

BL Lac Tipi Blazarların Kısa ve Uzun Dönemli Tayfsal Davranışlarının ve Optik Tayfsal Enerji Dağılımlarının İncelenmesi



Murat TEKKEŞİNOĞLU¹, Ergün EGE², Aykut ÖZDÖNMEZ¹

Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzak Bilimleri Bölümü¹
İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzak Bilimleri Bölümü²

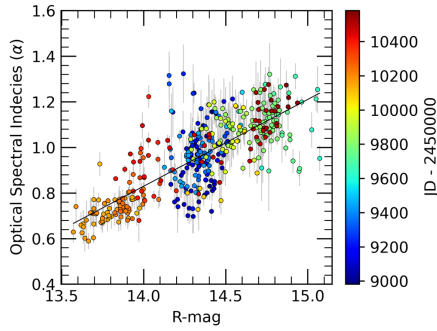
UAK
2026

Giriş

BL Lac tipi blazarlar, rölativistik jetlerinin gözlemci doğrultusuna yakın olması nedeniyle jet kaynaklı termal olmayan ışınımın baskın olduğu aktif galaksi çekirdekleridir [6]. Optik emisyonları çoğunlukla senkrotron kökenli olup dakikalardan yıllara uzanan zaman ölçeklerinde belirgin akısal ve tayfsal değişimler gösterebilir. Tayfsal indeks ve renk-parlaklık ilişkileri, bu değişimlerin fiziksel kökenini araştırmada önemli bilgiler sağlar. Daha parlakken daha mavi (ing. bluer-when-brighter; BWB) davranışı genellikle yüksek enerjili parçacık enjeksiyonu, şoklar ve Doppler faktörü değişimleri gibi jet-tabanlı süreçlerle ilişkilendirilirken; daha parlakken daha kırmızı (ing. redder-when-brighter; RWB) veya akromatik davranışlar, termal bileşenlerin, ev sahibi galaksinin veya farklı jet bölgelerinin görelî katkılarına işaret edebilir.

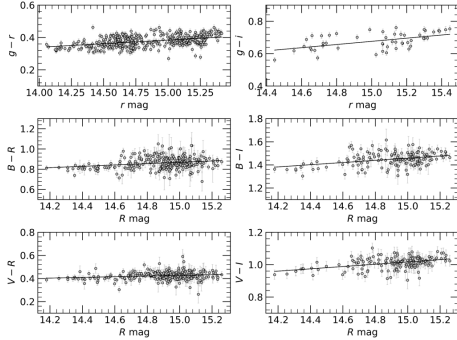
Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Türkiye Ulusal Gözlemevi bünyesindeki TUG100, TUG060 teleskoplarından 2019–2024 yılları arasındaki BVRI bantlarında 77730 fotometrik gözlemden oluşan çok yıllık optik gözlemler ve arşiv verileri (Zwicky Transient Facility; ZTF gri bantlarında) kullanılarak 19 kaynak için renk-parlaklık diyagramları (RPD) ve tayfsal indeksin zamana ve parlaklığa bağlı dağılımları oluşturulmuştur.



Şekil 1: 1ES 1959+650 kaynağının tayfsal indeks - parlaklık dağılımları örnek olarak verilmiştir.

Yaklaşık eş zamanlı en az dört banttaki gözlemler kullanılarak gecelik optik tayfsal enerji dağılımları (TED) oluşturulmuştur. Sönümleme düzeltmesi sonrası akıya çevrilen veriler, $\log(F_\nu) = -\alpha \log(\nu) + C$ bağıntısıyla modellenerek tayfsal indeks α belirlenmiştir. α 'nın parlaklık ve zamana bağlı değişimi doğrusal regresyonla incelenmiştir (Şekil 1).



Şekil 2: 3C 66A'nın kısa-uzun ölçekli renk-parlaklık ilişkileri örnek olarak verilmiştir.

TUG B-R, B-I, V-R ve V-I, ZTF ise g-r ve g-i renk indisiyle RPD oluşturulmuştur (bkz. Şekil 2). RPD ilişkiler doğrusal regresyon analiziyle modellenmiş olup ilişkinin gücü Spearman korelasyon katsayısı (r) ve istatistiksel anlamlılığı p -değeri ile değerlendirilmiştir. Belirlenen eğime göre; pozitif eğimler BWB, negatif eğimler RWB, belirgin olmayan eğimler ise akromatik olarak sınıflandırılmıştır.

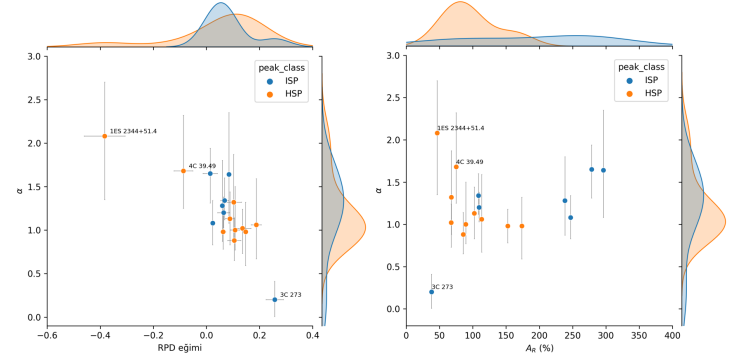
BULGULAR

Gecelik optik TED analizleri sonucunda 17 kaynak için tayfsal indeks değerleri belirlenmiştir. Tayfsal indeksler kaynakların çoğunda yaklaşık 0.6–2.35 aralığında değişirken, tüm örneklem ortalama değeri $\alpha = 1.32$ olarak bulunmuştur (Tablo 1). Kaynaklar arasında belirgin farklılıklar gözlenmiştir. 3C 273 en düşük tayfsal indeks değerleriyle (ortalanca $\alpha = 0.19$), 1ES 2344+51.4 ise en yüksek değerlerle (ortalanca $\alpha = 2.08$) örneklem genel dağılımından ayrılmıştır. Genel tayfsal indeks-parlaklık ve renk-parlaklık ilişkileri, kaynakların çoğunda BWB eğiliminin baskın olduğunu göstermektedir. Tayfsal indeks-parlaklık analizlerinde B2 1215+30, 1ES 1218+304 ve 1ES 0806+52.4 güçlü; OJ 287, 1E 1458.8+2249, OQ 240 ve 3C 273 ise orta-güçlü BWB davranışı sergilemiştir. Mrk 421'de daha zayıf BWB, ZWI 187'de akromatik davranış görülürken, S2 0109+224 ve 1ES 2344+51.4 için belirgin bir ilişki saptanmamış, 4C 39.49 ise RWB eğilimi göstermiştir.

Tablo 1: Tüm kaynaklardan elde edilen TED bilgileri.

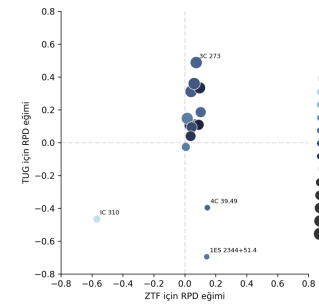
Kaynak	N_{TED}	α Aralığı	Ortanca α	Kaynak	N_{TED}	α Aralığı	Ortanca α
OJ 287	177	0.87-1.18	$1.28^{+0.52}_{-0.40}$	1E 1458+2249 [3]	80	0.83-1.44	$1.13^{+0.31}_{-0.30}$
OQ 240	129	0.78-1.18	$0.98^{+0.20}_{-0.20}$	S2 0109+224	80	1.03-1.38	$1.20^{+0.18}_{-0.17}$
Mrk 421	151	0.65-1.14	$0.88^{+0.26}_{-0.22}$	1ES 1218+304 [7]	221	0.67-1.59	$1.06^{+0.52}_{-0.39}$
4C 39.49	231	1.25-2.32	$1.68^{+0.64}_{-0.43}$	1ES 2344+51 [4]	101	1.35-2.70	$2.08^{+0.61}_{-0.73}$
3C 66A	185	1.12-1.60	$1.34^{+0.26}_{-0.23}$	1ES 0806+52	97	0.73-1.24	$1.02^{+0.22}_{-0.29}$
ZWI 187	199	0.88-1.87	$1.32^{+0.55}_{-0.44}$	1ES 1959+650	423	0.59-1.32	$0.98^{+0.35}_{-0.39}$
3C 273	94	0.006-0.4	$0.19^{+0.22}_{-0.19}$	S5 0716+714 [9]	427	0.83-1.34	$1.08^{+0.26}_{-0.26}$
B2 1215+3 [1]	136	0.77-1.50	$1.00^{+0.50}_{-0.22}$	S5 1803+784 [8]	184	1.17-2.12	$1.65^{+0.47}_{-0.48}$
BL Lacertae [2]	367	1.08-2.35	$1.64^{+0.71}_{-0.56}$				

Kaynakların optik tayfsal indeksleri ile renk-parlaklık diyagramlarından elde edilen eğimler karşılaştırıldığında (Şekil 3 Sol), RPD eğimi arttıkça tayfsal indeksin genel olarak azaldığı görülmektedir. HSP kaynakları çoğunlukla daha düşük α ve daha yüksek RPD eğimleriyle, ISP kaynakları ise daha yüksek α ve daha düşük eğimlerle dağılım göstermektedir. 1ES 2344+51.4, 4C 39.49 ve 3C 273 bu genel dağılımdan belirgin şekilde ayrılan kaynaklardır.



Şekil 3: (Sol) Kaynakların tayfsal indeksin renk parlaklık ilişkisi arasındaki eğime göre dağılımları. (Sağ) Tayfsal indeksin R-bandı değişim geniliğine göre dağılımları Burada renklendirmeler senkrotron tepesi sınıflamasına göre yapılmıştır.

Tayfsal indeks ile uzun dönemli R-bandı değişim geniliği karşılaştırıldığında (Şekil 3, sağ), HSP kaynaklarının genel olarak daha düşük, ISP kaynaklarının ise daha yüksek değişim genilikleri sergilediği görülmektedir. 3C 273, 1ES 2344+51.4 ve 4C 39.49 bu genel eğilimden belirgin biçimde ayrılmaktadır. TUG ve ZTF verilerinden elde edilen RPD eğimleri karşılaştırıldığında (Şekil 4), kaynakların büyük bölümünde iki veri setinden benzer renk davranışları elde edilmiştir. Bununla birlikte 4C 39.49 ve 1ES 2344+51.4 için ZTF verilerinde pozitif, TUG verilerinde ise negatif eğimler belirlenmiş ve bu kaynaklar genel eğilimden ayrılmıştır.



Şekil 4: TUG ve ZTF RPD eğimlerinin karşılaştırması; nokta boyutları korelasyon katsayılarını göstermektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Genel olarak kaynakların BWB veya akromatik davranış göstermesi, optik değişkenliğin büyük ölçüde jet kaynaklı senkrotron emisyon tarafından belirlendiğini desteklemektedir. HSP ve ISP kaynaklarının tayfsal indeks, RPD eğimi ve değişim geniliği dağılımlarında genel olarak farklı bölgelerde toplandığı görülmüştür.

Bununla birlikte bazı kaynaklar bu eğilimden ayrılmaktadır. 1ES 2344+51.4 ve 4C 39.49 yüksek tayfsal indeksleri ve RWB eğilimleriyle dikkat çekmekte olup, bu davranışta ev sahibi galaksinin ve/veya termal bileşenlerin katkısının etkili olabileceği düşünülmektedir [4]. 3C 273 ise çok düşük tayfsal indeks ve düşük değişim geniliğiyle diğer kaynaklardan ayrılmakta; bu durum optik/UV bölgede yığılma diskinden kaynaklanan big blue bump bileşeninin önemli katkısına işaret etmektedir [5,10].

Sonuç olarak, örneklem büyük bölümünde jet-tabanlı süreçler baskın görünürken, bazı kaynaklarda ev sahibi galaksi ve yığılma diski katkılarının optik tayfsal ve renk davranışlarının şekillenmesinde önemli rol oynadığı düşünülmektedir.



- Referanslar**
- [1] Ozdonmez A., Er H., et al., 2025, ApJ, 979, 56.
 - [2] Takey A., Ege E., et al., 2026, MNRAS, 550, 1200.
 - [3] Ozdonmez A., Tekkesinoglu M., 2024, PASA, 41, 52.
 - [4] Ozdonmez A., 2024, JARNA, 10, 684.
 - [5] Gaur H., Gupta A.-C et al., 2012, MNRAS, 425, 3002.
 - [6] Urry, C. M., & Padovani, P. 1995, PASP, 107, 803
 - [7] Diwan R., et al., 2023, MNRAS, 524, 4333.
 - [8] Agarwal A., Ozdonmez A., 2022, ApJ, 933, 42.
 - [9] Ege E., Ozdonmez A., et al., 2024, ApJ, 971, 74.
 - [10] Türlür M., Paltani S., et al., 1999, A&AS, 134, 89.

Teşekkürler

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 121F427 numaralı hibe ile desteklenmiştir. Türkiye Ulusal Gözlemevi Antalya yerleşkesi ekibine, proje numaraları TUG060 ve TUG100 teleskoplarının kullanımındaki kısmi destekleri için teşekkür ederiz: 19AT100-1486, 19BT60-1505, 22AT60-1907, 23AT100-2006.