Blazar TED'lerinin Basit Regresyon İle Modellenmesi

Berker Utku^{1,2} $\bullet \star$, Nurten Filiz Ak^{2,3} \bullet , Seyit Hökelek² \bullet ,

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 38039, Kayseri, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Ana Bilim Dalı, 38039, Kayseri, Türkiye

³ Erciyes Üniversitesi, UZAYBIMER Gözlemevi, Araştırma ve Uygulama Merkezi, 38039, Kayseri, Türkiye

Accepted: March 8, 2025. Revised: March 8, 2025. Received: November 29, 2024.

Özet

Blazarlar, merkezi süper kütleli karadeliğin etrafındaki yığılma diskine dik yönde uzanan jet yapılarıyla karakterize edilen, aktif galaksi çekirdeklerinin bir alt sınıfıdır. Diğer aktif galaksilerin aksine, blazarların jetleri gözlemciye doğru hizalanmıştır. Bu nedenle, optik spektrumları belirgin çizgi benzeri yapılar içermez ve bu durum, geleneksel yöntemlerle uzaklıklarının belirlenmesini güçleştirir. Blazarlarla ilgili en önemli gözlemsel bilgiler, Tayfsal Enerji Dağılımlarından (TED) elde edilmektedir. Bu çalışmada, seçilmiş blazarların TED yapıları, arşiv verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Blazarlar için iki önemli parametre olan düşük enerjideki pik akısı ve pik frekansı değerlerini elde etmek için detaylı ve uzun soluklu analizler yerine pratik ve hızlı sonuçlar sağlayan yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. *Imfit* ile Gauss modellemesi, SVR ile regresyon analizi ve BLAST yöntemlerinin kullanılması ile elde edilen sonuçların hem kendi içinde hem de literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu hızlı yöntemler pratik olması bakımından çok sayıda blazarın istatistiksel çalışmalarının yapılabilmesini sağlayacak veriler sunabilmektedir. Ayrıca pik frekansı parametresi manyetik alan sinkrotron frekansının doğrudan bir göstergesi olduğundan, elde edilen sonuçlar blazarların doğasını anlamaya katkı sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Abstract

Blazars are a subclass of active galactic nuclei characterized by jet structures oriented perpendicular to the accretion disk surrounding the central black hole. Unlike other active galaxies, the jets of blazars are aligned nearly directly toward the observer. As a result, their optical spectra lack distinct line-like features, making them unsuitable for determining distances using traditional methods. The most significant observational insights into blazars come from their spectral energy distributions (SEDs). In this study, the spectral energy distributions of selected blazars were constructed using archival data. Instead of employing detailed modeling of the SEDs, simple methods were applied to determine two fundamental parameters: the peak flux and the peak frequency. These straightforward approaches provide practical and rapid results, making them suitable for statistical studies of blazars. The outcomes of three different approaches are compared in this study, and it is concluded that these fast methods hold promise for enhancing our understanding of the physical nature and intrinsic properties of blazars.

Anahtar Kelimeler: galaxies: active - BL Lacertae objects: general - methods: data analysis

1 Giriş

Blazarlar, elektromanyetik spektrumun tamamında güçlü bir ışınıma sahiptir ve özellikle gama-ışın bölgesinde ışınım yaymaları onları önemli astrofiziksel kaynaklardan biri yapar (Prandini & Ghisellini 2022). Ayrıca, düşük enerji bölgesinde, özellikle radyo dalga boylarında, büyük ölçüde sinkrotron ışımasından kaynaklanan güçlü ışınımları vardır. Elektronlar, güçlü manyetik alanlar içinde spiral hareket ederken enerji kaybeder ve sinkrotron ışınımı üretir. Blazarların düşük enerji bölgesinde maksimum ışınım yaydığı frekans, sinkrotron frekansının doğrudan bir fonksiyonu olarak kabul edilir (Meyer ve diğ. 2011).

Blazarlar, güçlü jet yapılarına sahip kuazarlar olarak bilinir. Ancak eğim açıları çok düşük olduğundan, gözlemcinin bakış doğrultusu ile jetin çıkış doğrultusu çakışıktır. Bu nedenle kuazar tayflarında tipik olarak gözlenen güçlü salma çizgileri blazar tayflarında gözlenememektedir. Optik tayflarında belirgin

© 2025 Turkish Astronomical Society (TAD)

çizgiler olmaması, blazarların uzaklıklarının belirlenmesinde ve fiziksel özelliklerinin anlaşılmasında kullanışlı değildir. Yaklaşık uzaklıklarını tahmin etmek için Tayfsal Enerji Dağılımları (TED) kullanılabilir. TED, bir kaynağın tüm dalgaboylarında alınan akı ölçümlerinin birlikte değerlendirildiği bir tür geniş bant tayftır.

Meyer ve diğ. (2011) çalışmalarında geniş bir blazar örnekleminin TED'lerini inceleyerek sinkrotron pik frekansı (ν_{pik}) ile pik parlaklık (L_{ν}) arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Sonuçları, blazarların iki ana gruba ayrılabileceğini göstermektedir. Bulgularına göre, bilinen bir blazarın pik frekans değeri temel alınarak uzaklığını tahmin etmek mümkündür.

TED'lerin ayrıntılı modellerini oluşturmak üzerine çok sayıda çalışma yapılmış ve bu kapsamda çeşitli programlar üretilmiştir. Ancak birçoğu blazar modellemeleri için kullanılamamaktadır (örn. Boquien ve diğ. 2019). Bunlara rağmen, $\nu_{\rm pik}$ ve f_{ν} parametrelerini belirlemek için ayrıntılı TED modellemesi gerekli değildir. Basit yaklaşımlarla bu iki parametre belirlenebilmektedir.

23. Ulusal Astronomi Kongresi – **UAK 2024** 2-6 Eylül 2024, İstanbul, İstanbul Üniversitesi

^{*} org.berkerutku@gmail.com



Şekil 1. B200 (0112p3208) adlı blazarın aykırı değer tespiti yapıldıktan sonraki oluşan TED grafiği.

Bu çalışmada, seçilmiş blazarların TED yapıları modellenerek sinkrotron pik frekansı ($\nu_{\rm pik}$) ve pik akısı (f_{ν}) belirlemek için hızlı ve basit modeller kullanılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen blazarların TED'lerini oluşturmak için literatürdeki veriler alınmış ve TED modellemesi için üç farklı yaklaşım kullanılmıştır. Nihayetinde en iyi model seçilmiş ve f_{ν} ve $\nu_{\rm pik}$ parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler literatürdeki bilinen değerlerle karşılaştırılmıştır. Son olarak, blazarlar için f_{ν} ve $\nu_{\rm pik}$ dağılımları değerlendirilmiştir.

2 Örneklem Seçimi ve Verilerin Hazırlanması

Blazarların incelenmesine yönelik bu çalışmada, Roma-BZCAT kataloğu temel alınmıştır. Bu kapsamlı katalogda yer alan toplam 3561 blazar arasından, ilk aşamada rastgele seçilmiş 200 kaynak detaylı olarak incelenmiştir. Ancak, bu seçilen kaynaklar arasında 15 tanesinin blazar adayı statüsünün şüpheli olduğu belirlenmiş ve bu kaynaklar daha güvenilir olanlarla değiştirilmiştir.

İkinci aşamada, elektromanyetik tayfın hemen hemen tüm bölgelerini kapsayan ve yeterli sayıda ölçümü olan 31 kaynak belirlenmiştir. Bu kaynakların çok sayıda ölçümünün olması ve ölçümlerin farklı dalgaboyu aralıklarına dağılması TED yapılarının daha anlaşılır ve analizlerin daha güvenilir olmasını sağlamıştır. Bu kaynaklara ek olarak, literatürde daha önce yapılmış çalışmalardaki blazarlara ait TED grafiklerinden de faydalanılmıştır. Özellikle Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında yer alan 40 kaynak, örneklemimize eklenmiş ve TED grafikleri karşılaştırmalar için referans alınmıştır.

Bu kaynakların eklenmesi ile toplam blazar sayısı 71 olarak belirlenmiştir. Her bir kaynağın tayfsal enerji dağılımını oluşturmak için gerekli veriler Strasbourg Astronomical Data Center altında yer alan VizieR veri tabanı kullanılmıştır.

Bu proje kapsamında toplamda 71 blazarın detaylı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu blazarlar, projenin ana hedefleri doğrultusunda dikkatle seçilmiş ve incelenmiştir. Çalışma süresince, seçilen kaynakların veri bütünlüğüne ve kalitesine özel önem verilmiş; böylece, literatürdeki benzer araştırmalarla uyumlu ve kapsamlı bir analiz ortaya konmuştur.

2.1 Tayfsal Enerji Dağılımlarının Elde Edilmesi

Tayfsal enerji dağılımı grafiklerinde, tayf grafiklerinden farklı olarak x-ekseninde frekans (ν) ve y-ekseninde νf_{ν} veya x-ekseninde dalgaboyu (λ) ve y-ekseninde λf_{λ} kullanılmaktadır. Bu nedenle, tüm ölçümler, parlaklık veya akı gibi değerlerden TED için uygun birimlere dönüştürülmüştür. Dönüştürülen bu verilerin doğruluğunu test etmek amacıyla, daha önce Roma-BZCAT verilerinden oluşturulmuş TED grafiklerle bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda, oluşturulan TED grafiklerinin önceki çalışmalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

TED modellemesinin ilk aşamasında, veri setlerindeki aykırı değerlerin tespit edilmesi ve ayıklanması gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Python programlama dilinin sunduğu aykırı değer tespiti yöntemleri kullanılmıştır. Aykırı değer tespiti, bir veri setinde diğer verilere kıyasla önemli ölçüde farklı olan nadir gözlemleri belirlemek için kullanılan bir tekniktir.

Aykırı değerlerin temizlenmesiyle oluşturulan yeni TED grafiklerinde, belirgin bir şekilde iki tepeli bir yapı gözlenmiştir. Bu yapı, blazarların hem düşük enerjili (sinkrotron) hem de yüksek enerjili (ters compton) bileşenlerini yansıtmakta olup, gelecekte uygulanacak modelleme metotları konusunda önemli ipuçları sağlamıştır. Şekil 1'de örneklemimiz içinde yer alan bir blazar için elde edilen TED grafiği verilmiştir.

3 Yöntemler

Aykırı verilerden arındırılmış TED grafikleri elde edilen 71 blazarın TED yapıları beklendiği gibi çift tepeli olarak bulunmuştur. Sinkrotron ışınımından kaynaklanan f_{ν} ve ν_{pik} değerlerini belirlemek için düşük frekans bölgesindeki dağılımın modellenmesi gerekmektedir. Burada temel amaç tüm TED'i modellemek yerine sadece f_{ν} ve ν_{pik} parametrelerini belirlemek olduğundan, çok sayıda kaynak için pratik ve hızlı uygulanabilir yaklaşımlar seçilmiştir. Modelleme sürecinde,üç farklı yaklaşım ele alınmış, Imfit kütüphanesi (Newville ve diğ. 2014) ile Gauss modellemesi, Destek Vektör Regresyonu (SVR) ve BLAST (Glauch ve diğ. 2022) sinkrotron aracı entegre bir şekilde uygulanmıştır. Bu yöntemler, seçilen blazar adaylarının veri setleri üzerinde analizler analizler yapılarak, blazarların fiziksel özelliklerini ve davranışlarını anlamaya yönelik kapsamlı bir çerçeve sunmuştur.

3.1 lmfit ile Modelleme

Blazarların TED yapıları yaklaşık olarak iki ya da daha fazla Gauss fonksiyonu ile tanımlanabilecek bir yapıya sahiptir. Bu tanımlama, TED'in tüm ayrıntılarını yakalamaya yeterli olamasa da TED'in düşük enerji bölgesindeki f_{ν} ve $\nu_{\rm pik}$ parametrelerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi için çok hızlı ve pratik bir yaklaşımdır. TED'in çift tepeli yapısını dikkate almak için, modelleme için düşük enerji bölgesini tanımlamak üzere bir ve yüksek enerji bölgesini tanımlamak için ikinci bir Gauss eğrisi kullanılmıştır. Her iki Gauss dağılımı da eş zamanlı olarak modellendiğinden, bu modeli kısaca çift-Gauss modeli olarak tanımladık. Modelleme için lineer olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır.

lmfit, Python programlama dili için geliştirilmiş, veri analizi, modelleme ve eğri uydurma işlemleri için etkili bir kütüphanedir. lmfit, özellikle deneysel verilerin belirli bir model fonksiyonuna uyumunun optimize edilmesinde ve modelin veriyle ne derece iyi örtüştüğünün değerlendirilmesinde



Şekil 2. B200 (0112p3208; üst panel) ve B194 (0112p2244; alt panel) adlı blazarların 1mfit ile oluşturulmuş grafikleri verilmiştir. Mor çizgi 1mfit modeli. Mavi noktalar verileri gösterirken turuncu yıldız 1mfit sonucunda bulunan sinkrotron pik değerini göstermektedir.

önemli bir rol oynadığından, bu çalışma için ideal bir araç olarak seçilmiştir. Ayrıca, 1mfit'in istatistiksel analiz yetenekleri, bu çalışmada elde edilen sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Eğri uydurma işlemleri sonucunda, model parametrelerinin hata payları ve güven aralıkları hesaplanmıştır. Bu analizler, modelleme sonuçlarının sağlamlığını test etmede ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmada önemli bir katkı sunmuştur. Şekil 2'de iki örnek balazar için 1mfit ile elde edilen modelleri ve TED verilerine uyumu gösterilmiştir.

3.2 SVR ile Modelleme

Destek Vektör Regresyonu (SVR), makine öğrenmesinde sıkça kullanılan güçlü bir regresyon yöntemidir. SVR, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri modelleyerek, bağımlı değişkenin tahminini amaçlar. Bu çalışmada, SVR yöntemi, blazarların TED modellenmesinde uygulanmıştır. SVR'nin doğrusal olmayan veri yapılarıyla etkileşime girme kapasitesi, karmaşık astrofiziksel süreçlerin modellenmesinde önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Ardından, SVR modeli için farklı kernel fonksiyonları test edilmiştir. Kernel fonksiyonunun doğru seçimi, modelin doğruluğunu ve performansını doğrudan etkilemesi nedeniyle büyük bir dikkatle yapılmıştır. Bu çalışmada, doğrusal olmayan ilişkilerin daha etkili bir şekilde modellenmesi amacıyla "Radial Basis Function" (RBF) kernel (Gaussian kernel) tercih edilmiştir.



Şekil 3. B200(0112p3208) ve B194(0112p2244) adlı blazarların SVR ile oluşturulmuş RBF modeli. Yeşil çizgi SVR ile oluşturulan RBF modeli göstermektedir. Gri noktalar verileri gösterirken kırmızı yıldız RBF sonucunda bulunan sinkrotron pik değerini göstermektedir.

Model eğitimi sürecinde, SVR algoritması destek vektörleri ve seçilen kernel fonksiyonu aracılığıyla veri kümesindeki ilişkileri öğrenmiştir. Model parametreleri, eğitim süresi boyunca optimize edilerek en yüksek tahmin doğruluğu elde edilmiştir. Eğitim tamamlandıktan sonra, model yeni verilere uygulanmış ve bağımlı değişkenin tahmin edilen değerleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, SVR yöntemiyle elde edilen tahminler, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve modelin doğruluğu test edilmiştir. SVR yönteminin, blazarların düşük ve yüksek enerjili bileşenlerinin modellenmesinde oldukça etkili bir araç olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, SVR'nin blazarların enerji dağılımlarındaki karmaşık yapıları anlamaya yönelik önemli katkılar sunduğunu ortaya koymuştur. Şekil 3'de örnek iki blazar için oluşturulan TED yapılarının SVR yöntemi ile modellenmesinin sonuçları sunulmuştur.

3.3 BLAST ile Modelleme

Literatürdeki benzer çalışmalarla elde edilen $\nu_{\rm pik}$ sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla, daha önce gerçekleştirilen BLAST makine öğrenmesi çalışması referans olarak ele alınmıştır. Bu bağlamda, BLAST yöntemi tarafından tahmin edilen değerler ile çalışmamızda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. BLAST, blazarların spektral enerji dağılımlarından sinkrotron tepe noktasını tahmin etmek için geliştirilmiş bir araçtır



Şekil 4. SVR $\nu_{\rm pik}$ değerlerine karşılık BLAST $\nu_{\rm pik}$ değerleri grafiği verilmiştir. Noktalı kırmızı çizgi bire bir doğrusu çizgisidir. Renk barı, z değerlerinin bir göstergesidir.

ve doğruluğunu artırmak adına çeşitli makine öğrenmesi yaklaşımlarını bir araya getirmektedir.

BLAST sistemi, tahminlerin güvenilirliğini değerlendirmek için bir tahmin aralığı hesaplamaktadır. Sistem, farklı sinir ağı modellerinin eğitimi için "bagging" (ing. bootstrap aggregating) adı verilen bir teknik kullanmaktadır. Bu yöntem, eğitim veri kümesini farklı alt gruplara bölmekte ve her alt grup için bağımsız tahmin modelleri oluşturarak birleştirilmiş bir genel model elde etmektedir. Böylece model, yüksek güvenilirlik ve genelleştirme yeteneği sergilemektedir.

Bu çalışmada seçilen 31 blazar için hazırlanan TED grafikleri BLAST ile modellenmiştir. BLAST, model çıktısı olarak $\nu_{\rm pik}$ parametresini vermektedir ancak pik akı değerini hesaplamamaktadır.

4 Parametrelerin Analizi ve SED Modellerinin Kıyaslanması

Tek bir blazarın TED yapısının ayrıntılı incelenmesi ve modellenmesi yerine çok sayıda blazarın TED yapılarının hızlı yaklaşımlarla ve sadeleştirilmiş parametrelerle tanımlanması, literatürde az sayıda çalışmada amaçlanmıştır. Bu çalışmada üc farklı yaklasım kullanılarak toplamda 71 blazar icin sinkrotron ışınımın temel parametreleri elde edilmiştir. Bu parametreler, sinkrotron pik frekansı olarak tanımlanan $\nu_{\rm pik}$ ve akı yoğunluğunun maksimum değerini ifade eden F_{pik} olarak verilmiştir. Bunlara ek olarak, eğer literatürden biliniyorsa, kaynakların kırmızıya kayma (z) değeri de verilmiştir. lmfit, SVR ve BLAST yaklaşımları ile elde edilen parametreler Çizelge 1 ve 2'de sunulmuştur. Bu parametreler kullanılarak farklı modellerden elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde karşılaştırılmış ve modellerin performanslarını değerlendirmek amacıyla yeni türetilmiş parametreler tanımlanmıştır. Örneğin, SVR yöntemiyle hesaplanan sinkrotron pik frekansı, "SVR $\nu_{\rm pik}$ " olarak adlandırılmıştır. Bu parametreler, her bir modelin spektral enerji dağılımlarını tahmin etme kapasitesini daha derinlemesine değerlendirme imkanı sunmuştur.

Şekil 4'de SVR $\nu_{\rm pik}$ değerlerine karşılık BLAST $\nu_{\rm pik}$ değerleri grafiği verilmiştir. Bu iki yöntemin sonuçları arasında genel bir uyum olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 5'de SVR $\nu_{\rm pik}$ değerleri ile Meyer ve diğ. (2011) çalışmasından alınan $\nu_{\rm pik}$ değerleri kıyaslanmıştır.

Yapılan analizlerin temel amacı, literatürle uyumlu sonuçlar elde etmenin yanı sıra, kullanılan yöntemlerin blazarların düşük ve yüksek enerjili bileşenlerini daha basit **Çizelge 1.** Roma-BZCAT'den seçilen blazarlar için lmfit, SVR ve BLAST yaklaşımları ile elde edilen ($\nu_{\rm pik}$) ve tepe akısı ($F_{\rm pik}$) sonuçları listelenmiştir. BLAST, yalnızca $\nu_{\rm pik}$ hesabı yapmaktadır. Blazarların z değerleri Roma-BZCAT'den alınmıştır. $\nu_{\rm pik}$ (log Hz), $F_{\rm pik}$ (log erg cm⁻² s⁻¹) birimlerindedir.

		lmfit		SVR		BLAST
Kaynak	z	$\nu_{\rm pik}$	F_{pik}	$\nu_{\rm pik}$	F_{pik}	$\nu_{\rm pik}$
B194(0112p2244)	0.265	14.14	-10.75	14.12	-10.80	14.41
B219(0120m2701)	-	14.11	-11.01	14.15	-11.01	14.23
B228(0123p3420)	0.272	16.00	-11.38	17.50	-11.02	17.73
B210(0115p2519)	-	15.61	-11.58	15.29	-11.65	16.14
B202(0113p4948)	0.389	12.73	-11.39	13.13	-11.50	12.78
B200(0112p3208)	0.603	13.08	-11.25	13.13	-11.23	12.81
B196(0112p3522)	0.45	12.94	-11.89	13.13	-11.84	13.10
B195(0112p2020)	0.746	13.59	-11.87	15.29	-11.39	13.49
B186(0110p6805)	-	13.35	-11.01	13.81	-10.99	13.7
B183(0109p6133)	0.783	12.41	-10.20	12.48	-10.98	12.84
B182(0109p1816)	-	14.48	-11.46	14.52	-11.42	14.79
B181(0108p0135)	2.099	12.42	-11.04	11.74	-11.42	12.75
B171(0104m2416)	1.747	12.33	-11.65	11.55	-11.91	12.71
B170(0103m6439)	0.163	13.34	-11.59	13.13	-11.48	12.8
B166(0102p5824)	0.644	12.55	-10.75	12.48	-11.15	12.82
B165(0102p4214)	0.874	13.66	-11.93	13.41	-11.98	13.95
B160(0100p0745)	-	13.55	-12.23	13.13	-12.31	15.02
B155(0058m5659)	-	12.96	-11.60	14.93	-11.70	12.78
B153(0058p3311)	1.369	12.85	-12.30	13.13	-12.36	12.59
B150(0058m3234)	-	13.59	-11.67	13.81	-12.36	12.96
B139(0051m0650)	1.975	12.29	-11.52	11.55	-11.83	12.75
B138(0050m0929)	-	14.20	-11.15	14.87	-11.18	14.26
B137(0050m0452)	0.922	13.73	-12.19	14.58	-12.21	13.7
B136(0049m5738)	1.797	12.50	-11.71	14.39	-11.89	12.77
B135(0049p0237)	-	12.77	-11.58	13.13	-11.74	12.9
B129(0048p2235)	1.161	14.01	-12.33	14.64	-12.27	15.34
B122(0045p1217)	-	14.80	-11.68	14.14	-11.70	14.98
B120(0045p2127)	-	15.54	-11.34	15.29	-11.41	15.89
B105(0040p4050)	-	15.94	-11.62	14.87	-11.50	17.57
B100(0038p4137)	1.353	12.07	-12.00	13.13	-12.38	12.59
B99(0038m0329)	1.858	13.41	-11.87	15.29	-11.77	13.32

yaklaşımlarla modelleyebilme potansiyelini ortaya koymaktır. Bu bağlamda, hem kullanılan yöntemlerin performansı hem de elde edilen bulguların doğruluğu titizlikle test edilmiştir. Karşılaştırmalar, kullanılan modelleme yöntemlerinin geçerliliğini ve sonuçların literatürdeki uyumunu değerlendirme açısından önemli bir katkı sağlamıştır. Bu süreç, çalışmamızın hem seçilen yöntemlerin etkinliğini hem de blazarların TED yapılarına dair literatüre sunduğu katkıları net bir şekilde ortaya koymuştur.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, seçilen blazarların tayfsal enerji dağılımlarını en az parametre ile ifade edebilmek için hızlı ve pratik yöntemler kullanılmıştır. Blazar TED'lerinde tipik olarak gözlenen iki tepeli yapı, düşük enerji bölgesindeki sinkrotron tepesi ve yüksek enerji bölgesindeki Compton saçılması tepesinin bir sonucudur. TED'lerin ayrıntılı modelleri yerine basit ve hızlı yaklaşımlarla sinkritron pik frekansı ve pik akısı değerlerinin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Bilinen ve aday blazarların listelendiği BZCAT kataloğundan rastgele seçilen 31 blazar ve Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında yer alan 40 blazar ana örneklem olarak ele alınmıştır. Blazarların tayfsal enerji dağılımlarını oluşturmak



Şekil 5. SVR $\nu_{\rm pik}$ değerlerine karşılık Meyer ve diğ. (2011, M11) çalışmasında elde edilen $\nu_{\rm pik}$ değerleri grafiği verilmiştir. Renk barı z değerlerine göre elde edilmiştir.

için literatürde yer alan farklı dalgaboylarındaki akı ölçümleri elde edilmiş ve gerekli birim dönüşümleri yapılmıştır. Genel dağılıma aykırı olan veri noktaları veri setinin dışında tutulacak şekilde veri ayıklama işlemi yapılmıştır.

Ana örneklem içinde yer alan her bir blazar için 1mfit kullanılarak çift-Gauss modeli fit edilmiştir. Bu yaklaşımla f_{ν} ve $\nu_{\rm pik}$ parametreleri hesaplanmıştır. Benzer şekilde SVR yaklaşımı kullanılarak TED modellemesi yapılmış ve $f_{
u}$ ve $u_{\rm pik}$ parametreleri elde edilmiştir. Bunlara ek olarak BLAST çalışmasında ortaya koyulan yaklaşımla rastgele seçilen 31 blazar için TED grafiklerinin $\nu_{\rm pik}$ parametreleri elde edilmiştir. Çalışmamızda, seçilen blazarlar ile literatürdeki kaynakların pikfrekans dağılımlarını daha iyi anlayabilmek amacıyla kullanılan her bir metodolojiye ait karşılaştırma grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan grafikler, farklı metodolojiler arasındaki uyumu değerlendirmek ve hangi metodların birbirleriyle daha uyumlu bir dağılım sergilediğini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu karşılaştırmalar, elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmak ve metodolojik tercihlerimizin analiz üzerindeki etkilerini gözlemlemek için önemli bir araç olmuştur.

Çalışmamızın sonunda elde edilen bulgular şu şekildedir:

- SVR ile yapılan modeller, diğer metodlara göre daha kompleks bir işlem sonucunda elde edilmiş ve daha yüksek doğruluk oranına sahip sonuçlar vermiştir. Bu, SVR'nin SED modellemesi için etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir.
- SED verilerinin miktarı, elde edilen sonuçları etkileyen önemli bir faktördür. Daha fazla veri içeren SED'ler üzerinde yapılan modellemeler, daha güvenilir ve tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, gelecekteki benzer çalışmalarda daha geniş ve kapsamlı veri setlerinin kullanılmasının önemini vurgulamaktadır.
- Literatüre ait SED'lerin bazılarında, $F_{\rm pik}$ değerlerinin beklenenden daha düşük sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, literatüre ait SED'ler için $F_{\rm pik}$ değerlerinin tekrar belirlenmesi ve buna uygun bir model uyarlanması gerekmektedir.
- Yöntemsel farklılıkların çıkan sonuçlar ile güçlü bir bağlantısı olduğu görülmüş, her metod için farklı bir yaklaşımın uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Blazarların az bir kısmında tayfsal salma çizgileri gözlenebilmiş ve böylece z değerleri hesaplanabilmiştir. Bu kaynakların analizleri sonucunda pik frekans ($\nu_{\rm pik}$) ve pik luminosite ($L_{\rm pik}$) arasında bir ilişki olduğunun görülmesi, pik

Çizelge 2. Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında ele alınan 40 blazar için lmfit ve SVR ve BLAST yaklaşımları ile elde edilen ($\nu_{\rm pik}$) ve tepe akısı ($F_{\rm pik}$) sonuçları listelenmiştir. Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında bulunan $\nu_{\rm pik}$ değerleri kıyaslama için son kolonda sunulmuştur. $\nu_{\rm pik}$ (log Hz), $F_{\rm pik}$ (log erg cm⁻² s⁻¹) birimlerindedir.

		lı	lmfit		SVR	
Kaynak	z	$\nu_{\rm pik}$	F_{pik}	$\nu_{\rm pik}$	F_{pik}	$\nu_{\rm pik}$
3C 380	0.69	13.23	-11.49	15.17	-11.27	12.95
3C 84	0.02	13.86	-10.24	17.38	-9.73	13.46
Cen A	-	14.30	-9.40	14.37	-9.20	12.72
NGC 6251	0.02	14.14	-10.65	14.65	-10.25	12.79
3C 17	0.22	12.66	-11.56	13.81	-11.79	13.05
3C 18	0.188	7.87	-13.19	13.41	-11.54	12.83
3C 29	0.045	15.19	-10.80	16.22	-9.07	12.94
NGC 315	0.016	9.04	-11.11	14.26	-10.13	13.96
3C 31	0.017	14.14	-10.07	14.14	-10.22	13.09
3C 33.1	0.181	8.18	-12.85	14.83	-12.61	12.99
3C 66B	0.02	14.12	-10.73	14.14	-10.85	13.36
3C 78	0.03	15.29	-11.57	14.26	-10.55	12.99
3C 83.1B	0.025	15.29	-10.69	14.58	-9.96	13.09
3C 111	0.05	12.84	-10.32	13.58	-10.51	13.28
3C 133	0.278	14.93	-13.13	13.41	-11.78	13.04
3C 135	0.127	7.87	-11.70	13.81	-12.19	13.05
3C 165	0.296	14.80	-13.19	14.80	-13.14	13.04
3C 171	0.238	14.83	-12.22	13.95	-12.15	13.04
3C 264	0.022	15.29	-11.16	14.38	-10.34	12.6
3C 270	0.007	14.27	-9.57	14.46	-9.68	13.16
NGC 4278	0.002	7.87	-10.84	14.49	-9.56	12.96
M 84	-	15.29	-10.57	14.26	-9.77	12.98
M 87	-	7.90	-10.94	16.22	-8.54	13.01
3C 287.1	0.216	7.90	-12.20	13.81	-11.68	13.05
3C 296	0.02	15.29	-11.26	14.46	-10.20	12.99
3C 300	0.272	15.01	-12.77	13.95	-12.46	12.73
3C 317	0.03	15.29	-12.42	14.38	-11.11	12.83
3C 321	0.096	7.90	-11.64	12.63	-10.46	13.27
B2 1553+24	0.043	14.35	-10.69	14.49	-10.77	13.11
3C 338	0.03	15.29	-11.58	14.38	-10.60	13.12
3C 346	0.16	12.88	-11.42	14.14	-11.71	13.46
Her A	0.155	14.94	-12.21	14.14	-11.97	13.04
3C 349	0.205	13.79	-12.01	13.95	-12.05	12.94
3C 388	0.091	15.29	-11.58	14.38	-10.60	13.03
3C 442A	0.026	15.29	-10.25	14.54	-10.39	12.98
3C 449	0.017	15.01	-11.43	14.14	-10.48	13.18
B2 2236+35	0.027	14.40	-10.50	14.26	-10.67	13.04
3C 452	0.081	13.74	-11.12	13.52	-11.15	13.02
3C 460	0.268	13.06	-12.24	14.26	-12.21	13.04
3C 465	0.031	15.29	-11.55	14.38	-10.46	13.07

frekans ölçümlerinin blazarın sinkrotron ışınım süreçlerinin yanı sıra uzaklığı hakkında da bilgi verebileceği sonucunu ortaya koymuştur (Kharb ve diğ. 2010).

Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında blazarların $\nu_{\rm pik}$ değerleri ile z değerleri arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Benzer olarak, bu çalışmada elde edilen parametrelerle aynı ilişkinin varlığı aranmıştır. Şekil 6'da z değerlerine karşılık SVR $\nu_{\rm pik}$ değerlerinin dağılımı verilmiştir. Bu çalışmada, Meyer ve diğ. (2011) çalışmasında elde edilen belirgin ilişki görülememiştir. Ancak, bunun en temel sebepleri arasında veri sayılarının azlığı ve z değerlerinin belirsizliğinin yer aldığı düşünülmektedir.

Çalışmamızın odak noktası, blazarların en önemli bilgi kaynağı olan tayfsal enerji dağılımlarındaki önemli parametrelerin, ayrıntılı ve uzun zaman alan analizlere gerek kalmadan basit yaklaşımlarla belirlenebileceğini ortaya



Şekil 6. SVR $\nu_{\rm pik}$ değerlerine karşılık z değerleri grafiği. Renk barı ile ifade edilen değerler SVR $F_{\rm pik}$ değerlerine aittir.

koymaktır. Elde edilen sonuçlar, çok sayıda kaynağın ele alınabileceği pratik yaklaşımların tutarlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Çalışma, blazarların sinkrotron pik değerleri ile bir sınıflama yapılabileceği ve blazarlardaki kırmızıya kayma değerlerinin sinkrotron ışınımı ile bağlantılı olabileceği konusunda önemli bir bilgi sağlamıştır. Bu bulgular, gelecek çalışmalara rehberlik edebilecek önemli bir bilgi havuzu oluşturmuştur.

İlerleyen çalışmalarda pik frekans ve pik luminosite arasındaki ilişkinin ayrıntılı incelenmesi planlanmaktadır. Bu analiz, sinkrotron ışınımı ile kırmızıya kayma arasındaki ilişkiyi daha iyi anlamamıza ve çeşitli metodolojilerin belirlenmesinde önemli bir katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Blazarların TED yapılarının anlaşılması ve parametreler arasındaki olası ilişkilerin belirlenebilmesi için daha çok sayıda kaynak için analizlerin elde edilmesi gerektiği görülmüştür.

Teşekkür

Çalışmaya verdikleri değerli katkılar için hakemlere teşekkür ederiz. Bu çalışma, 1919B012210020 başvuru numaralı TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu desteği sağlayarak araştırmamızın hayata geçirilmesine ve bilimsel gelişime katkıda bulunan TÜBİTAK'a en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- Boquien M., Burgarella D., Roehlly Y., Buat V., Ciesla L., Corre D., Inoue A. K., Salas H., 2019, A&A, 622, 33
- Glauch T., Kerscher T., Giommi P., 2022, BlaST A Machine-Learning Estimator for the Synchrotron Peak of Blazars (arXiv:2207.03813)
- Kharb P., Lister M. L., Cooper N. J., 2010, The Astrophysical Journal, 710, 764
- Meyer E. T., Fossati G., Georganopoulos M., Lister M. L., 2011, ApJ, 740, 98
- Newville M., Stensitzki T., Allen D. B., Ingargiola A., 2014, LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python (0.8.0), doi:10.5281/zenodo.11813, https://doi.org/ 10.5281/zenodo.11813
- Prandini E., Ghisellini G., 2022, Galaxies, 10, 35

Access

M25-0326: Turkish J.A&A — Vol.6, Issue 3.