması gerektiği belirlenmiştir (**Şekil 4.4**). Bu strateji, bir yandan Temiz Fotometri tarafından dışlanan galaksilerin yeniden değerlendirilmesine olanak sağlamış, diğer yandan ise Temiz Fotometri kriterlerini sağlamasına rağmen örneklemde kalan problemli cisimlerin örneklemden dışlanması gerektiğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular doğrultusunda, örneklem içerisindeki problemli cisimlerin yüksek doğrulukla ayıklanmasını sağlayabilecek yeni bir etiket temelli sorgulama yaklaşımının geliştirilebilirliğini değerlendirmek amacıyla üç farklı alt örneklem tanımlanmıştır: (i) fotometrik ve görsel inceleme sonucunda güvenilir olduğu belirlenen "temiz" galaksiler, (ii)



Şekil 4.3 Temiz fotometrinin dışladığı galaksilerin bazılarının SDSS görüntüleri.



Şekil 4.4 Temiz Fotometri örneklemine dahil olan, ancak görüntü incelemesi sonucu fotometrisi problemli olduğu belirlenen cisimlerden bazılarının SDSS görüntüleri.

Tablo 4.3 Görsel inceleme öncesi ve sonrası farklı örneklemlerin özeti.

	Cisim Sayısı	**Oran (%)**
Başlangıç örneklemi	8272	100.0
Temiz fotometri	7689	92.9
Temiz fotometri ile dışlananlar	583	7.1
Temiz fotometri örneklemi	7689	100.0
Görsel inceleme ile onaylananlar	7239	94.1
Görsel inceleme ile dışlananlar	450	5.9
Temiz fotometri ile dışlananlar	583	100.0
Geri kazanılmış galaksiler	399	68.6
Reddedilen cisimler	184	31.4
Alt örneklemler		
Temiz galaksiler	7239	87.6
Geri kazanılmış galaksiler	399	4.8
Problemli cisimler	634	7.6

Temiz Fotometri tarafından dışlanmış olmasına rağmen görsel inceleme ile galaksi olduğu doğrulanan ve örnekleme yeniden dahil edilen geri kazanılmış galaksiler ve (iii) artefaktlar, yıldız bulaşması veya problemli bölgeler nedeniyle dışlanması gereken cisimler. Sonuçta 7239 temiz galaksi, 399 geri kazanılmış galaksi ve 634 problemli cisimden oluşan üç ayrı alt örneklem elde edilmiştir. Bu alt örneklemlerin sayısal dağılımı **Tablo 4.3**'te özetlenmiştir.

Sonuç olarak, Temiz Fotometri kriterlerinin küme galaksi popülasyonuna uygulanması iki temel sınırlamanın varlığını göstermiştir. İlk olarak, Temiz Fotometri'de kullanılan bazı fotometrik etiketler belirli durumlarda, küme popülasyonunun önemli bir kısmını oluşturan fiziksel olarak anlamlı galaksilerin dışlanmasına yol açabilmektedir (**Şekil 4.3**). İkinci olarak, görsel inceleme, "temiz" olarak etiketlenen örneklemin otomatik sınıflandırma ve fotometrik ölçümler açısından problemli olabilecek cisimler içerebildiğini göstermektedir (**Şekil 4.4**). Bu durum, özellikle karmaşık yapılar, karışma (ing. blending) etkileri veya merkez belirleme problemleri söz konusu olduğunda, temiz etiketi taşıyan cisimlerin morfoloji ya da sınıflandırma açısından mutlak güvenilir olmadığına işaret etmiştir. Dolayısıyla, Temiz Fotometri yaklaşımının tek başına kullanımı, bu çalışma için, hem örneklem tamlığını hem de saflığını aynı anda koruyarak temiz ve güvenilir bir galaksi örneklemi oluşturma konusunda sınırlı kalmıştır.

4.1.2. Ek Fotometrik Etiketlerin Önerilmesi

Bölüm 4.1.1.'de elde edilen sonuçlardan hareketle, Temiz Fotometri yaklaşımını daha hedefli bir filtreleme stratejisiyle genişletmek ve analizlerde kullanılacak galaksileri sistematik bir biçimde belirlemek amacıyla, görsel incelemeler sonucunda tanımlanan üç alt örneklemin fotometrik kalite etiketleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu analizler sayesinde, Temiz Fotometri sorgusunun örneklem üzerindeki etkisi ve sınırlamaları nicel olarak değerlendirilebilmiştir. **Tablo 4.4**, SDSS tarafından örneklemdeki cisimlere atanan tüm fotometrik kalite etiketlerinin alt örneklemler bazında dağılımını sunmaktadır. Bazı kalite etiketleri herhangi bir cisim için aynı anda bulunabildiğinden, tablodaki toplam etiket sayıları ilgili alt örneklemlerdeki cisim sayılarını aşabilmektedir.

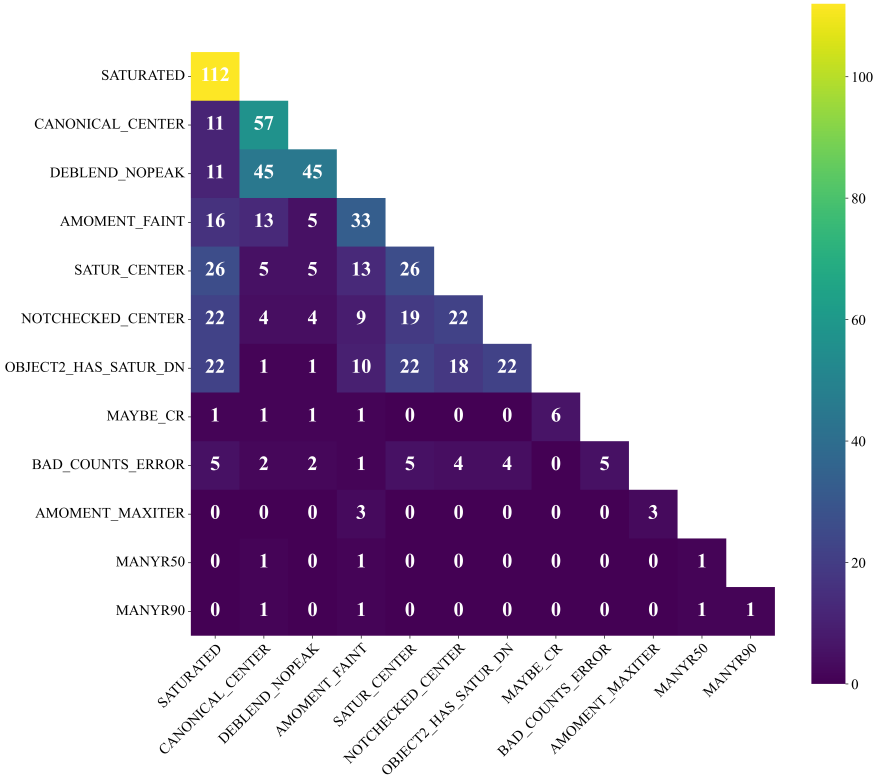
Tablo 4.4, son sütununda verilen ΔN değeri, örneklemde tutulması hedeflenen cisimler (temiz ve geri kazanılmış galaksiler) ile dışlanması gereken problemli cisimler arasındaki sayısal farkı göstermektedir. Bu bağlamda izlenen temel strateji, problemli cisimlerde daha yüksek oranda görülen ve güvenilir galaksilerde nadir bulunan kalite etiketlerini belirlemek ve örneklem saflığını artırırken galaksi kaybını en aza indirecek yeni bir sorgulama yaklaşımının geliştirilmesini amaçlamaktadır.

Belirlenen bu etiketlerin birbirleriyle olan ilişkilerini değerlendirmek amacıyla birlikte-görülme analizi gerçekleştirilmiştir. Problemli örneklemde sık karşılaşılan etiket kombinasyonlarını gösteren birlikte-görülme matrisi **Şekil 4.5**'te sunulmuştur. Bu analiz, bazı etiketlerin tek başına ya da belirli kombinasyonlar halinde problemli ölçümleri temsil edebildiğini göstermekte; böylece dışlama kriterlerinin daha tutarlı biçimde tanımlanmasına ve gereksiz veya tekrarlı koşulların azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Bu bulgular doğrultusunda, Temiz Fotometri yaklaşımının sınırlamalarını azaltmaya ve problemli cisimleri daha seçici biçimde ayıklamaya yönelik yeni bir SQL sorgusu tasarlanmıştır. Sorgunun oluşturulmasında, problemli örneklemde daha yüksek sıklıkta görülen ve büyük negatif ΔN değerlerine sahip fotometrik kalite etiketleri öncelikli olarak dikkate alınmıştır. Birlikte-görülme analizi, `SATURATED` etiketinin problemli örneklemde en baskın etiket olduğunu, `SATUR_CENTER`, `OBJECT2_HAS_SATUR_DN`, `NOTCHECKED_CENTER` ve `BAD_COUNTS_ERROR` gibi etiketlerin etkilerini büyük ölçüde kapsadığını göstermektedir;

Tablo 4.4 Belirlenen alt örneklemlerin fotometrik etiketlerinin dağılımı.

Fotometrik Etiket	**Temiz Örneklem**	**Geri Kazanılmış Galaksiler**	**Problemli Örneklem**	ΔN
TOPLAM CİSİM SAYISI	**7239**	**399**	**634**	
BINNED1	7239	398	620	7019
CANONICAL_BAND	7239	398	623	7016
MEDIAN_CENTER	7082	390	551	6923
BAD_RADIAL	6831	385	582	6636
CHILD	4180	245	512	3915
BRIGHTEST_GALAXY_CHILD	3164	106	223	3047
INTERP	1430	234	230	1436
BLENDED	1015	62	128	949
COSMIC_RAY	588	104	101	593
PETROFAINT	415	34	59	390
DEBLEND_PRUNED	347	27	15	359
NODEBLEND	347	27	15	359
GROWN_MERGED	256	15	61	210
NOPETRO	189	11	74	126
MANYPETRO	182	19	20	183
TOO_LARGE	150	20	6	164
NOPETRO_BIG	123	9	42	90
SUBTRACTED	72	44	104	14
DEBLENDED_AS_PSF	62	14	47	29
ELLIPFAINT	36	5	25	16
EDGE	22	120	45	98
INTERP_CENTER	21	103	41	84
BINNED2	19	3	3	19
CANONICAL_CENTER	10	6	57	-41
DEBLEND_NOPEAK	9	5	45	-31
INCOMPLETE_PROFILE	6	6	0	12
MAYBE_EGHOST	4	0	2	2
BINNED4	2	1	1	2
NOTCHECKED	0	127	45	84
SATURATED	0	31	112	-79
AMOMENT_FAINT	0	1	33	-32
AMOMENT_MAXITER	0	0	3	-3
BAD_COUNTS_ERROR	0	0	5	-5
MANYR50	0	0	1	-1
MANYR90	0	0	1	-1
MAYBE_CR	0	0	6	-6
NOTCHECKED_CENTER	0	0	22	-22
OBJECT2_HAS_SATUR_DN	0	0	22	-22
PEAKCENTER	0	154	14	140
PSF_FLUX_INTERP	0	94	35	59
SATUR_CENTER	0	0	26	-26



Şekil 4.5 Problemli örneklemde, temiz veri ile geri kazanılmış galaksilere göre daha fazla bulunan fotometrik etiketlerin birlikte görülme matrisi.

dolayısıyla bu etiketleri taşıyan kaynaklar sadece `SATURATED` koşulu ile dışlanmaktadır. Benzer şekilde, `CANONICAL_CENTER` etiketinin `DEBLEND_NOPEAK`, `MANYR90` ve `MANYR50` etiketlerini kapsadığı görülmüştür. Buna karşılık, `AMOMENT_FAINT` ve `MAYBE_CR` etiketlerinin başka tekil bir etiket tarafından sistematik biçimde temsil edilmediği ve bu nedenle filtreleme sürecine bağımsız olarak dahil edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Bu değerlendirmeler sonucunda, problemli cisimlerin etkin biçimde elenmesini sağlayan ve birbirini tekrar etmeyen dört temel fotometrik kalite etiketi tanımlanmıştır: `SATURATED`, `CANONICAL_CENTER`, `AMOMENT_FAINT` ve `MAYBE_CR`. Önerilen SQL sorgusu bu etiketler temel alınarak oluşturulmuştur. Buna ek olarak, SDSS fotometrik işlem hattında güvenilir tespitleri temsil eden `BINNED1` koşulu, zorunlu bir seçim ölçütü olarak sorguya dahil edilmiştir.

Bu sorgunun uygulanması sonucunda, 7239 temiz galaksiden 10'u, 399 geri kazanılmış galaksiden 37'si ve 634 problemli cisimden 171'i örneklemden çıkarılmıştır. Buna göre, temiz örneklemde %0.2, geri kazanılan galaksilerde ise %9.3 oranında bir kayıp yaşanırken, problemli cisimlerin %27'si örneklemden dışlanmıştır. Bu aşama sonunda nihai örneklem,

7229 temiz galaksi (%99.8 korunmuş) ve 362 geri kazanılmış galaksi (%90.7 korunmuş) içermektedir.

Başka bir ifadeyle yeni sorgu, Temiz Fotometri tarafından dışlanan cisimler içinde galaksilerin yaklaşık %91'ini örneklemde tutarken, problemli 184 cismin 141'ini (%77) etkin biçimde örneklemden çıkarmıştır. Buna karşılık, Temiz Fotometri örnekleminde kalmış olan 450 problemli cismin yalnızca 33'ü (%7) bu sorgu ile dışlanabilmiştir. Bu sonuçların ayrıntılı dökümü **Tablo 4.5**'te sunulmuştur.

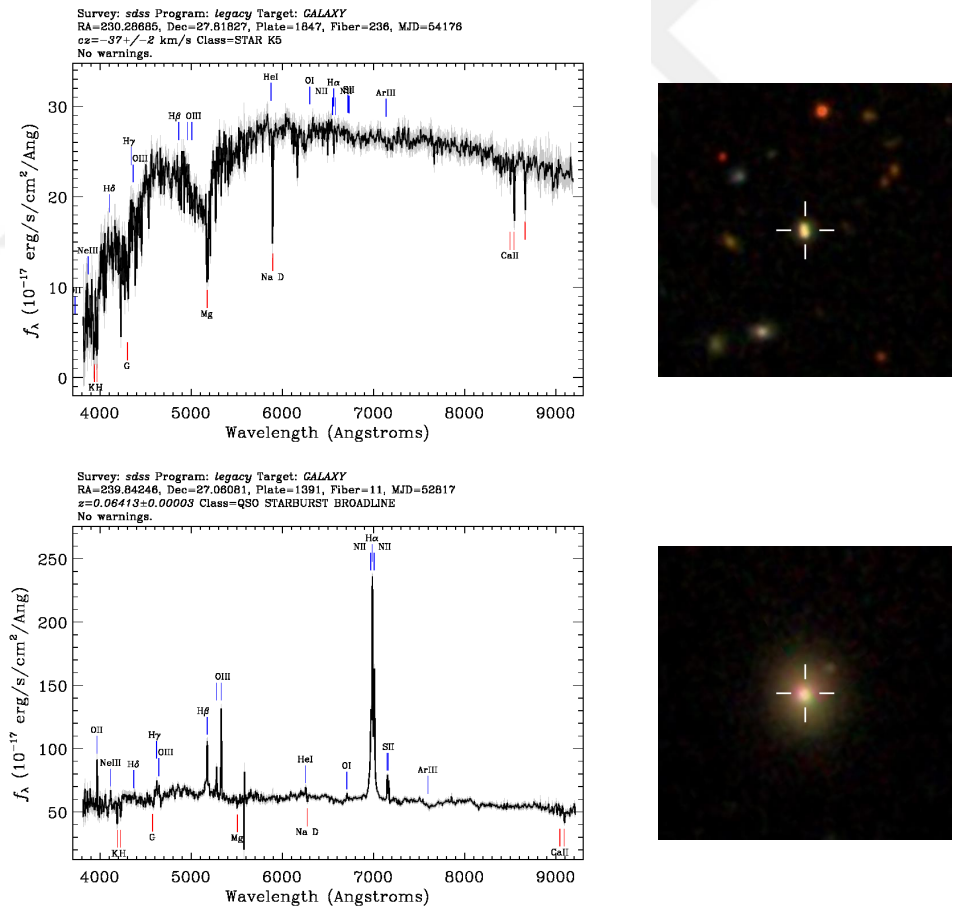
Tablo 4.5 Önerilen yeni SQL sorgusunun alt örneklemler üzerindeki sonuçları.

Alt örneklem	**Başlangıç N**	**Dışlanan N (%)**	**Korunan N (%)**
Analiz edilen toplam cisim sayısı	8272	218 (2.7)	8054 (98.3)
Temiz galaksiler	7239	10 (0.2)	7229 (99.8)
Geri kazanılmış galaksiler	399	37 (8.9)	363 (91.1)
Problemli cisimler	634	171 (29.6)	463 (70.4)
Temiz Fotometri tarafından dışlanan	184	141 (77.0)	43 (23.0)
Görsel inceleme ile dışlanan	450	30 (7.9)	420 (92.1)

Sonuç olarak, yeni sorgulama ile gerçekleştirilen analizler, problemli cisimlerin yalnızca fotometrik etiketler kullanılarak tamamen ayıklanmasının her durumda yeterli olmayabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, daha büyük örneklemlerle çalışılan ve görsel incelemenin pratik olmadığı durumlarda, örneklem tamlığını olumsuz etkileyebilecek durumları en aza indirmek amacıyla bu çalışmada önerilen etiket yaklaşımının kullanılabileceği değerlendirilmektedir (Atalı ve Aliş, 2026). Ancak bu tez kapsamında görüntü incelemeleri gerçekleştirildiğinden, sorgulama temelli filtreleme yerine görüntü temelli doğrulanmış cisimler örnekleme dahil edilmiştir. Bu doğrultuda, 7239 temiz cisim ile 399 geri kazanılmış galaksi bir sonraki aşamada kullanılacak örneklemi oluşturmuştur. Ancak geri kazanılmış galaksiler arasında yer alan ve `SATURATED` etiketine sahip 31 cisim, doygun piksel değerleriyle fotometrik ölçüm güvenilirliğini etkiledikleri için örneklemden çıkarılmıştır. Böylece her iki örneklem için toplam 7607 cisim için görüntü incelemelerine dayalı bir örneklem tanımlanmıştır. Bir sonraki bölümde, örneklemin saflığını arttırmak amacıyla görüntü incelemesiyle ayırt edilemeyen olası yıldız ve kuasar karışımlarını araştırmak için uygulanan ek ayıklama işlemleri ele alınmıştır.

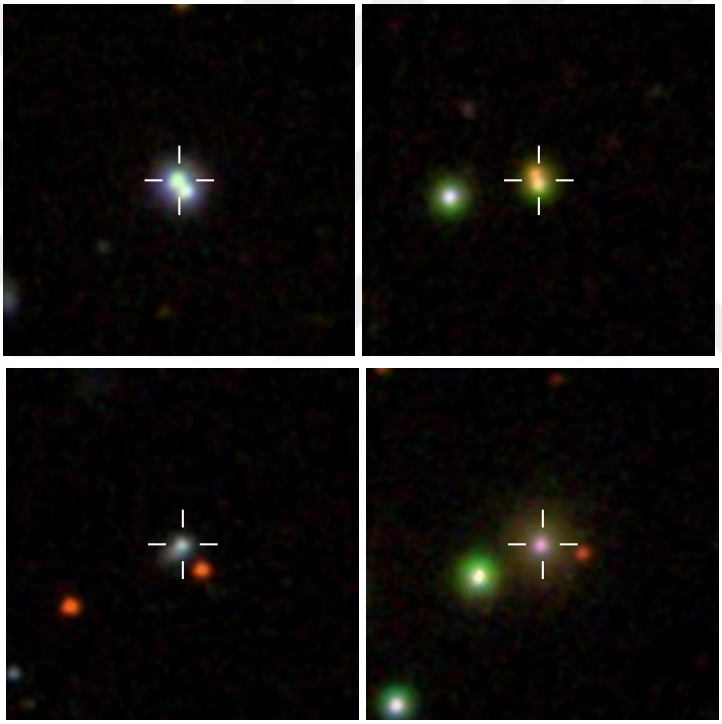
4.1.3. Örneklemin Ek Verilerle Ayıklanması

Görüntü incelemeleri sonucunda oluşturulan örneklemde, görsel olarak ayırt edilemeyen olası yıldız ve kuazar karışımlarını belirlemek amacıyla SDSS tayfsal verileri ve Gaia DR3 (Data Release 3) (Gaia Collaboration ve diğ., 2023) sınıflandırma parametreleri kullanılmıştır. SDSS tayfsal verileri, fotometrik sınıflandırmalara kıyasla daha güvenilir bir referans sunduğundan, galaksi dışı cisimlerin belirlenmesinde ek bir doğrulama aracı olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, örneklemde yer alan cisimlerin SDSS tayfsal sınıfları incelenmiş ve 2 cismin `STAR`, 7 cismin ise `QSO` olarak sınıflandırıldığı belirlenmiştir. Bu cisimlere ait örnekler **Şekil 4.6**'da SDSS tayflarıyla birlikte sunulmuştur. Tayfsal olarak galaksi sınıfından farklı olduğu belirlenen bu kaynaklar örneklemden çıkarılmıştır.



Şekil 4.6 Fotometrik olarak `GALAXY` sınıfında yer almasına rağmen SDSS tayfsal veritabanında farklı sınıflara atanmış cisimlere ait temsili örnekler. Üst panelde tayfsal olarak `STAR` sınıfında, alt panelde ise `QSO` sınıfında yer alan örnek cisimler gösterilmektedir.

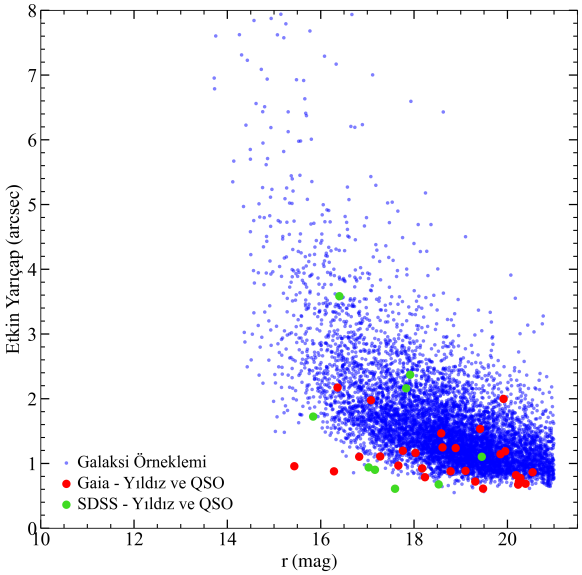
Buna ek olarak, yüksek hassasiyetli astrometrik ölçümler sağlayan Gaia uydu teleskobunun paralaks ve öz hareket bilgileri kullanılarak yıldızlar, galaksi dışı kaynaklardan ayırt edilmiştir. Bu amaçla, Gaia DR3 Astrofiziksel Parametreler[7] (Astrophysical Parameters) kataloğunda sunulan Cisim Sınıflandırma (Object Classification; DSC AllosMod) parametreleri ile çapraz eşleştirme yapılmış ve astrometrik ile fotometrik bilgilere dayalı olasılıksal sınıflandırmalar incelenmiştir. Böylece, yıldız olma olasılığı $PStar - A \geq 0.5$ değerine sahip 24 cisim örneklemden çıkarılmıştır. Buna ek olarak, karakteristik fotometrik özellikleri ile belirlenen kuazar olma olasılığı $PQSO - A \geq 0.5$ değerine sahip 3 cisim daha örneklem dışında bırakılmıştır. Yıldız ve kuazar olarak sınıflandırılan bazı cisimlerin SDSS görüntüleri **Şekil 4.7**'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 Gaia DR3 kataloğu kullanılarak tespit edilen yüksek olasılıklı yıldız ve kuazarların bazılarının SDSS görüntüleri. Üstteki cisimler yıldız, alttaki cisimler kuazar örnekleridir.

Bu analizler sonucunca yanlış sınıflandırıldığı belirlenen cisimlerin r parlaklığına bağlı etkin yarıçapları incelenmiştir. **Şekil 4.8**'de gösterildiği üzere, yıldız ve kuazar olarak sınıflandırılan cisimlerin büyük çoğunluğu küçük etkin yarıçap değerlerinde yoğunlaşmakta ve bir kısmı ise galaksi örnekleminin oluşturduğu ana dağılım içerisinde bulunmaktadır. Özellikle $\sim$ 1 yay-saniyesinin altındaki etkin yarıçap değerlerinde yer alan cisimler, noktasal

[7] https://gaia.aip.de/



Şekil 4.8 *r* bandı parlaklığına bağlı etkin yarıçap dağılımı. Mavi noktalar galaksi örneklemini, kırmızı noktalar Gaia, yeşil noktalar ise SDSS tarafından yıldız veya kuazar olarak sınıflandırılan cisimleri göstermektedir.

yapıları ile geniş açılı galaksi dağılımından farklı bir morfolojik davranış sergilemektedir.

Sonuç olarak, SDSS tayfsal sınıflandırmaları ile Gaia olasılıksal parametreleri birlikte değerlendirilerek yıldız ve kuazar karışımları örneklemden ayıklanmış, sert x-ışın örnekleminde 4642, optik kontrol örnekleminde 2929 olmak üzere toplam 7571 galaksi ile son örneklem elde edilmiştir.

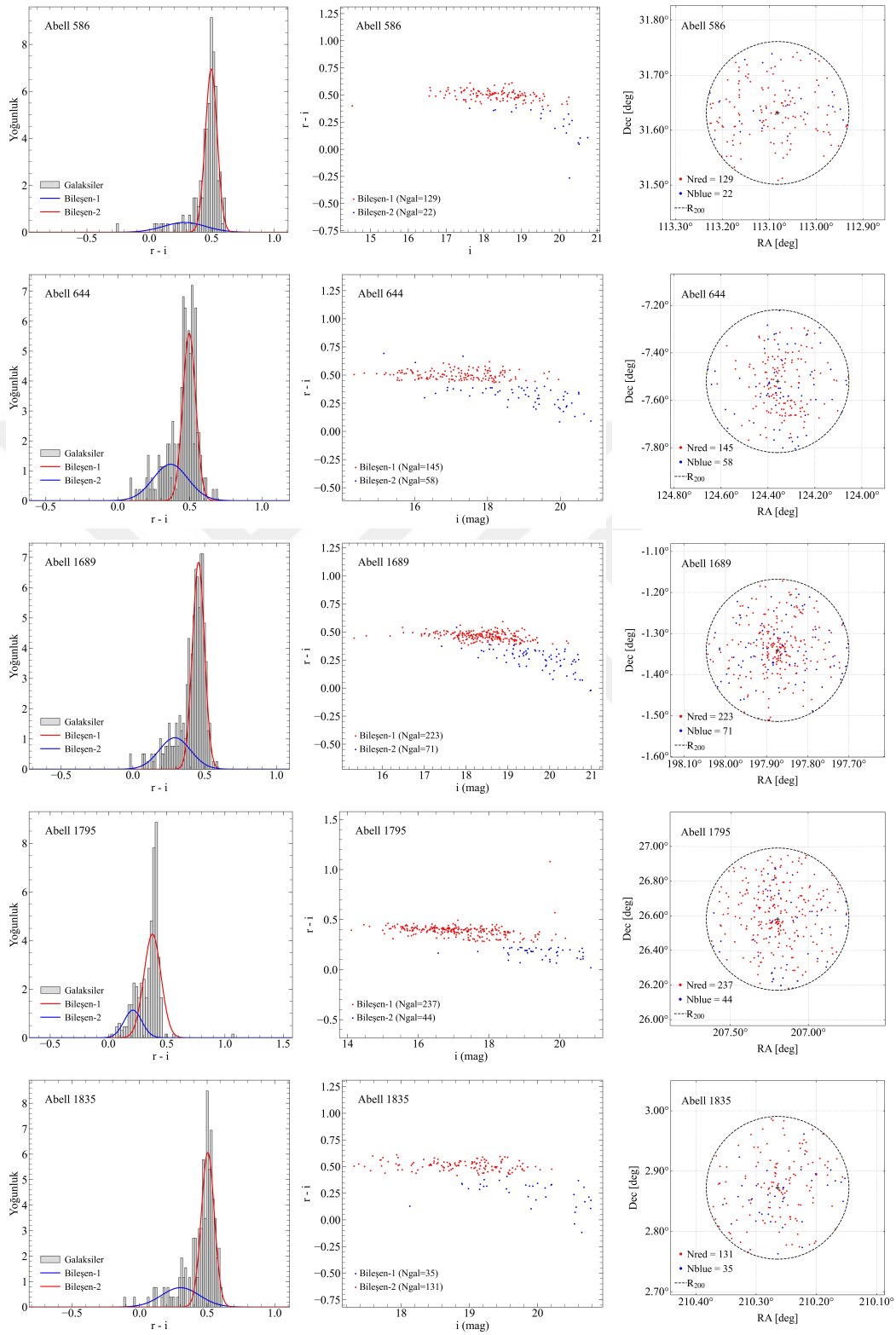
4.2. KÜME ÜYESİ GALAKSİLERİN POPÜLASYONLARININ BELİRLENMESİ

Görüntü incelemeleri ile SDSS ve Gaia verileri kullanılarak gerçekleştirilen ayıklama işlemlerinin ardından elde edilen son örneklemi oluşturan sert X-ışın galaksi kümeleri ile optik kontrol kümeleri için ayrı ayrı Gaussian Karışım Modeli (GMM) analizi uygulanmıştır. Analizlerde galaksilerin fotometrik kırmızıya kaymaları ve $r-i$ renkleri temel alınmış; iki değişkenli ve iki bileşenli bir model çerçevesinde alt popülasyonların ayrımı gerçekleştirilmiştir.

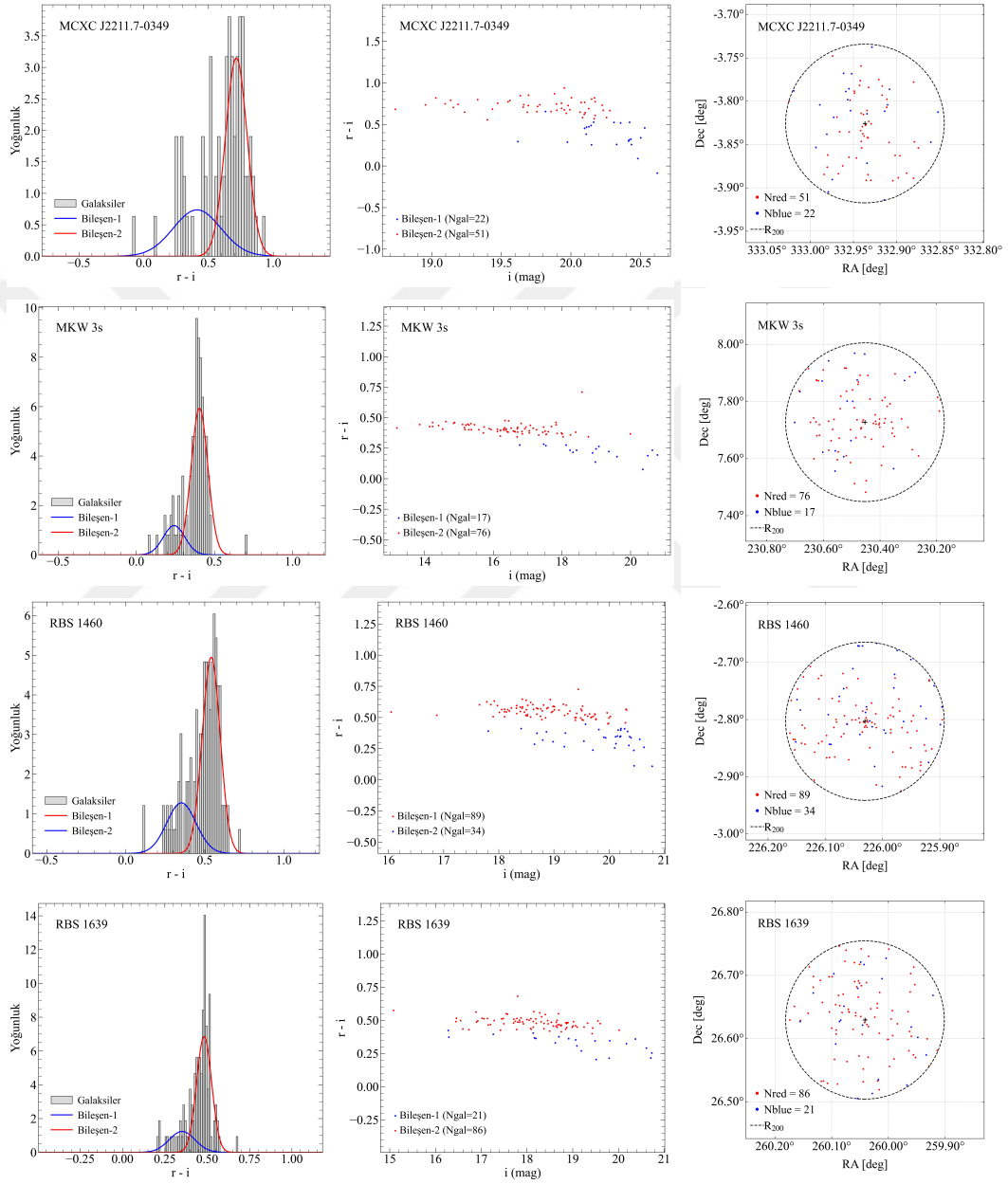
Her bir galaksi kümesi için uygulanan GMM analizlerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda oluşturulan renk–parlaklık diyagramları ile kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının dağılımları **Şekil 4.9** ve **Şekil 4.10**'da sunulmaktadır. Analizler sonucunda, küme galaksileri kırmızı ve mavi olmak üzere iki temel alt popülasyona ayrılmıştır. Grafiklerde kırmızı renkle gösterilen bileşen kırmızı (erken tip) galaksi popülasyonunu, mavi renkle gösterilen bileşen ise mavi (geç tip) galaksi popülasyonunu temsil etmektedir.

Model çıktılarından elde edilen üyelik olasılıkları kullanılarak her galaksinin ilgili alt popülasyona ait olma durumu nicel olarak değerlendirilmiştir. Renk–kadir diyagramları ve uzaysal dağılımlar, $p_{\mathrm{red}} \geq 0.7$ ve $p_{\mathrm{blue}} \geq 0.7$ eşik değerleri esas alınarak oluşturulmuştur. Bu eşiklere göre belirlenen bileşen galaksi sayıları (Ngal) grafiklerde verilmiştir. Üyelik olasılığı %70'in üzerinde olan galaksiler ilgili bileşene atanmış ve böylece renk temelli alt popülasyon ayrımı istatistiksel bir çerçevede tanımlanmıştır. GMM sonuçlarına dayanarak belirlenen bileşen galaksilerin sayı oranları ve küme merkezine olan uzaklıkları incelenmiştir.

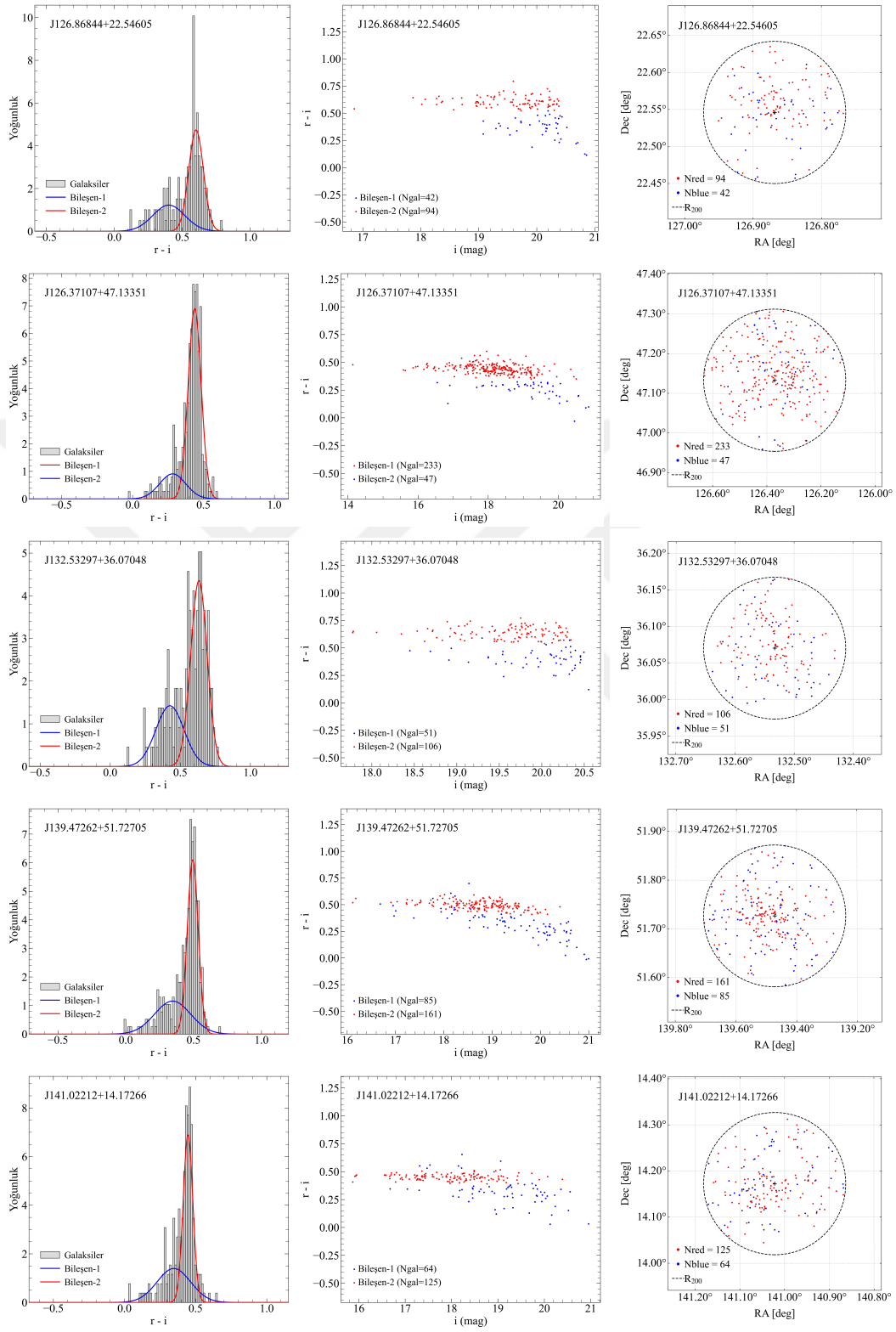
GMM analizleri, sert X-ışın örneklemi ile optik kontrol örnekleminde yer alan tüm galaksi kümelerine uygulanmıştır. Ancak literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınarak, her iki örneklemde de birleşme/etkileşme durumu gösterdiği belirlenen galaksi kümeleri, karşılaştırmalı analizlerin homojenliğini korumak amacıyla değerlendirmelere dahil edilmemiştir. X-ışın örnekleminden Abell 85, Abell 1914, Abell 2034, Abell 2065, Abell 2142, Abell 2199, Abell 2219, Abell 2255 ve Abell 2256; optik küme örnekleminden de J137.30312+10.97476, J180.10563+03.34704, J203.83372+41.00115, J231.03093+29.88897, J358.55704-10.41902 kümeleri analizlerden çıkarılmıştır.



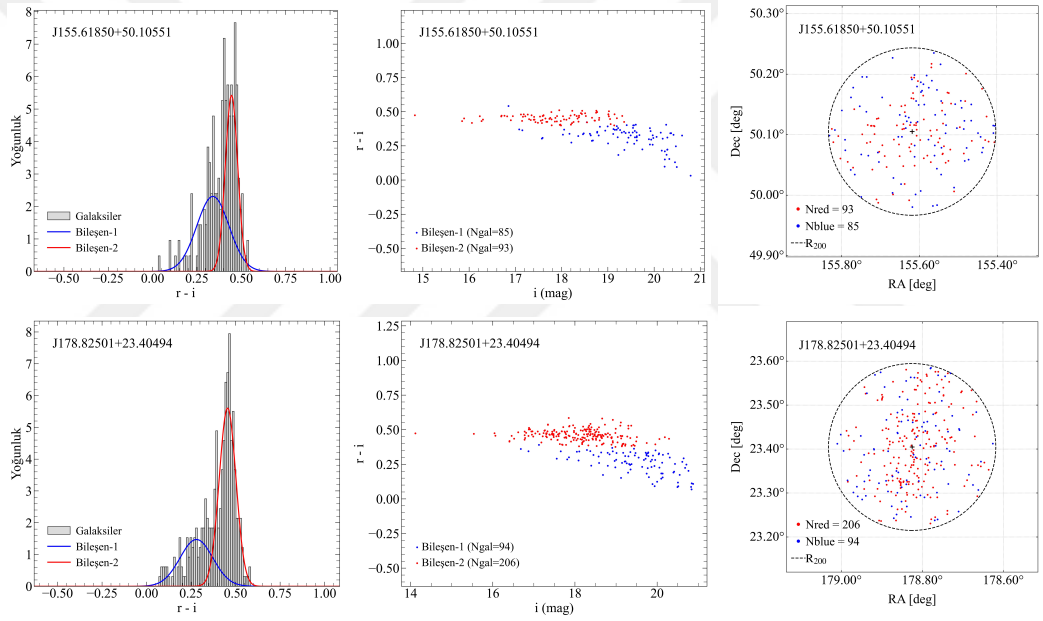
Şekil 4.9 X-ışın galaksi kümelerinin GMM analizi sonuçları. Solda bileşenlerin Gauss dağılımları, ortada renk-kadir diyagramları ve sağda bileşenlerin uzaysal dağılımları verilmektedir.



Şekil 4.9 devamı.



Şekil 4.10 Optik galaksi kümelerinin GMM analizi sonuçları. Solda bileşenlerin Gauss dağılımları, ortada renk-kadir diyagramları ve sağda bileşenlerin uzaysal dağılımları verilmektedir.



Şekil 4.10 devamı.

4.2.1. Galaksi Popülasyonlarının Sayı Oranları

Kümelerdeki kırmızı (erken-tip) ve mavi (geç-tip) popülasyonları nicel olarak karşılaştırabilmek amacıyla, her küme özelinde GMM analizi sonucunda elde edilen bileşen sayı oranları hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, galaksi kümelerinin genel popülasyon özelliklerini istatistiksel olarak incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece sert X-ışın küme örneklemi ile kontrol örneklemi arasında olası sistematik farkların ortaya koyulabilmesi için renge bağlı galaksi sayı oranları bir karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda, her bir galaksi kümesi için GMM analizinden elde edilen kırmızı ve mavi bileşenlerin galaksi sayı oranları (sırasıyla; f_{red}, f_{blue}) Denklem 4.1'de tanımlanmıştır:

$$f_{red} = \frac{Nred}{Nred + Nblue}, \qquad f_{blue} = \frac{Nblue}{Nred + Nblue} \tag{4.1}$$

Burada; Nred ve Nblue, sırasıyla kırmızı ve mavi galaksilerin küme içindeki sayılarını temsil etmektedir.

Sert X-ışın galaksi kümelerinin bileşen sayıları ve yüzdesel sayı oranları **Tablo 4.6**'da, optik galaksi kümelerinin bileşen sayıları ve yüzdesel sayı oranları **Tablo 4.7**'de verilmiştir. Buna ek olarak, her iki örneklemdeki kümelerin sayı oranlarının genel dağılımını incelemek amacıyla, kırmızı ve mavi bileşenlerin sayı oranlarının histogramları oluşturulmuştur (**Şekil 4.11**).

Sert X-ışın galaksi kümeleri için elde edilen GMM sonuçları, örneklem genelinde kırmızı bileşenin belirgin biçimde baskın olduğunu göstermektedir. **Tablo 4.6**'da verildiği üzere, tüm kümeler birlikte değerlendirildiğinde kırmızı galaksilerin oranı %78, mavi galaksilerin oranı ise %22 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, sert X-ışınlarında seçilmiş kümelerin genel olarak yıldız oluşumu büyük ölçüde baskılanmış, erken tip galaksilerin ağırlıkta olduğu sistemler olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kırmızı ve mavi bileşen oranlarının kümeden kümeye değiştiği ve tekdüze bir dağılım sergilemediği de görülmektedir.

Tablo 4.6 Sert X-ışın galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi sayıları ve yüzdesel oranları. En alt satırda tablodaki tüm kümelerin toplam değerleri ve yüzdesel oranları verilmektedir.

Galaksi Kümesi	Nred	f_{red} (%)	Nblue	f_{blue} (%)
Abell 586	129	85	22	15
Abell 644	145	71	58	29
Abell 1689	223	76	71	24
Abell 1795	237	84	44	16
Abell 1835	131	79	35	21
MCXC J2211.7−0349	51	70	22	30
MKW3s	76	82	17	18
RBS 1460	89	72	34	28
RBS 1639	86	80	21	20
Tüm Kümeler	1167	78	324	22

En yüksek kırmızı galaksi oranına sahip kümeler Abell 586 (%85), Abell 1795 (%84) ve MKW3s (%82) olarak belirlenmiştir. Abell 586, örneklemdeki diğer kümelere göre orta seviye üye sayısına (151 galaksi) sahip olmasına rağmen örneklemdeki en yüksek kırmızı galaksi oranını sergileyen kümedir. Benzer biçimde, 281 galaksi ile görece yüksek üye sayısına sahip Abell 1795'te de kırmızı bileşenin baskınlığı dikkat çekmektedir. MKW3s ise toplam 93 galaksi ile daha sınırlı üye galaksi sayısına sahip olmasına rağmen yüksek kırmızı oranı sergilemekte, bu durum bazı kümelerde kırmızı popülasyonun örneklem büyüklüğünden bağımsız olarak baskın olabildiğini göstermektedir.

Mavi galaksi oranının görece yüksek olduğu kümeler ise MCXC J2211.7−0349 (%30), Abell 644 (%29) ve RBS 1460 (%28) kümeleridir. MCXC J2211.7−0349 örneklemdeki en az üyeye sahip küme olmasına rağmen en yüksek mavi galaksi oranına sahip kümedir. Buna karşılık, Abell 644 görece yüksek toplam üye sayısı (203 galaksi) ile birlikte %29'luk mavi oranıyla ikinci sırada yer almakta; bu durum mavi bileşenin yalnızca görece az sayıda üyeye sahip kümelere özgü bir durum olmadığını göstermektedir. RBS 1460 da benzer şekilde kırmızı-mavi bileşen dağılımı açısından görece dengeli bir yapı sergilemektedir.

Örneklemde en yüksek toplam galaksi sayısına sahip olan Abell 1689 (294 galaksi) ise %76 kırmızı, %24 mavi oranıyla örneklem ortalamasına yakın bir dağılım göstermektedir. RBS 1639 da %80'lik kırmızı oranıyla genel eğilime uyumlu bir yapı sergilemektedir. Bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sert X-ışın seçilmiş galaksi kümelerinde kırmızı

bileşenin genel olarak baskın olduğu; ancak mavi galaksi oranlarının kümenin bireysel özelliklerine ve olası dinamik durumuna bağlı olarak değişebildiği görülmektedir.

Tablo 4.7 Optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi sayıları ve yüzdesel oranları. En alt satırda tablodaki tüm kümelerin toplam değerleri ve yüzdesel oranları verilmektedir.

Galaksi Kümesi	Nred	f_{red} (%)	Nblue	f_{blue} (%)
J126.86844+22.54605	94	69	42	31
J126.37107+47.13351	233	83	47	17
J132.53297+36.07048	106	68	51	32
J139.47262+51.72705	161	65	85	35
J141.02212+14.17266	125	66	64	34
J155.61850+50.10551	93	52	85	48
J178.82501+23.40494	206	69	94	31
Tüm Kümeler	1018	67	468	33

Tablo 4.7'de sunulan sonuçlara göre optik kontrol kümelerinde kırmızı galaksi oranı toplamda %67, mavi galaksi oranı ise %33'tür. Bu dağılım, optik örneklemde de kırmızı bileşenin baskın olduğunu, ancak sert X-ışın seçilmiş kümelere kıyasla mavi bileşenin göreli katkısının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

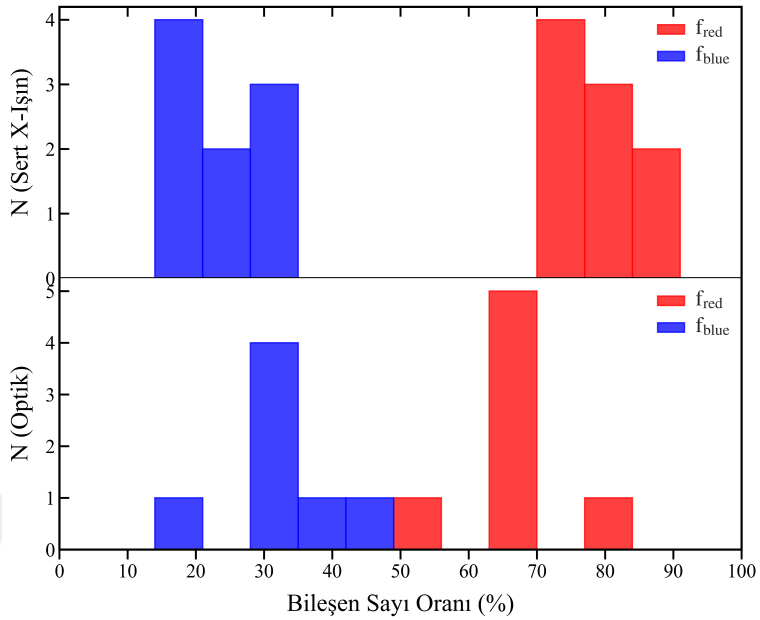
Kümeler arasında kırmızı galaksi oranları %52 ile %83 arasında değişmektedir. En yüksek kırmızı galaksi oranı %83 ile J126.37107+47.13351 kümesinde, en düşük oran ise %52 ile J155.61850+50.10551 kümesinde elde edilmiştir. J155.61850+50.10551 kümesi aynı zamanda %48 mavi galaksi oranı ile mavi bileşenin en yüksek olduğu sistemdir. Diğer kümelerde kırmızı galaksi oranlarının çoğunlukla %65-%69 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Bu durum, optik örneklemde genel eğilimin benzer olmakla birlikte kümeden kümeye belirli bir değişim içerdiğini göstermektedir.

Şekil 4.11'de verilen histogramlar, sert X-ışın ve optik örneklemlerde kırmızı ve mavi galaksi oranlarının kümeler arasında dağılımını göstermektedir. Histogramlarda, sert X-ışın kümelerinin kırmızı galaksi oranlarının daha büyük değerlerde yoğunlaştığı; optik kümelerde ise dağılımın daha küçük kırmızı oranlarına ve buna karşılık daha büyük mavi oranlarına doğru kaydığı görülmektedir. Özellikle optik örneklemde mavi bileşen oranları daha geniş bir aralıkta dağılmaktadır. Sert X-ışın örnekleminde kırmızı galaksi oranı ortalama %78 iken, optik örneklemde bu değer %67'dir. Buna karşılık mavi galaksi oranı sert X-ışın kümelerinde %22, optik kümelerde ise %33'tür. Bu sayısal fark, seçim yönteminin

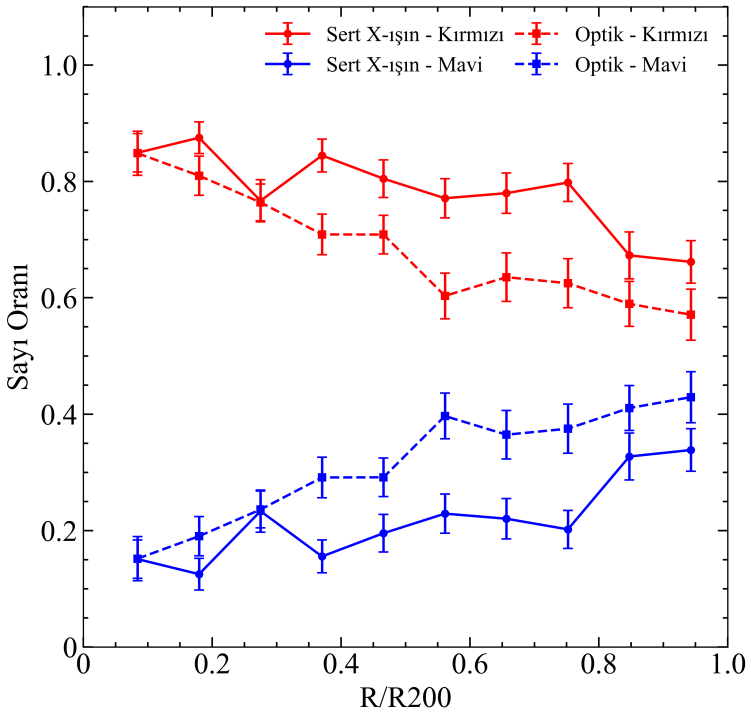
küme popülasyonlarının bileşen dağılımları üzerinde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Sert X-ışın seçilmiş kümelerde kırmızı galaksi oranları ortalama olarak daha yüksekken, optik örneklemde mavi galaksi oranlarının görece daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 4.12'de ise kırmızı ve mavi galaksi sayı oranlarının normalize edilmiş yarıçaplarda (R/R_{200}) değişimi verilmiştir. Her iki örneklemde de merkezden uzaklaştıkça kırmızı galaksi oranı azalmakta, mavi galaksi oranı ise artmaktadır. Bununla birlikte, yaklaşık $R/R_{200} \lesssim 0.7-0.8$ yarıçapına kadar sert X-ışın kümelerinde kırmızı galaksi oranının optik kümelere kıyasla sistematik olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu yarıçap aralığı tipik olarak R_{500} ölçeğine karşılık gelmekte olup, küme içi ortamın daha sıcak olduğu iç bölgeleri temsil etmektedir. Bu bölgelerde, sıcak gaz–galaksi etkileşimleri (örneğin çarpışma basıncı sıyırması) gibi çevresel süreçlerin daha baskın hale gelebileceği; bunun yıldız oluşumunun bastırılması ve kırmızı galaksi oranının artışıyla ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. $R/R_{200} \gtrsim 0.7-0.8$ değerlerinden sonra ise iki örneklem arasındaki farkın azaldığı ve oranların birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu eğilim, örneklemler arasındaki temel farkın özellikle kümelerin iç bölgelerinde belirginleştiğini göstermektedir.

Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, sert X-ışın seçilmiş kümelerde kırmızı galaksi oranının örneklem ortalaması bakımından daha yüksek olduğu ve bu farkın özellikle iç yarıçaplarda daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Buna karşılık, optik örneklemde mavi galaksi bileşeninin göreli katkısı hem kümenin genelinde hem de dış bölgelerinde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu eğilimler, iki örneklem arasında bileşen dağılımlarının yarıçapa bağlı olarak farklılık gösterebildiğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.11 Sert X-ışın kümeleri ile optik kümelerin kırmızı ve mavi galaksi sayı oranlarının dağılımı.



Şekil 4.12 Sert X-ışın ve optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi oranının normalize edilmiş bileşen uzaklıklarına (R/R_{200}) bağlı değişimi.

4.3. GALAKSİ POPÜLASYONLARININ KÜME MERKEZİNE UZAKLIKLARI

Bu bölümde, kümelerdeki kırmızı (erken tür) ve mavi (geç tür) galaksilerin küme içindeki uzaysal dağılımları incelenmiştir. Her bir popülasyona ait galaksilerin küme merkezlerine olan açısal uzaklıkları hesaplanmış ve Python ortamında `Astropy` kütüphanesinin kozmoloji modülü kullanılarak bu açısal uzaklıklar fiziksel (Mpc) uzaklıklara dönüştürülmüştür. Hesaplamalarda, ΛCDM standart kozmolojik modeli ($H_0 = 70\ \mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$, $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$) esas alınmıştır.

Her iki örneklemde kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme içindeki dağılımlarını karşılaştırmak amacıyla, galaksilerin küme merkezine olan uzaklıklarının medyan değerleri ($\tilde{\mathrm{R}}$ (Mpc)) hesaplanmıştır. Bu medyan değerler **Tablo 4.8** ve **Tablo 4.9**'da verilmiştir. Ayrıca, her iki örneklemdeki kümelerin her popülasyon için ortalama medyan uzaklıkları da tablolarda yer almaktadır. Böylece, örneklemlerin genel dağılımı da nicel olarak gösterilmiştir.

Medyan uzaklıkların hesaplanmasının yanı sıra, kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme içindeki uzaysal dağılımlarının istatistiksel olarak farklı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla Kolmogorov–Smirnov (KS) testi uygulanmıştır. Bu testte D istatistiği iki örneklemin kümülatif dağılımları arasındaki maksimum farkı, p-değeri ise bu farkın rastlantısal olarak ortaya çıkma olasılığını ifade etmektedir. p-değeri < 0.05 koşulu, iki dağılım arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunduğunu göstermektedir. Böylece, galaksilerin küme merkezine göre konumlarının iki popülasyon arasında sistematik bir ayrışma gösterip göstermediği nicel olarak test edilmiş, sonuçlar **Tablo 4.8** ve **Tablo 4.9**'da verilmiştir.

Kolmogorov–Smirnov (KS) testi uygulanırken galaksilerin küme merkezine olan uzaklıkları R_{200} yarıçapına normalize edilerek (R/R_{200}) kullanılmıştır. Burada R, galaksinin küme merkezine olan uzaklığını temsil etmektedir. Kümülatif dağılım fonksiyonları her bir küme için ayrı ayrı oluşturulmuş (**Şekil 4.13** ve **Şekil 4.14**), ardından sert X-ışın ve optik örneklemlerdeki kırmızı ve mavi galaksiler kendi içlerinde (**Şekil 4.15**) ve karşılaştırmalı (**Şekil 4.16**) olarak birleştirilip örneklemler bazında kümülatif dağılımlar elde edilmiştir. Bu grafiklerde yatay eksen normalize edilmiş uzaklığı (R/R_{200}), dikey eksen ise belirli bir yarıçap içinde bulunan galaksilerin kümülatif oranını göstermektedir. Örneğin dikey eksendeki 0.5 değeri, galaksilerin %50'sinin ilgili R/R_{200} değerinin içinde

Tablo 4.8 Sert X-Işın galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme merkezlerine medyan uzaklıkları ($\tilde{R}$) ve KS testi sonuçları. En alt satırda, iki popülasyon için tüm kümelerdeki medyan uzaklıkların ortalamaları verilmektedir.

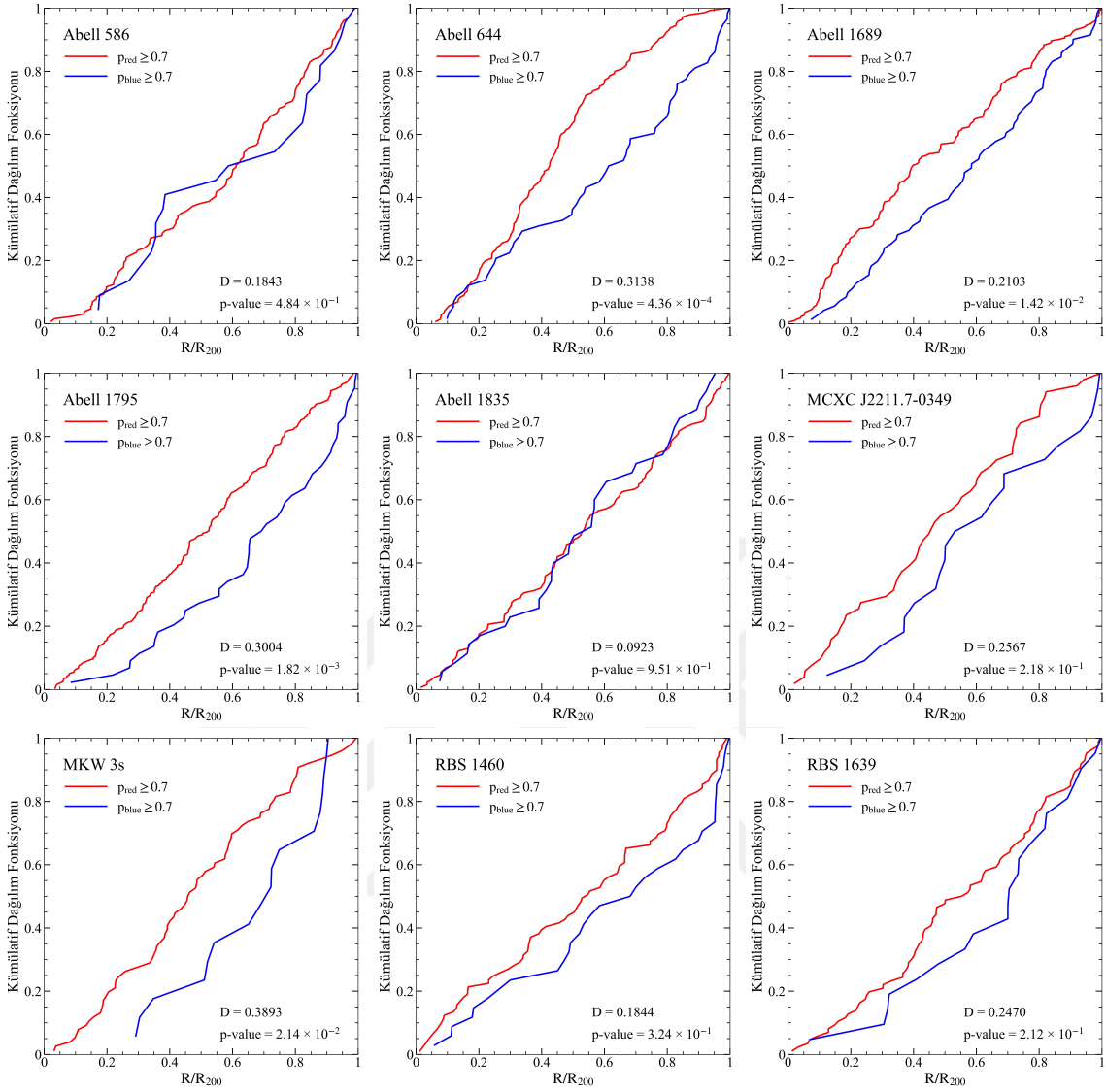
Galaksi Kümesi	$\tilde{R} - f_{red}$	$\tilde{R} - f_{blue}$	D	p-değeri
Abell 586	0.83 ± 0.04	0.90 ± 0.21	0.18	4.84×10^{-1}
Abell 644	0.62 ± 0.03	0.93 ± 0.09	0.31	4.36×10^{-4}
Abell 1689	0.77 ± 0.07	1.12 ± 0.10	0.21	1.42×10^{-2}
Abell 1795	0.93 ± 0.06	1.24 ± 0.10	0.30	1.82×10^{-3}
Abell 1835	0.89 ± 0.07	0.93 ± 0.09	0.09	9.51×10^{-1}
MCXC J2211.7-0349	0.84 ± 0.11	1.06 ± 0.16	0.26	2.18×10^{-1}
MKW3s	0.41 ± 0.04	0.64 ± 0.07	0.39	2.14×10^{-2}
RBS 1460	0.96 ± 0.10	1.21 ± 0.20	0.18	3.24×10^{-1}
RBS 1639	0.70 ± 0.08	0.88 ± 0.08	0.25	2.12×10^{-1}
Ortalama	0.77 ± 0.06	0.99 ± 0.06		

Tablo 4.9 Optik galaksi kümeleri için kırmızı ve mavi galaksi popülasyonlarının küme merkezlerine medyan uzaklıkları ($\tilde{R}$) ve KS testi sonuçları. En alt satırda, iki popülasyon için tüm kümelerdeki medyan uzaklıkların ortalamaları verilmektedir.

Galaksi Kümesi	$\tilde{R} - f_{red}$	$\tilde{R} - f_{blue}$	D	p-değeri
J126.86844+22.54605	0.85 ± 0.10	0.94 ± 0.15	0.12	7.05×10^{-1}
J126.37107+47.13351	0.73 ± 0.05	0.92 ± 0.11	0.20	6.54×10^{-2}
J132.53297+36.07048	0.79 ± 0.05	0.99 ± 0.10	0.31	1.84×10^{-3}
J139.47262+51.72705	0.67 ± 0.05	1.10 ± 0.12	0.32	2.09×10^{-5}
J141.02212+14.17266	0.62 ± 0.05	0.77 ± 0.04	0.18	9.97×10^{-2}
J155.61850+50.10551	0.62 ± 0.03	0.87 ± 0.04	0.30	5.88×10^{-4}
J178.82501+23.40494	0.80 ± 0.04	1.04 ± 0.06	0.19	1.45×10^{-2}
Ortalama	0.73 ± 0.03	0.95 ± 0.04		

yer aldığını ifade etmektedir. KS testi, iki popülasyonun küme merkezine göre dağılımlarının karşılaştırılmasına olanak sağlamıştır.

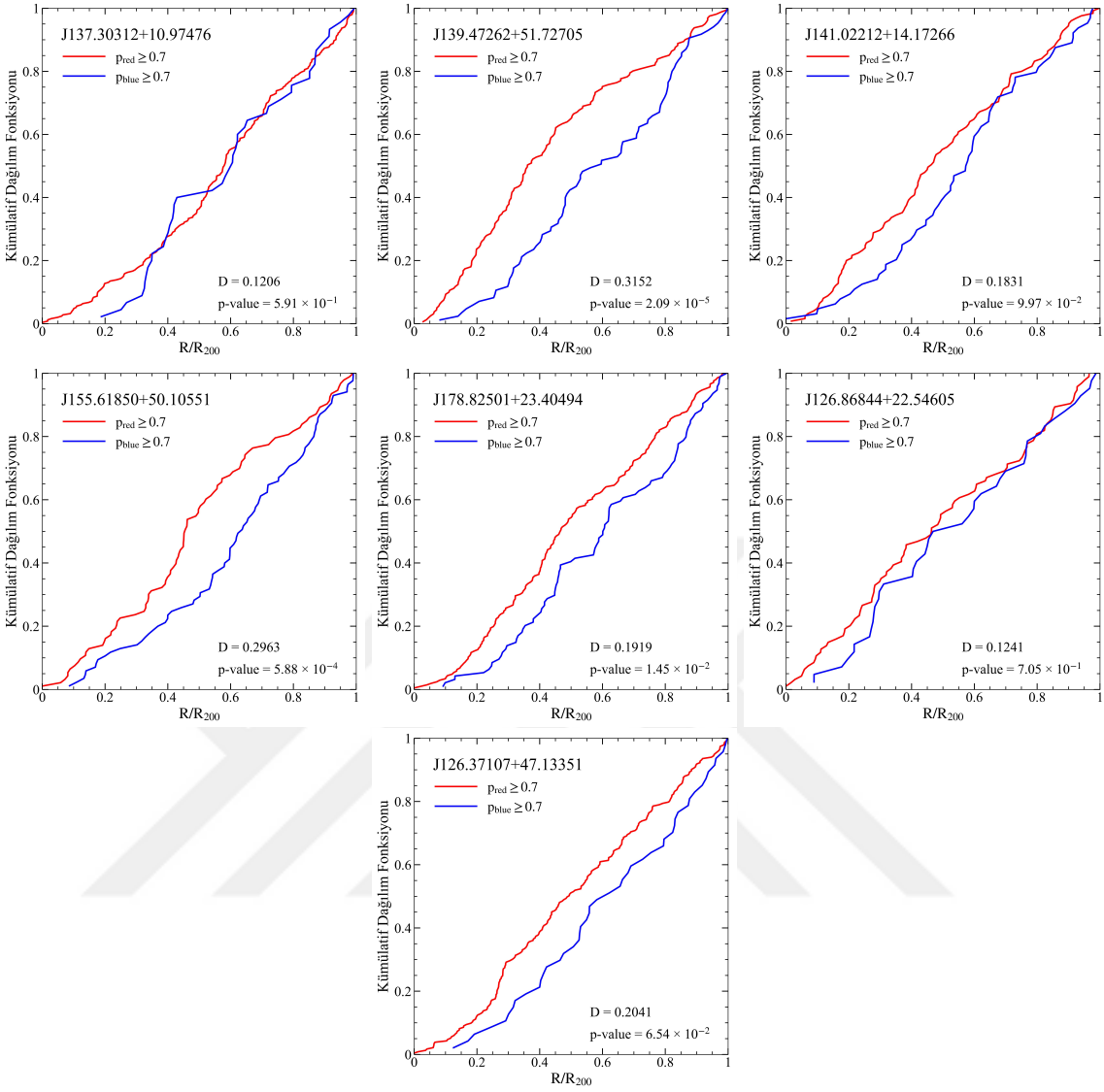
Sert X-ışın galaksi kümeleri için elde edilen medyan uzaklık değerleri, genel olarak mavi galaksilerin kırmızı galaksilere kıyasla küme merkezinden daha uzak konumlandığını göstermektedir.Tüm kümeler için hesaplanan ortalama medyan uzaklıklar kırmızı galaksilerde 0.77 ± 0.06 Mpc, mavi galaksilerde ise 0.99 ± 0.06 Mpc olarak bulunmuştur. Bu değerler, iki popülasyon arasında belirgin bir ayrım olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, sert X-ışınlarında seçilmiş kümelerde morfolji-yoğunluk ilişkisiyle uyumlu bir şekilde kırmızı galaksilerin daha merkezi ve yoğun bölgelerde, mavi galaksilerin ise görece daha dış



Şekil 4.13 Sert X-ışın galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları.

yarıçaplarda yer alma eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır.

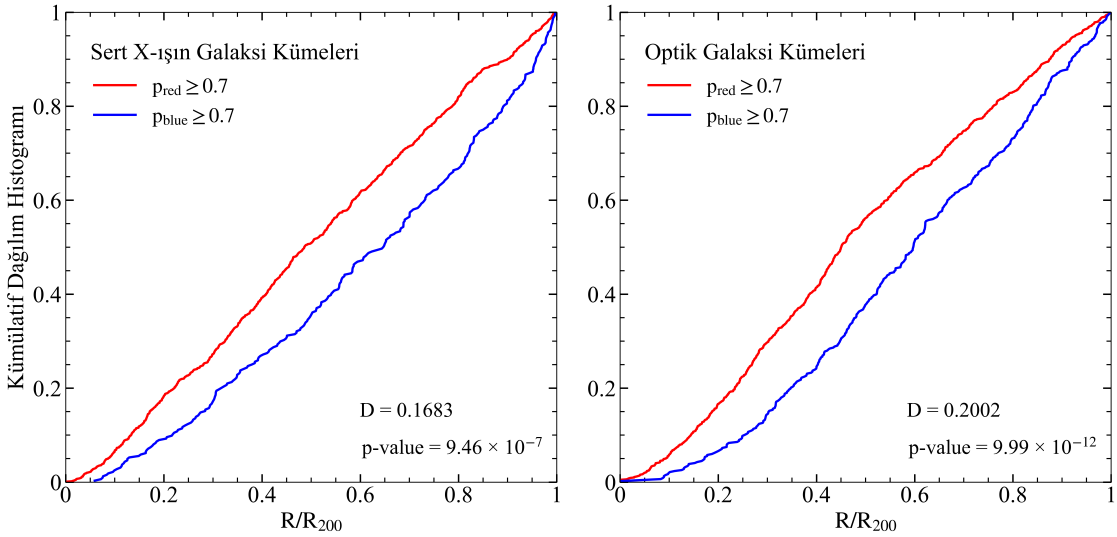
Kümeler bazında incelendiğinde, en belirgin ayrışmanın Abell 644, Abell 1795, Abell 1689 ve MKW3s kümelerinde ortaya çıktığı görülmektedir. Abell 644 kümesinde kırmızı ve mavi galaksilerin medyan uzaklıkları sırasıyla 0.62 ± 0.03 Mpc ve 0.93 ± 0.09 Mpc olup, KS testi sonucu $p = 4.36 \times 10^{-4}$ ile istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermektedir. Benzer biçimde Abell 1795'te medyan uzaklıklar 0.93 ± 0.06 Mpc ve 1.24 ± 0.10 Mpc olarak hesaplanmış ve $p = 1.82 \times 10^{-3}$ değeri elde edilmiştir. Abell 1689 kümesinde de iki popülasyonun uzaklık dağılımlarının farklılaştığı ($p = 1.42 \times 10^{-2}$) ve medyan uzaklık farkının görece belirgin olduğu (0.77 Mpc ve 1.12 Mpc) görülmektedir. MKW3s kümesinde ise kırmızı ve mavi bileşenler arasındaki fark hem göreli olarak yüksek



Şekil 4.14 Optik galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları.

(0.41 Mpc ve 0.64 Mpc) hem de istatistiksel olarak anlamlıdır ($p = 2.14 \times 10^{-2}$). Buna karşılık Abell 586 ve Abell 1835 kümelerinde medyan uzaklık farkı daha sınırlı olup, yüksek p-değerleri iki dağılımın istatistiksel olarak ayırt edilemediğini göstermektedir. RBS 1460 ve RBS 1639 kümelerinde de benzer şekilde anlamlı bir ayrışma tespit edilmemiştir. Dolayısıyla sert X-ışınlarında seçilmiş kümelerde kırmızı galaksilerin küme merkezine daha yakın, mavi galaksilerin ise daha dış bölgelerde konumlanma eğilimi birçok kümede gözlenmekle birlikte, bu ayrışmanın istatistiksel anlamlılık düzeyi kümeden kümeye değişiklik göstermektedir.

Optik kontrol kümeleri için elde edilen sonuçlar da benzer bir dağılım ortaya koymaktadır. Tüm optik kümeler için ortalama medyan uzaklıklar kırmızı galaksilerde 0.73 ± 0.03 Mpc,

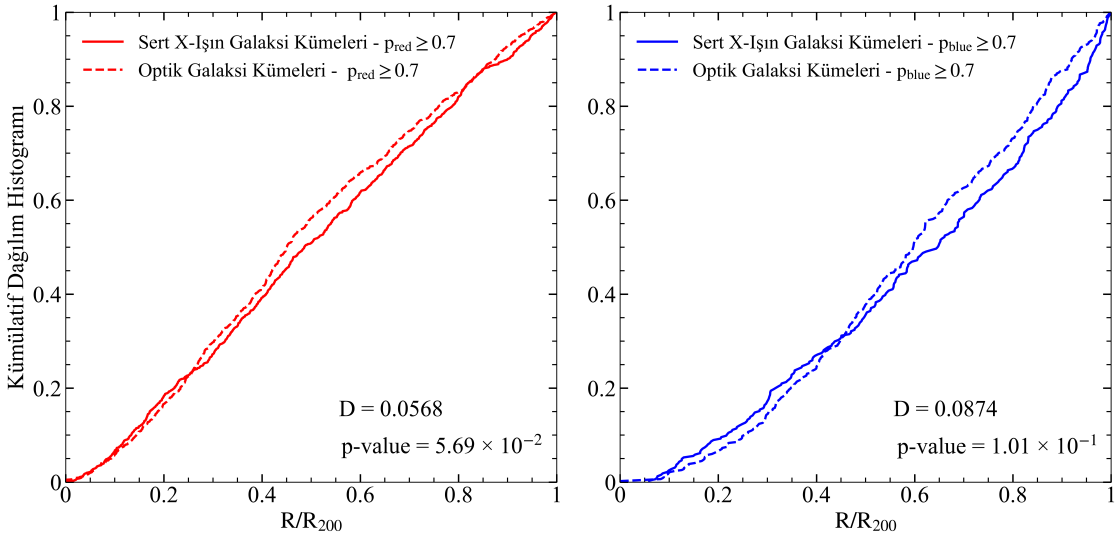


Şekil 4.15 Sert X-ışın galaksi kümeleri ile optik galaksi kümelerinin kümülatif dağılım histogramları.

mavi galaksilerde ise 0.95 ± 0.04 Mpc olarak hesaplanmıştır. Bu fark, mavi galaksilerin optik kümelerde de daha dış bölgelerde yer aldığını göstermektedir.

Kümeler bazında incelendiğinde, J139.47262+51.72705 kümesinde kırmızı ve mavi galaksilerin medyan uzaklıkları sırasıyla 0.67 ± 0.05 Mpc ve 1.10 ± 0.12 Mpc olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık 0.43 Mpc'lik fark, optik örneklem içerisindeki en yüksek medyan uzaklık farkına karşılık gelmektedir. KS testi sonucu ($p = 2.09 \times 10^{-5}$) ise iki popülasyonun uzaysal dağılımlarının istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını göstermektedir. Benzer şekilde J155.61850+50.10551 ($p = 5.88 \times 10^{-4}$), J132.53297+36.07048 ($p = 1.84 \times 10^{-3}$) ve J178.82501+23.40494 ($p = 1.45 \times 10^{-2}$) kümelerinde de anlamlı farklar elde edilmiştir. Buna karşılık J126.86844+22.54605 ve J141.02212+14.17266 kümelerinde kırmızı ve mavi galaksilerin medyan uzaklıkları birbirine daha yakın olup, KS testi sonuçları istatistiksel olarak anlamlı bir ayrım ortaya koymamaktadır. Bu durum, optik örneklemde de merkezi yoğunlaşma eğiliminin popülasyonlar arasında kümeden kümeye değiştiğini göstermektedir.

Her iki örneklem birlikte değerlendirildiğinde, mavi galaksilerin kırmızı galaksilere kıyasla küme merkezinden daha uzak bölgelerde konumlandığı ortak bir eğilim olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum, hem sert X-ışın hem de optik kümeler için ayrı ayrı sunulan kümülatif dağılım fonksiyonlarında açık biçimde görülmektedir (**Şekil 4.15**). Sert X-ışın örnekleminde kırmızı ve mavi galaksilerin dağılımları arasındaki fark için hesaplanan KS



Şekil 4.16 Sert X-ışın ve optik galaksi kümelerinin kırmızı bileşenleri ile mavi bileşenlerinin karşılaştırmalı kümülatif dağılım histogramları.

istatistiği $D = 0.1683$ ve $p = 9.46 \times 10^{-7}$ olup, iki popülasyonun uzaysal dağılımlarının istatistiksel olarak anlamlı biçimde farklılaştığını göstermektedir. Benzer şekilde optik örneklemde de $D = 0.2002$ ve $p = 9.99 \times 10^{-12}$ değerleri elde edilmiş; bu da kırmızı ve mavi galaksilerin küme merkezine göre dağılımlarının güçlü biçimde ayrıştığını ortaya koymuştur.

Öte yandan, örneklemler arasında karşılaştırma yapıldığında (kırmızı–kırmızı ve mavi–mavi dağılımlar; **Şekil 4.16**), sert X-ışın ve optik kümelerde aynı renkteki galaksi popülasyonlarının kümülatif uzaklık dağılımlarının birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir. Kırmızı galaksiler için $D = 0.0568$ ve $p = 5.69 \times 10^{-2}$, mavi galaksiler için ise $D = 0.0874$ ve $p = 1.01 \times 10^{-1}$ değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, iki örneklem arasında aynı popülasyonun uzaysal dağılımı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığını göstermektedir.

Dolayısıyla, hem sert X-ışın hem de optik kümelerde mavi galaksilerin daha dış bölgelerde, kırmızı galaksilerin ise daha merkezi bölgelerde yoğunlaşması ortak bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, aynı popülasyonların (kırmızı–kırmızı veya mavi–mavi) iki farklı küme seçimi arasında benzer uzaysal dağılımlar sergilemesi, bu eğilimin küme belirleme yönteminden büyük ölçüde bağımsız ve küme içi çevresel yoğunlukla ilişkili genel bir davranış olduğunu düşündürmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında SRG X-ışın teleskobunun ART-XC detektörü ile sert X-ışınlarında tespit edilmiş 18 galaksi kümesi ve bu kümelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmak için 12 optikçe belirlenmiş galaksi kümesi kontrol örneklemi olarak seçilmiş ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Optikçe belirlenen kümeler seçilirken, ART-XC'nin gözlem yaptığı galaktik koordinatlar dikkate alınmış ve özellikle sert X-ışınlarında belirlenen kümelerle benzer galaktik koordinatlardan (**Şekil 3.7**) seçilmiştir. Seçilen kümeler arasından birleşme veya etkileşme gösteren kümeler çıkarıldığında, 9 X-ışınlarında belirlenmiş küme ve 7 optikçe belirlenmiş küme kalmıştır. Küme üyesi galaksi popülasyonlarına ait analizler, X-ışını ile belirlenen kümelerde 1607 galaksi ve optik yöntemlerle belirlenen kümelerde 1611 galaksi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Galaksiler, renk bilgileri kullanılarak Gauss Karışım Modeli (GMM) ile erken ve geç tür popülasyonlara ayrılmıştır. Bu tür istatistiksel sınıflandırmalar, kırmızı kol–mavi bulut ayrımını objektif bir biçimde gerçekleştirmesi nedeniyle son yıllarda küme çalışmalarında standart hale gelmiştir (Baldry ve diğ., 2004; Peng ve diğ., 2010). Üyelik olasılığı $\geq 70\%$ koşulu, sınıflandırma saflığını artırarak popülasyonlar arası karışımı en aza indirmiştir.

Şekil 4.15'de verilen sonuçlar, hem X-ışın hem de optikçe seçilmiş kümelerde erken tür galaksilerin küme merkezlerinde sistematik olarak yoğunlaştığını göstermektedir. Bu bulgu, galaksi morfolojisinin yerel yoğunluk ile güçlü biçimde ilişkili olduğunu ortaya koyan klasik morfoloji–yoğunluk bağıntısı ile tamamen tutarlıdır (Dressler, 1980; Dressler ve diğ., 1997). Biviano ve diğ. (2002), 59 zengin galaksi kümesindeki 3056 üye galaksiyle yaptığı çalışmada (E+S0) galaksilerin düşük hız dispersiyonlarına sahip olduklarını ve küme merkezlerinde yoğunlaştıklarını; geç tür galaksilerin ise küme merkezlerinde çok daha az bulunduğunu göstermiştir. Doi ve diğ. (1995), Coma kümesindeki 450 galaksiyle yaptıkları çalışmada spiral galaksilerin merkeze doğru azalan bir gradyent gösterdiğini, ancak çok parlak spiral galaksilerin merkeze yakın konumlarda bulunduğunu belirtmiştir. Benzer sonuçlar, SDSS verileri kullanılarak yapılan çalışmalarda da rapor edilmiş; erken tür ve pasif galaksilerin küme merkezlerinde baskın olduğu gösterilmiştir (Goto ve diğ., 2003;

Hansen ve diğ., 2009; Wetzel ve diğ., 2012). Bu merkezi yoğunlaşma, çarpışma-basıncı sıyırması, gelgit etkileşimleri, galaksi tacizi ve gaz kaybı gibi çevresel süreçlerin yıldız oluşumunu baskılayarak galaksileri kırmızı ve pasif popülasyona dönüştürdüğünü öne süren fiziksel senaryolarla uyumludur (Boselli ve Gavazzi, 2006; Masters ve diğ., 2010; Peng ve diğ., 2010; Wetzel ve diğ., 2013).

Erken tür galaksilerin daha çok küme merkezlerinde toplanması, X-ışınlarında belirlenen kümelerde de gözlenmiştir. Coenda ve Muriel (2009), 49 X-ışınlarında belirlenen kümedeki 786 galaksi ve 209 optikçe belirlenen kümedeki 3041 galaksiyle yaptıkları çalışmada, $R/R_{200} \sim 1$'e kadar kümelerde erken tür galaksilerin baskın olduğunu göstermiştir. Daha önemlisi, küme merkezine olan tüm uzaklıklarda X-ışınlarında seçilen kümelerde daha çok erken tür galaksi olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, $M_r \leq -22.5$ olan galaksilerin merkeze yakın bölgelerde bulunduklarını tespit etmişlerdir. Melnick ve Sargent (1977) de X-ışınlarında belirlenen kümelerde merkezden kümenin dış kısımlarına doğru spiral/S0 galaksi oranının arttığını göstermiştir. Erken tür galaksilerin X-ışınlarında belirlenen kümelerde geç tür galaksilere göre daha baskın olmaları çevresel etkilerin galaksileri dönüştürdüğünü göstermektedir. Özellikle, sıcak küme-içi gaz geç tür galaksilerin gazlarını yitirmelerine ve onları pasif, kırmızı galaksilere dönüşmelerine neden olmaktadır (Giodini ve diğ., 2012; Masters ve diğ., 2010; Peng ve diğ., 2010). Ayrıca, kümelerin dış kısımlarına doğru artan geç tür galaksi oranı da kümelere yeni katılmakta olan galaksiler olduğuna işaret etmektedir (Fairley ve diğ., 2002). Hilton ve diğ. (2005), 19 yüksek X-ışın ışımagüçlü (L_X) ve 49 düşük ışımagüçlü kümeyi karşılaştırmış ve X-ışın parlak kümelerdeki erken tür galaksi oranlarının düşük ışımagüçlü kümelere göre %12 daha fazla olduğunu bulmuştur.

Öte yandan, bazı kümelerde (A586 ve A1835 gibi) erken ve geç tür galaksilerin benzer radyal dağılımlar göstermesi, kümelere özgü dinamik durumunun ve birleşme geçmişinin galaksi popülasyonlarını önemli ölçüde etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bu tür kümeden kümeye değişkenlik, literatürde hem gözlemsel hem de sayısal çalışmalarda verilmiş olup, özellikle yakın zamanda birleşme geçirmiş veya dinamik olarak genç sistemlerde morfolojik ayrışmanın zayıflayabildiği gösterilmiştir (Haines ve diğ., 2015; Oemler, 1974).

X-ışını ile seçilmiş galaksi kümelerine yönelik önceki çalışmalar, galaksi popülasyonlarının yarıçapa bağlı olarak belirgin bir ayrışma sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmalarda, geç-tür ya da yıldız oluşumu gösteren galaksilerin oranının küme merkezinde yalnızca

birkaç yüzde seviyesinden başlayarak R_{200} civarında yaklaşık $\sim \%20-40$ düzeyine kadar arttığı bulunmuştur. Yakın evrendeki X-ışını örneklerine dayanan morfoloji temelli analizler (örneğin Fasano ve diğ. (2015); Thomas ve Katgert (2006)), sarmal galaksilerin $\sim 0.2R_{200}$ içinde güçlü biçimde bastırıldığını ortaya koyarken, orta kırmızıya kayma aralığında renk ve yıldız oluşumuna dayalı çalışmalar (Haines ve diğ., 2015; Wake ve diğ., 2005) mavi ya da yıldız oluşumu gösteren popülasyonların yarıçapla birlikte benzer şekilde arttığını göstermektedir. Bu bulgular, bu tez çalışmasında renk-temelli GMM sınıflamaları kullanılarak elde edilen radyal dağılımların yorumlanması için önemli bir karşılaştırma ölçütü sunmaktadır. **Tablo 5.1**'de literatürden derlenen ve galaksileri renklerine göre veya yıldız oluşumu etkinliklerine göre ayıran bazı çalışmalar sunulmaktadır. Bu tez çalışmasında karşılaştırılan sert X-ışını gözlenen kümelerdeki mavi galaksilerin oranı, benzer zenginlikteki optikçe belirlenmiş kümelerden sistematik olarak daha düşüktür. **Şekil 4.12**'de küme merkezinden uzaklığa göre erken ve geç tür galaksilerin sayı oranları verilmektedir. R_{200}'e kadar küme merkezinden her uzaklıkta X-ışınlarındaki kümelerde daha az mavi/geç tür galaksi bulunmaktadır. Bu durum, yukarıda belirtilen küme-içi gazın etkili olduğu görüşünü desteklemektedir.

Şekil 4.16'deki iki farklı küme örneklemindeki erken ve geç tür galaksiler kendi arasında karşılaştırılmaktadır. Buna göre, çok küçük farklar, D değerleri 0.0568 ve 0.0874 belirlenmiş olmakla birlikte, optik olarak belirlenmiş kümelerde hem erken hem de geç tür galaksiler, X-ışınları belirlenmiş kümelere göre merkezlere daha yakın görünmektedir. Bu çalışmada benzer zenginliklerde ve dolayısıyla kütlelerde galaksi kümeleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın daha geniş küme ve galaksi örneklemlerine genişletilmesi yerinde olacaktır. Ayrıca, daha büyük teleskoplarla yürütülen gökyüzü tarama verileri ile kırmızıya kayma aralığının da genişletilmesi, galaksi evrimi açısından önemli bir boyut kazandırabilecektir.

Bu çalışmanın başında, küme alanlarındaki galaksi verileri seçilirken SDSS veritabanında uygulanan seçim sorgularında galaksi olmayan cisimlerin de verilere karıştığı belirlenmiştir. Bunun yanında, galaksi olsa bile güvenilir ölçümlere sahip olamayacak kadar parlak yıldızların veya görüntü bozukluklarının yakınında bulunan cisimlerin de olduğu fark edilmiştir. SDSS tarafından önerilen Temiz Fotometri prosedürünün örneklemi yeterince temizleyemediği fark edilmiş ve cisimlere atfedilmiş tüm etiketler ayrıntılı bir incelemeye tabi tutulmuştur. Bu incelemeler sonucunda, Temiz Fotometri sorgusuna ek olabilecek etiketler belirlenmiş ve SDSS'ten galaksi örneklemleri seçilirken kullanılması önerilmiştir

Tablo 5.1 X-ışını ile seçilmiş galaksi kümesi örneklerinde, renk, yıldız oluşumu veya morfoloji temelli geç-tür galaksi oranlarının karşılaştırılması. Bu çalışmalar, bu tez kapsamında kullanılan renk-temelli GMM sınıflandırmalarıyla doğrudan karşılaştırılabilir niteliktedir.

Referans	Kırmızıya Kayma	Popülasyon Ayrımı	$f_{\rm blue}(R < 0.2R_{200})$	$f_{\rm blue}(R \sim R_{200})$
Fairley ve diğ. (2002)	$0.2 < z < 0.6$	Renk	-	~ 0.25
Wake ve diğ. (2005)	$z \sim 0.3$	Renk	~ 0.10	~ 0.30
Thomas ve Katgert (2006)	$z \leq 0.1$	Morfoloji	~ 0.05	$\sim 0.20 - 0.25$
Haines ve diğ. (2013)	$z \sim 0.2$	Yıldız oluşumu (NUV)	~ 0.10	~ 0.35
Haines ve diğ. (2015)	$0.15 < z < 0.30$	Yıldız oluşumu (IR/UV)	~ 0.04	$\sim 0.20 - 0.25$
Fasano ve diğ. (2015)	$0.04 < z < 0.07$	Morfoloji	~ 0.10	~ 0.30
Bu Çalışma	**z $\leq$0.45**	**Renk**	**$\sim$0.10**	**$\sim$0.35**

(Atalı ve Aliş, 2026). Benzer kalite kontrol ve maskeleme yaklaşımları, DES, HSC ve KiDS gibi modern gökyüzü taramalarında da kritik bir adım olarak uygulanmaktadır (Coupon ve diğ., 2018; Ross ve diğ., 2011). Ayrıca, *Gaia* astrometrisi ile yapılan çapraz eşleştirmelerin yıldız kirlenmesini büyük oranda azalttığı ve galaksi örneklemlerinin saflığını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir (Gaia Collaboration ve diğ., 2023).

Son olarak, büyük veri hacimleri nedeniyle manuel doğrulamanın mümkün olmadığı gelecek nesil taramalarda (Euclid, Rubin/LSST), derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemlerinin galaksi–yıldız–kuasar ayrımında belirleyici bir rol oynaması öngörülmektedir. Görsel olarak doğrulanmış etiketli örneklemlerin bu tür makine öğrenmesi uygulamalarında eğitim verisi olarak kullanılması, daha saf galaksi katalogları ve daha güvenilir istatistiksel sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır (Huertas-Company ve diğ., 2015; Kim ve Brunner, 2017).

Genel olarak, elde edilen bulgular, hem X-ışın hem de optik seçilmiş kümelerde çevresel etkilerin galaksi evrimindeki baskın rolünü doğrulamakta ve erken tür galaksilerin merkezlerde yoğunlaşmasının evrensel bir özellik olduğunu göstermektedir. Daha geniş kırmızıya kayma aralıklarını kapsayan ve gelecek nesil gökyüzü taramalarını içeren çalışmalar, bu eğilimlerin kozmik zaman içindeki evrimini inceleyerek galaksi evrimi modellerine daha güçlü kısıtlamalar getirebilecektir.

KAYNAKLAR

Abazajian, K. ve others, 2003. The first data release of the sloan digital sky survey. *The Astronomical Journal*, 126,2081–2086.

Abdurro'uf, , Accetta, K., Aerts, C., Silva Aguirre, V., Ahumada, R. ve diğ. 2022. The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 259(2),35.

Abell, G. O. 1958. The Distribution of Rich Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 3,211.

Abell, G. O., Corwin, H. G. ve Olowin, R. P. 1989. A Catalog of Rich Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 70,1.

Aliş, S. 2024. Accuracy of the Photometric Redshifts of Brightest Cluster Galaxies Identified in the CFHTLS-W1. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 10(4),954–967.

Allen, S. W., Schmidt, R. W. ve Fabian, A. C. 2002. Cosmological constraints from the X-ray gas mass fraction in relaxed lensing clusters observed with Chandra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 334(2),L11–L15.

Arnaud, M. 2005. X-ray observations of clusters of galaxies. In Melchiorri, F. ve Rephaeli, Y., editors, *Background Microwave Radiation and Intracluster Cosmology*, page 77.

Arnaud, M., Pratt, G. W., Piffaretti, R., Böhringer, H., Croston, J. H. ve diğ. 2010. The universal galaxy cluster pressure profile from a representative sample of nearby systems (REXCESS) and the Y_{SZ} - M_{500} relation. *Astronomy & Astrophysics*, 517,A92.

Atalı, H. ve Aliş, S. 2026. Building Clean Galaxy Samples From SDSS: An Assessment of Galaxy Selection. *Turkish Journal of Astronomy and Astrophysics*, Basım Aşamasında.

Bahcall, N. A. 1999. Clusters and superclusters of galaxies. In Dekel, A. ve Ostriker, J. P., editors, *Formation of Structure in the Universe*, page 135.

Baldry, I. K., Balogh, M. L., Bower, R. G., Glazebrook, K., Nichol, R. C. ve diğ. 2006. Galaxy bimodality versus stellar mass and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(2),469–483.

Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H. ve diğ. 2004. Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 600(2),681–694.

Balogh, M. L., Baldry, I. K., Nichol, R., Miller, C., Bower, R. ve diğ. 2004. The Bimodal Galaxy Color Distribution: Dependence on Luminosity and Environment. *The Astrophysical Journal*, 615(2),L101–L104.

Barrena, R., Girardi, M. ve Boschin, W. 2013. The puzzling merging cluster abell 1914: new insights from the kinematics of member galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430,3453–3464.

Bell, E. F., Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., Borch, A. ve diğ. 2004. Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since z$_\sim$1. *The Astrophysical Journal*, 608(2),752–767.

Bender, R. 1987. Kinematics and Morphology of Elliptical Galaxies. *Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg*, 70,226.

Binney, J. ve Tremaine, S. 1987. *Galactic dynamics*. Princeton, N.J. : Princeton University Press, c1987.

Bishop, C. M. 2006. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.

Biviano, A., Katgert, P., Thomas, T. ve Adami, C. 2002. The ESO Nearby Abell Cluster Survey. XI. Segregation of cluster galaxies and subclustering. *Astronomy & Astrophysics*, 387,8–25.

Böhringer, H., Schuecker, P., Guzzo, L., Collins, C. A., Voges, W. ve diğ. 2004. The ROSAT-ESO Flux Limited X-ray (REFLEX) Galaxy cluster survey. V. The cluster catalogue. *Astronomy & Astrophysics*, 425,367–383.

Böhringer, H., Schuecker, P., Pratt, G. W., Arnaud, M., Ponman, T. J. ve diğ. 2007. The representative XMM-Newton cluster structure survey (REXCESS) of an X-ray luminosity selected galaxy cluster sample. *Astronomy & Astrophysics*, 469(1),363–377.

Böhringer, H., Voges, W., Huchra, J. P., McLean, B., Giacconi, R. ve diğ. 2000. The Northern ROSAT All-Sky (NORAS) Galaxy Cluster Survey. I. X-Ray Properties of Clusters Detected as Extended X-Ray Sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 129(2),435–474.

Böhringer, H. ve Werner, N. 2010. X-ray spectroscopy of galaxy clusters: studying astrophysical processes in the largest celestial laboratories. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 18(1-2),127–196.

Borgani, S. ve Kravtsov, A. 2011. Cosmological Simulations of Galaxy Clusters. *Advanced Science Letters*, 4(2),204–227.

Boselli, A. ve Gavazzi, G. 2006. Environmental Effects on Late-Type Galaxies in Nearby Clusters. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(842),517–559.

Bulbul, E., Liu, A., Kluge, M., Zhang, X., Sanders, J. S. ve diğ. 2024. The SRG/eROSITA All-Sky Survey. The first catalog of galaxy clusters and groups in the Western Galactic Hemisphere. *Astronomy & Astrophysics*, 685,A106.

Capozziello, S. ve Lattanzi, A. 2006. Spiral Galaxies as Chiral Objects? *Astrophysics and Space Science*, 301(1-4),189–193.

Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Scott, N. ve diğ. 2011. The ATLAS^{3D} project - I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(2),813–836.

Cariddi, S., D'Onofrio, M., Fasano, G., Poggianti, B. M., Moretti, A. ve diğ. 2018. Characterization of Omega-WINGS galaxy clusters. I. Stellar light and mass profiles. *Astronomy & Astrophysics*, 609,A133.

Carlberg, R. G., Yee, H. K. C., Ellingson, E., Morris, S. L., Abraham, R. ve diğ. 1997. The Average Mass Profile of Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal*, 485(1),L13–L16.

Cavagnolo, K. W., Donahue, M., Voit, G. M. ve Sun, M. 2009. Intracluster Medium Entropy Profiles for a Chandra Archival Sample of Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 182(1),12–32.

Cavaliere, A. ve Fusco-Femiano, R. 1976. X-rays from hot plasma in clusters of galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 49,137–144.

Clowe, D., Bradač, M., Gonzalez, A. H., Markevitch, M., Randall, S. W. ve diğ. 2006. A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal*, 648(2),L109–L113.

Coenda, V. ve Muriel, H. 2009. Galaxy properties in clusters: dependence on the environment and the cluster identification techniques. *Astronomy & Astrophysics*, 504(2),347–358.

Cole, S. ve Lacey, C. 1996. The structure of dark matter haloes in hierarchical clustering models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 281,716.

Conselice, C. J., Gallagher, J. S. ve Wyse, R. F. G. 2001. Galaxy Populations and Evolution in Clusters. I. Dynamics and the Origin of Low-Mass Galaxies in the Virgo Cluster. *The Astrophysical Journal*, 559(2),791–811.

Conselice, C. J., Gallagher, J. S. ve Wyse, R. F. G. 2002. Galaxy Populations and Evolution in Clusters. II. Defining Cluster Populations. *The Astronomical Journal*, 123(5),2246–2260.

Costanzi, M., Rozo, E., Rykoff, E. S., Farahi, A., Jeltema, T. ve diğ. 2019. Modelling projection effects in optically selected cluster catalogues. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482(1),490–505.

Coupon, J., Czakon, N., Bosch, J., Komiyama, Y., Medezinski, E. ve diğ. 2018. The bright-star masks for the HSC-SSP survey. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70,S7.

Csabai, I. ve others, 2003. The application of photometric redshifts to the sdss. *The Astronomical Journal*, 125,580.

De Lucia, G. ve Blaizot, J. 2007. The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 375(1),2–14.

Dempster, A. P., Laird, N. M. ve Rubin, D. B. 1977. Maximum Likelihood from Incomplete Data Via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 39,1–22.

Doi, M., Fukugita, M., Okamura, S. ve Turner, E. L. 1995. The Distribution of Early-and Late-Type Galaxies in the Coma Cluster. *The Astronomical Journal*, 109,1490.

Dressler, A. 1980. A catalog of morphological types in 55 rich clusters of galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 42,565–609.

Dressler, A., Oemler, A., Couch, W. J., Smail, I., Ellis, R. S. ve diğ. 1997. Evolution since z= 0.5 of the Morphology-Density Relation for Clusters of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 490(2),577–591.

Dubinski, J. 1998. The Origin of the Brightest Cluster Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 502(1),141–149.

Eckert, D., Vazza, F., Ettori, S., Molendi, S., Nagai, D. ve diğ. 2012. The gas distribution in the outer regions of galaxy clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 541,A57.

Eisenstein, D. J., Zehavi, I., Hogg, D. W., Scoccimarro, R., Blanton, M. R. ve diğ. 2005. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 633(2),560–574.

Elmegreen, B. G. 1995. Spiral Arms and Star Formation. In Ferrara, A., McKee, C. F., Heiles, C. ve Shapiro, P. R., editors, *The Physics of the Interstellar Medium and Intergalactic Medium*, volume 80 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 218.

Ettori, S., Donnarumma, A., Pointecouteau, E., Reiprich, T. H., Giodini, S. ve diğ. 2013. Mass Profiles of Galaxy Clusters from X-ray Analysis. *Space Science Reviews*, 177(1-4),119–154.

Ettori, S. ve others, 2019. Hydrostatic mass profiles in x-cop galaxy clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 621,581–593.

Evrard, A. E., Bialek, J., Busha, M., White, M., Habib, S. ve diğ. 2008. Virial Scaling of Massive Dark Matter Halos: Why Clusters Prefer a High Normalization Cosmology. *The Astrophysical Journal*, 672(1),122–137.

Faber, S. M., Willmer, C. N. A., Wolf, C., Koo, D. C., Weiner, B. J. ve diğ. 2007. Galaxy Luminosity Functions to z$_\sim$1 from DEEP2 and COMBO-17: Implications for Red Galaxy Formation. *The Astrophysical Journal*, 665(1),265–294.

Fairley, B. W., Jones, L. R., Wake, D. A., Collins, C. A., Burke, D. J. ve diğ. 2002. Galaxy colours in high-redshift, X-ray-selected clusters - I. Blue galaxy fractions in eight clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330(3),755–767.

Farouki, R. ve Shapiro, S. L. 1981. Computer simulations of environmental influences on galaxy evolution in dense clusters. II - Rapid tidal encounters. *The Astrophysical Journal*, 243,32–41.

Fasano, G., Marmo, C., Varela, J., D'Onofrio, M., Poggianti, B. M. ve diğ. 2006. WINGS: a WIde-field Nearby Galaxy-cluster Survey. I. Optical imaging. *Astronomy & Astrophysics*, 445(3),805–817.

Fasano, G., Poggianti, B. M., Bettoni, D., D'Onofrio, M., Dressler, A. ve diğ. 2015. Morphological fractions of galaxies in WINGS clusters: revisiting the morphology-density paradigm. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(4),3927–3944.

Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., Julien, P., Murray, S. ve diğ. 1978. The fourth Uhuru catalog of X-ray sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 38,357–412.

Gaia Collaboration, , Vallenari, A., Brown, A. G. A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J. ve diğ. 2023. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 674,A1.

Gavazzi, G., Fumagalli, M., Cucciati, O. ve Boselli, A. 2010. A snapshot on galaxy evolution occurring in the Great Wall: the role of Nurture at z= 0. *Astronomy & Astrophysics*, 517,A73.

Geller, M. J. ve Huchra, J. P. 1989. Mapping the Universe. *Science*, 246(4932),897–903.

Giodini, S., Finoguenov, A., Pierini, D., Zamorani, G., Ilbert, O. ve diğ. 2012. The galaxy stellar mass function of X-ray detected groups. Environmental dependence of galaxy evolution in the COSMOS survey. *Astronomy & Astrophysics*, 538,A104.

Gioia, I. M., Henry, J. P., Maccacaro, T., Morris, S. L., Stocke, J. T. ve diğ. 1990. The Extended Medium-Sensitivity Survey Distant Cluster Sample: X-Ray Cosmological Evolution. *The Astrophysical Journal*, 356,L35.

Gladders, M. D. ve Yee, H. K. C. 2000. A New Method For Galaxy Cluster Detection. I. The Algorithm. *The Astronomical Journal*, 120(4),2148–2162.

Goto, T., Yamauchi, C., Fujita, Y., Okamura, S., Sekiguchi, M. ve diğ. 2003. The morphology-density relation in the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346(2),601–614.

Gunn, J. E. ve Gott, J. R. 1972. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *The Astrophysical Journal*, 176,1.

Gursky, H., Kellogg, E., Murray, S., Leong, C., Tananbaum, H. ve diğ. 1971. A Strong X-Ray Source in the Coma Cluster Observed by UHURU. *The Astrophysical Journal*, 167,L81.

Haines, C. P., Pereira, M. J., Smith, G. P., Egami, E., Babul, A. ve diğ. 2015. LoCuSS: The Slow Quenching of Star Formation in Cluster Galaxies and the Need for Pre-processing. *The Astrophysical Journal*, 806(1),101.

Haines, C. P., Pereira, M. J., Smith, G. P., Egami, E., Sanderson, A. J. R. ve diğ. 2013. LoCuSS: The Steady Decline and Slow Quenching of Star Formation in Cluster Galaxies over the Last Four Billion Years. *The Astrophysical Journal*, 775(2),126.

Hansen, S. M., Sheldon, E. S., Wechsler, R. H. ve Koester, B. P. 2009. The Galaxy Content of SDSS Clusters and Groups. *The Astrophysical Journal*, 699(2),1333–1353.

Hao, J. ve others, 2010. A gmbcg galaxy cluster catalog of 55,424 rich clusters from sdss dr7. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 191,254–274.

Herbonnet, R. ve others, 2020. Cccp and meneacs: (updated) weak-lensing masses for 100 galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497,4684–4703.

Hilton, M., Collins, C., De Propris, R., Baldry, I. K., Baugh, C. M. ve diğ. 2005. The 2dF Galaxy Redshift Survey: correlation with the ROSAT-ESO flux-limited X-ray galaxy cluster survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 363(2),661–674.

Hilton, M. ve others, 2021. The atacama cosmology telescope: A catalog of >4000 sunyaev–zel'dovich galaxy clusters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 253,3.

Hogg, D. W., Blanton, M. R., Eisenstein, D. J., Gunn, J. E., Schlegel, D. J. ve diğ. 2003. The Overdensities of Galaxy Environments as a Function of Luminosity and Color. *The Astrophysical Journal*, 585(1),L5–L9.

Hubble, E. P. 1926. Extragalactic nebulae. *The Astrophysical Journal*, 64,321–369.

Hubble, E. P. 1936. *Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University Press.

Hudson, D. S., Mittal, R., Reiprich, T. H., Nulsen, P. E. J., Andernach, H. ve diğ. 2010. What is a cool-core cluster? a detailed analysis of the cores of the X-ray flux-limited HIFLUGCS cluster sample. *Astronomy & Astrophysics*, 513,A37.

Huertas-Company, M. ve others, 2015. A catalog of visual-like morphologies in the sdss using deep learning. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 221,8.

Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., Charlot, S., Tremonti, C. ve diğ. 2003a. Stellar masses and star formation histories for 10^5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1),33–53.

Kauffmann, G., Heckman, T. M., White, S. D. M., Charlot, S., Tremonti, C. ve diğ. 2003b. The dependence of star formation history and internal structure on stellar mass for 10^5 low-redshift galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1),54–69.

Kauffmann, G., White, S. D. M., Heckman, T. M., Ménard, B., Brinchmann, J. ve diğ. 2004. The environmental dependence of the relations between stellar mass, structure, star formation and nuclear activity in galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 353(3),713–731.

Kennicutt, R. C. 1983. The rate of star formation in normal disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 272,54–67.

Kim, E. J. ve Brunner, R. J. 2017. Star-galaxy classification using deep convolutional neural networks. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(4),4463–4475.

Koester, B. P., McKay, T. A., Annis, J., Wechsler, R. H., Evrard, A. ve diğ. 2007. A MaxBCG Catalog of 13,823 Galaxy Clusters from the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, 660(1),239–255.

Kormendy, J. ve Bender, R. 1996. A Proposed Revision of the Hubble Sequence for Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 464,L119.

Kravtsov, A. V. ve Borgani, S. 2012. Formation of Galaxy Clusters. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50,353–409.

Machado, R. E. G. ve others, 2022. Simulating nearly edge-on sloshing in the galaxy cluster abell 2199. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515,581–593.

Masters, K. L., Mosleh, M., Romer, A. K., Nichol, R. C., Bamford, S. P. ve diğ. 2010. Galaxy Zoo: passive red spirals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(2),783–799.

McLachlan, G. ve Peel, D. 2000. *Finite Mixture Models*. John Wiley - Sons, Inc.

Melnick, J. ve Sargent, W. L. W. 1977. The radial distribution of morphological types of galaxies in X-ray clusters. *The Astrophysical Journal*, 215,401–407.

Merloni, A., Nandra, K. ve Predehl, P. 2020. eROSITA's X-ray eyes on the Universe. *Nature Astronomy*, 4,634–636.

Merritt, D. 1993. Dynamics of Elliptical Galaxies. *Science*, 259(5103),1867–1871.

Mo, H., van den Bosch, F. C. ve White, S. 2010. *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Monteiro-Oliveira, R. ve others, 2018. New insights on the dissociative merging galaxy cluster abell 2034. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481,1097–1114.

Moore, B., Katz, N., Lake, G., Dressler, A. ve Oemler, A. 1996. Galaxy harassment and the evolution of clusters of galaxies. *Nature*, 379(6566),613–616.

Morandi, A. ve Sun, M. 2016. Probing dark energy via galaxy cluster outskirts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 457(3),3266–3284.

Oemler, A. 1974. The Systematic Properties of Clusters of Galaxies. Photometry of 15 Clusters. *The Astrophysical Journal*, 194,1–20.

Okabe, N. ve Smith, G. P. 2016. Locuss: Weak-lensing mass calibration of galaxy clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461,3794–3821.

Oyaizu, H., Lima, M., Cunha, C. E., Lin, H., Frieman, J. ve diğ. 2008. A Galaxy Photometric Redshift Catalog for the Sloan Digital Sky Survey Data Release 6. *The Astrophysical Journal*, 674(2),768–783.

Pavlinsky, M., Sazonov, S., Burenin, R., Filippova, E., Krivonos, R. ve diğ. 2022. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year. *Astronomy & Astrophysics*, 661,A38.

Pavlinsky, M., Tkachenko, A., Levin, V., Alexandrovich, N., Arefiev, V. ve diğ. 2021. The ART-XC telescope on board the SRG observatory. *Astronomy & Astrophysics*, 650,A42.

Pearson, W. J., Santos, D. J. D., Goto, T., Huang, T.-C., Kim, S. J. ve diğ. 2024. Effects of galaxy environment on merger fraction. *Astronomy & Astrophysics*, 686,A94.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B. ve diğ. 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12,2825–2830.

Peng, Y.-j., Lilly, S. J., Kovač, K., Bolzonella, M., Pozzetti, L. ve diğ. 2010. Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function. *The Astrophysical Journal*, 721(1),193–221.

Pierre, M., Chiappetti, L., Pacaud, F., Gueguen, A., Libbrecht, C. ve diğ. 2007. The XMM-Large Scale Structure catalogue: X-ray sources and associated optical data. Version I. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382(1),279–290.

Pierre, M., Pacaud, F., Adami, C., Alis, S., Altieri, B. ve diğ. 2016. The XXL Survey. I. Scientific motivations - XMM-Newton observing plan - Follow-up observations and simulation programme. *Astronomy & Astrophysics*, 592,A1.

Poggianti, B. 2004. Evolution of galaxies in clusters. In Dettmar, R., Klein, U. ve Salucci, P., editors, *Baryons in Dark Matter Halos*, page 104.

Poggianti, B. M., Jaffé, Y. L., Moretti, A., Gullieuszik, M., Radovich, M. ve diğ. 2017a. Ram-pressure feeding of supermassive black holes. *Nature*, 548(7667),304–309.

Poggianti, B. M., Moretti, A., Gullieuszik, M., Fritz, J., Jaffé, Y. ve diğ. 2017b. GASP. I. Gas Stripping Phenomena in Galaxies with MUSE. *The Astrophysical Journal*, 844(1),48.

Postman, M., Franx, M., Cross, N. J. G., Holden, B., Ford, H. C. ve diğ. 2005. The Morphology-Density Relation in z $\sim$1 Clusters. *The Astrophysical Journal*, 623(2),721–741.

Predehl, P., Andritschke, R., Arefiev, V., Babyshkin, V., Batanov, O. ve diğ. 2021. The eROSITA X-ray telescope on SRG. *Astronomy & Astrophysics*, 647,A1.

Ramos-Ceja, M. E., Pacaud, F., Reiprich, T. H., Migkas, K., Lovisari, L. ve diğ. 2019. Projection effects in galaxy cluster samples: insights from X-ray redshifts. *Astronomy & Astrophysics*, 626,A48.

Read, J. I., Wilkinson, M. I., Evans, N. W., Gilmore, G. ve Kleyna, J. T. 2006. The tidal stripping of satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366(2),429–437.

Ross, A. ve others, 2011. Systematic effects in large-scale structure measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 417,1350.

Roster, W., Salvato, M., Krippendorf, S., Saxena, A., Shirley, R. ve diğ. 2024. PICZL: Image-based photometric redshifts for AGN. *Astronomy & Astrophysics*, 692,A260.

Rozo, E., Rykoff, E. S., Koester, B. P., McKay, T., Hao, J. ve diğ. 2009. Improvement of the Richness Estimates of maxBCG Clusters. *The Astrophysical Journal*, 703(1),601–613.

Rykoff, E. S., Koester, B. P., Rozo, E., Annis, J., Evrard, A. E. ve diğ. 2012. Robust Optical Richness Estimation with Reduced Scatter. *The Astrophysical Journal*, 746(2),178.

Rykoff, E. S., Rozo, E., Busha, M. T., Cunha, C. E., Finoguenov, A. ve diğ. 2014. redMaPPer. I. Algorithm and SDSS DR8 Catalog. *The Astrophysical Journal*, 785(2),104.

Salvato, M., Ilbert, O. ve Hoyle, B. 2019. The many flavours of photometric redshifts. *Nature Astronomy*, 3,212–222.

Santos, J. S., Tozzi, P., Rosati, P. ve Böhringer, H. 2010. The evolution of cool-core clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 521,A64.

Sarazin, C. L. 1986. X-ray emission from clusters of galaxies. *Reviews of Modern Physics*, 58(1),1–115.

Sazonov, S., Burenin, R., Filippova, E., Krivonos, R., Arefiev, V. ve diğ. 2024. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first five surveys. *Astronomy & Astrophysics*, 687,A183.

Schellenberger, G. ve Reiprich, T. H. 2017. Hicosmo - cosmology with a complete sample of galaxy clusters - i. data analysis, sample selection and luminosity-mass scaling relation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469,3738–3761.

Schneider, P. 2015. *Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*. Springer.

Serra, P., Oosterloo, T., Morganti, R., Alatalo, K., Blitz, L. ve diğ. 2012. The ATLAS^{3D} project - XIII. Mass and morphology of H I in early-type galaxies as a function of environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422(3),1835–1862.

Sparke, L. S. ve Gallagher, J. S. 2007. *Galaxies in the Universe*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Stoughton, C., Lupton, R. H., Bernardi, M., Blanton, M. R., Burles, S. ve diğ. 2002. Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release. *The Astronomical Journal*, 123(1),485–548.

Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Narayanan, V. K., Strauss, M. A. ve diğ. 2001. Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. *The Astronomical Journal*, 122(4),1861–1874.

Thomas, T. ve Katgert, P. 2006. The ESO nearby Abell cluster survey. IX. The morphology-radius and morphology-density relations in rich galaxy clusters. *Astronomy & Astrophysics*, 446(1),31–38.

Toomre, A. ve Toomre, J. 1972. Galactic Bridges and Tails. *The Astrophysical Journal*, 178,623–666.

van den Bergh, S. 1998. *Galaxy Morphology and Classification*. Cambridge University Press.

Vikhlinin, A., Kravtsov, A., Forman, W., Jones, C., Markevitch, M. ve diğ. 2006. Chandra Sample of Nearby Relaxed Galaxy Clusters: Mass, Gas Fraction, and Mass-Temperature Relation. *The Astrophysical Journal*, 640(2),691–709.

Vikhlinin, A., Markevitch, M., Murray, S. S., Jones, C., Forman, W. ve diğ. 2005. Chandra Temperature Profiles for a Sample of Nearby Relaxed Galaxy Clusters. *The Astrophysical Journal*, 628(2),655–672.

Wake, D. A., Collins, C. A., Nichol, R. C., Jones, L. R. ve Burke, D. J. 2005. The Environmental Dependence of Galaxy Colors in Intermediate-Redshift X-Ray-selected Clusters. *The Astrophysical Journal*, 627(1),186–202.

Wen, Z. L. ve Han, J. L. 2013. Substructure and dynamical state of 2092 rich clusters of galaxies derived from photometric data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436(1),275–293.

Wetzel, A. R., Tinker, J. L. ve Conroy, C. 2012. Galaxy evolution in groups and clusters: star formation rates, red sequence fractions and the persistent bimodality. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(1),232–243.

Wetzel, A. R., Tinker, J. L., Conroy, C. ve van den Bosch, F. C. 2013. Galaxy evolution in groups and clusters: satellite star formation histories and quenching time-scales in a hierarchical Universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432(1),336–358.

White, M. 2001. The mass of a halo. *Astronomy & Astrophysics*, 367,27–32.

Wray, J. J. ve Gunn, J. E. 2008. A New Technique for Galaxy Photometric Redshifts in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, 678(1),144–153.

Wyder, T. K., Martin, D. C., Schiminovich, D., Seibert, M., Budavári, T. ve diğ. 2007. The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 173(2),293–314.

Yıldız, M. K., Serra, P., Peletier, R. F., Oosterloo, T. A. ve Duc, P.-A. 2017. Star formation associated with neutral hydrogen in the outskirts of early-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(1),329–355.

Zabludoff, A. I. ve Mulchaey, J. S. 1998. Hierarchical Evolution in Poor Groups of Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 498(1),L5–L8.

Zwicky, F. 1937. On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *The Astrophysical Journal*, 86,217.

EKLER

EK 1. Tezden Üretilmiş Yayının Kapak Sayfası

TJAA Vol. 0, Issue 0, p.(0000). *Research Article*

Building Clean Galaxy Samples From SDSS: An Assessment of Galaxy Selection

Hatice Bahar Atali[1,2] ★, Sinan Alis[3]

[1] *Institute of Graduate Studies in Sciences, Istanbul University, 34116 Istanbul, Turkey*
[2] *Eyupsultan Municipality, Ali Kuscu Uzay Evi, 34060 Istanbul, Turkey*
[3] *Department of Astronomy and Space Sciences, Faculty of Science, Istanbul University, 34116 Istanbul, Turkey*

Accepted: XXX. Revised: YYY. Received: ZZZ.

Abstract
We present an assessment of querying galaxy samples through the Sloan Digital Sky Survey database. We performed SQL queries on 26 galaxy cluster fields, which consist of a total of 7437 galaxies. A thorough visual inspection of the samples revealed the inclusion of artifacts, stars, or quasars in our sample. Moreover, there are galaxies that are not reliable in terms of photometry, and such galaxies are included in samples even when queried with the Clean Photometry procedure. In this work, we investigated several SDSS photometry tags and proposed a modified SQL query to obtain more reliable galaxy samples, at least for studies concerning cluster member galaxies. The newly proposed query in this work recovers 338 galaxies that were originally excluded by Clean Photometry and removes an additional 156 objects that are either not real galaxies or not photometrically reliable.

Key words: surveys – catalogues – galaxies: photometry – galaxies: general

1 Introduction

Constructing clean galaxy catalogs is a crucial prerequisite for studying the galaxy populations of galaxy clusters, particularly when interpreting environmental trends such as the evolution of the red sequence, the distribution of star-forming galaxies, or the radial dependence of quenching. Wide-field optical surveys such as the Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. (2000); Abazajian et al. (2009)) have enabled cluster studies over thousands of square degrees, but the separation of stars/quasars and galaxies remains a significant source of systematic uncertainty. Misclassified stars dilute galaxy samples, bias number counts, and propagate into downstream analyzes, including color-magnitude relations, photometric-redshift distributions, and measurements of environmental effects (Scranton et al. 2002; Ross et al. 2011; Mandelbaum 2018).

The SDSS photometric pipeline performs star-galaxy separation primarily using morphological information, quantified through the difference between the PSF and model magnitudes (`psfMag`−`modelMag`; Lupton et al. (2001)). This criterion is highly effective for bright sources and produces contamination fractions below 1% for $r < 20$ mag. However, towards fainter magnitudes ($r \geq 21$ mag), galaxies become increasingly compact relative to the point-spread function (PSF), and the separation boundary between point-like and extended sources becomes less distinct. As a result, stellar contamination increases to several percent near the survey limit (Yasuda et al. 2001; Ivezić et al. 2007), which is particularly relevant for cluster studies at $z \sim 0.4$ where many low-luminosity members approach the detection threshold.

⋆ atalibahar@gmail.com

© 0000 Turkish Astronomical Society (TAD)

Contamination from stars or quasars in galaxy catalogs is not the only problem. Bright stars generate diffraction spikes, scattered light halos, and ghost reflections, while satellite trails, detector defects, and inadequate sky subtraction produce spurious detections and reduce purity. Thus, accurate masking of problematic regions is a critical step in the construction of galaxy catalogs from large imaging surveys. If not properly masked, these regions can lead to artificial fluctuations in galaxy number densities, contamination by non-astrophysical sources, and biases in clustering, weak-lensing, and cluster population studies (Scranton et al. 2002; Ross et al. 2011).

In the context of galaxy clusters, incomplete masking can distort projected radial profiles and bias richness estimates by either removing real galaxies or introducing false sources near bright objects. Surveys such as CFHTLS, DES, HSC, KiDS, and Euclid employ detailed survey masks that encode regions to be excluded and imaging-quality flags to ensure uniform selection functions across the footprint (Abazajian et al. 2009; Ivezić et al. 2007; Coupon et al. 2018; Euclid Collaboration et al. 2025). Robust masking is particularly important when combining imaging data with external catalogs (e.g., X-ray or spectroscopic follow-ups), as spatially varying incompleteness can otherwise mimic environmental trends. Consequently, modern large-scale structure and cluster studies treat survey masks as an integral component of catalog construction and propagate masking effects explicitly into statistical analyzes.

Recent machine-learning approaches, including random forests and deep neural networks (Brescia et al. 2015; Kim & Brunner 2017), have improved separation performance but remain sensitive to training-set biases (Carrasco Kind & Brunner 2020). Deep learning techniques have increasingly been adopted in wide-field imaging surveys to mitigate instrumental artifacts and improve star-galaxy separation

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Hatice Bahar ATALI
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü
Mezuniyet Yılı	2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Programı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı
Mezuniyet Tarihi	2014

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Anabilim Dalı
Programı	Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı
Mezuniyet Tarihi	2026

Makale ve Bildiriler

Makaleler

Atalı, H.B. ve Aliş S., 2026, Building Clean Galaxy Samples From SDSS: An Assessment of Galaxy Selection, Basım Aşamasında, *Turkish Journal of Astronomy & Astrophysics*, Basım Aşamasında

Atali, H. B., Alis, S., Yelkenci, K., Saygac, A. T., Aksoyu Nuranoglu, Y., Fisek, S., Ulgen, E. K., 2014, Times of Minima of Eclipsing Cataclysmic Variables, *Information Bulletin on Variable Stars (IBVS)*, Number 6102.

Bildiriler

Atalı, H. B., 2024, Sert X-Işınlarında Belirlenen Galaksi Kümelerinin Optik Özellikleri, *23. Ulusal Astronomi Kongresi (UAK)*, İstanbul, Eylül 2024.

Atalı, H. B., Aliş, S., Saygaç, A. T., 2013, Monitoring SW Sex Type Cataclysmic Variables with IST60 Telescope, *Asiago Winter School – Very High Time and Space Resolution Astrophysics*, University of Padova.

Atalı, H. B., Yalçınkaya, A., 2012, Geleceğin Gökyüzü Tarama Projeleri – LSST ve GAIA, *XVII. Ulusal Astronomi ve Uzay Bilimleri Kongresi, VII. Ulusal Öğrenci Astronomi ve Uzay Bilimleri Kongresi*, İnönü Üniversitesi.