ULX Sınıflandırmasında Temel Karadelik Bağıntısının Kullanılabilirliği

Ege Tunç¹ • \star , Sinan Kaan Yerli¹ , Tenay Saguner Rambaldi¹ ¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, Astronomi Optiği Laboratuvarı (AOL), 06800 Ankara, Türkiye

Accepted: March 14, 2025. Revised: March 14, 2025. Received: December 8, 2024.

Özet

Son 20 yılda ULX'ler (Aşırı-Parlak X-ışın kaynakları) üzerindeki çalışmalar hızlanmış ve önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak, hâlâ açıklığa kavuşmamış birçok tuhaf özellik bulunmaktadır. Bu çalışmada, ULX adaylarının detaylı bir incelemesi yapılmış ve hem X-ışını hem de Radyo dalgaboylarında çoklu dalgaboyu verileri kullanılmıştır. ULX adaylarının verileri Karadeliklerin Temel Bağıntısına (FPBH) uyarlanarak kütle tahminleri yapılmış ve bu tahminler literatürdeki başka diğer ULX'ler ve onlar için kullanılan kütle hesabı yöntemleriyle karşılaştırılarak FPBH, ULX'ler için tutarlı olacak sekilde modifiye edilmiştir. Hesaplanan kütleler sertlik oranları, radyo parlaklığının X-ışın parlaklığına oranı ve X-ışın bandındaki rejimlerle eşleştirilerek belirli eğilimlerin varlığı araştırılmıştır. Bu veriler, literatürdeki diğer bazı çalışmalarla karşılaştırılmış ve kullanılan yöntemlerin doğrulaması için literatür çalışmaları referans alınmıştır. Bu gruplandırma, farklı türdeki ULX'leri daha iyi ayırt etmeye olanak sağlayabilir. Ayrıca ULX'lerin FPBH'ye nasıl dahil edilebileceği gösterilmiş ve tartışılmıştır.

Abstract

Over the past 20 years, studies on ULXs (Ultraluminous X-ray Sources) have accelerated, leading to significant progress. However, there are still many bizarre features that are not clear. In this work, a detailed examination of ULX candidates has been conducted, utilizing multiwavelength data in both X-ray and radio bands. The data of ULX candidates were adapted to the FPBH (Fundamental Plane of Black Holes) to estimate their masses. These estimates were compared with other ULXs in the literature and the mass estimation methods used for them, leading to a modification of the FPBH to ensure its consistency for ULXs. The calculated masses were correlated with hardness ratios, the ratio of radio luminosity to X-ray luminosity, and regimes in the X-ray band to investigate the presence of specific trends. This data was compared with several other studies in the literature, using these studies as references to validate the methods employed. This classification could enable better differentiation between various types of ULXs. Furthermore, how ULXs can be incorporated into the FPBH has been demonstrated and discussed.

Anahtar Kelimeler: ULX – Black Hole – Fundamental Plane – Catalog – Crossmatching

1 Giris

ULX'ler (Aşırı-Parlak X-ışın kaynakları), herhangi bir yıldızsal süreçten daha fazla radyasyon yayan ancak çekirdek dışı (galaktik merkez dışı) olan astronomik nesnelere verilen isimdir. Eddington limiti, bir yıldızsal sürecin ulaşabileceği kritik değer olarak şu şekilde tanımlanır:

$$L_{\rm Edd} = 1.3 \times 10^{38} \, \rm erg \, \rm s^{-1} \tag{1}$$

Kütlesi 10 M_{\odot} 'ten büyük bir karadelik (veya herhangi bir yığılmacı) için, 10^{39} erg s⁻¹ değerini aşan radyasyon Ultraluminous (aşırı parlak) olarak adlandırılır:

$$L_{\rm X} > 10^{39} {\rm ~erg~s^{-1}}$$
 (2)

Bu nesnelerin son derece parlak türleri de bulunmaktadır ve $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ değerini aşanlar Hyperluminous (çok aşırı parlak) X-ışını Kaynakları (HLX) olarak adlandırılır.

ULX'ler ile ilgili ilk bulgular Fabbiano (1989) ile ortaya çıkmış olsa da son 30 yılda birçok yeni ULX ve ULX adayı tanımlanmıştır. 1980'lerin sonlarında Einstein gözlemevinin gözlemleriyle ortaya çıkan bu nesnelerin, 1999'da kullanılmaya

baslanan Chandra ve XMM-Newton teleskopları savesinde evrende düşünüldüğü kadar nadir olmadıkları anlaşılmıştır.

İlk ULX modelleri, yıldız kütleli karadelikler ya da Galaktik karadelikler (GBH'ler) ile süper kütleli karadelikler (SMBH'ler) arasındaki eksik bağlantı olan orta kütleli karadelikleri (IMBH'ler) öngörüyordu. Bu, hem yüksek kütleleri ($>100 M_{\odot}$) nedeniyle Eddington limitini asmalarını acıklanabilir kılıyor hem de GBH'ler ile SMBH'ler arasındaki eksik bağlantıyı kapatmak için iyi bir aday oluşturuyordu. Bu nedenle, süper-kritik ya da kritik mod yerine sub-kritik modda bir yığılmanın bu radyasyonu açıklayacağı fikri ön plandaydı. İlerleyen süreçlerde, şu anda baskın olan fikir öne çıkmıştır: bir çift sistemdeki yıldız kütleli bir karadelik veya bir nötron yıldızı, dolmuş Roche şişimindeki yoldaştan gelen madde akışı ile Eddington sonrası (süper-kritik) kipte radyasyon yaymaktadır (King ve diğ. 2001; Fabrika & Mescheryakov 2001; Lipunova 1999; Poutanen ve dig. 2007; Shakura & Sunyaev 1973).

ULX'ler için IMBH fikrinin ve süper-kritik kipte çalışan GBH açıklamasının ardından, X-ışını pulsasyonlarına sahip bir ULX'in tespitiyle nötron yıldızı ULX'leri (NSULX) fikri ortaya çıkmış ve darbeler sayesinde pulsar ULX'ler de doğrulanmıştır (Bachetti ve diğ. 2014). Pulsar olmayan ancak nötron yıldızı olan birçok ULX de sonraki yıllarda gözlemlenmiştir (Brightman ve diğ. 2016; İsrael 2017; İsrael ve diğ. 2017; Tsygankov

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

^{*} tunc.ege@metu.edu.tr

ve diğ. 2017; Carpano ve diğ. 2018; Doroshenko ve diğ. 2018; Rodríguez Castillo ve diğ. 2020). Bunlar arasında güçlü manyetik alana sahip bir tanesi bulunarak bu türün en önemli göstergelerinden biri olmuştur (Brightman ve diğ. 2018).

Nötron yıldızı ULX'lerinin (NSULX) ve pulsar ULX'lerinin (PULX) varlığı birçok yönden doğrulanmış olsa da hem X-ışını radyasyon mekanizmaları ve manyetik alanlarının yoğunluğu hem de Karadelik ULX'lerle (BHULX) olan benzerlikleri ve farklılıkları henüz tam olarak anlaşılamamıştır.

1.1 Motivasyon ve Problem Tanımı

İlk ULX izleri 1989'da bulunmuş olsa da çalışmalar 2000'lerden sonra hız kazanmıştır (Fabbiano 1989). ULX'lerin dinamik doğası, IMBH, BHULX ve NSULX'lerin keşfiyle ortaya konmuş ancak bu nesnelerin karmaşık fiziği tam olarak çözülememiştir. XRB, AGN, LINER ve Seyfert türü kuzenleriyle karşılaştırmalı analizler, bu nesnelerin doğasının aydınlatılması için kritik önemdedir. Bu çalışmanın amacı, ULX'leri sınıflandıracak yöntemleri geliştirmek için "Temel Karadelik Bağıntısının" (Fundamental Plane of Black Holes - FPBH) kullanılabilirliğini araştırmak ve Radyo/X-ışını parlaklığı üzerinden kurulacak bağlantılar ile yapılan kütle tahminleri ile ULX'lerin diğer parametreleri arasındaki (varsa) ilişkileri aramaktır (Tunç 2024).

1.2 Önerilen Yöntemler ve Modeller

Bernadich ve diğ. (2022)'nin "An expanded ultraluminous X-ray source catalogue" ve Condon ve diğ. (2002)'nin "NRAO VLA Sky Survey" kataloglarını çapraz eşleştirerek çoklu dalgaboyu ULX kataloğu oluşturulmuştur. Görsel doğrulama Aladin Sky Atlas (Centre de Données Astronomiques de Strasbourg (CDS) 2011) kullanılarak yapılmıştır. Bu katalog, FPBH'ye uyarlanmış ve kütle tahminleri ile gruplandırma için kullanılmıştır. 5 GHz hesaplamaları, 1.4 GHz verisinden, güç yasası ve spektral indeks kullanarak yapılmıştır (Gültekin ve diğ. 2019). Spektral indeks hesaplaması için NRAO'nun 3 GHz kataloğu verilerinden de faydalanılmıştır (Gordon ve diğ. 2021). ULX'ler için kullanılan başka kütle hesaplarıyla tutarlı hale gelecek şekilde FPBH modifiye edilerek uygulanabilirliği test edilmiştir. Elde edilen L_R/L_X ilişkisi ve FPBH'den uyarlanan yöntemler, ULX'lerin kütleye göre gruplandırılmasını sağlamıştır (Tunç 2024). Modifiye edilen FPBH ile yapılan kütle hesaplamaları ile ULX'lerin bazı diğer parametreleri arasında korelasyonlar aranmıştır.

2 Veri Analizi

ULX'lerin farklı X-ışını bantlarındaki gözlemleri ve radyo parlaklığı gibi fiziksel parametreleri kullanılarak kütle ve diğer ilişkili parametreler hakkında tahminler yapılabilir. Parlaklık oranları ve sertlik değerlerinin karakterizasyonu ile ULX'lerin alt gruplara ayrılması sağlanabilir. Dolayısıyla, detaylı X-ışını ve radyo kataloglarının kullanılması gerekir (Tunç 2024).

2.1 Kullanılan Kataloglar

ULX için temel alınan Bernadich ve diğ. (2022) kataloğu, 4XMM-DR9 verilerinden türetilmiş ve 50 bin kaynak arasından 1400 aday içermektedir. Farklı dalgaboylarını kapsayan tek bir ULX kataloğu bulunmadığından, bu çalışmada radyo kataloglarıyla eşleştirme yapılmıştır (Tunç 2024). Ayrıca 1.4 GHz VLASS ve 3 GHz VLASS/NRAO radyo katalogları birleştirilerek (Tunç 2024) 5 GHz verisinin hesaplanması için kullanılmıştır (Gordon ve diğ. 2021; Merloni ve diğ. 2003). Veri seti, -40° altındaki bölgeleri kapsamadığından, homojenlik adına bu bölgeler dışlanmış ve gökyüzünün %78'i kullanılmıştır (Condon ve diğ. 2002). NRAO taraması homojen olmayıp düşük hassasiyeti nedeniyle eşleştirme sonrası görsel doğrulama gerektirmiştir (Tunç 2024).

Sonuç olarak, bu çalışma, X-ışını gözlemlerini kapsayan ULX aday kataloğuna dayanmaktadır. Ayrıca katalogdaki gök cisimlerine ait radyo gözlemlerinin eklenmesi veri setinin elektromanyetik spektrumun daha geniş bir kısmını kapsamasını sağlamıştır.

2.2 Arşiv Veri Erişimi

50 bin kaynak arasından ULX adayları Bernadich ve diğ. (2022)'nin seçim kriterleri uygulanarak belirlenerek bu çalışmaya dahil edilmiştir.

Seçilen ULX adayları için kullanılacak parametreler: koordinat bilgileri (sağ açıklık ve dik açıklık), uzaklık, 0.2-12 keV X-ışını akısı ve beş alt banttaki X-ışını akıları, kaynak isimleri, kaynak ID'leri, ULX adaylarının ait oldukları galaksilerin isimleri ve bu parametrelerin hata değerleri olarak belirlenmiştir. Verilerin doğruluğunu ve kullanılan yöntemin uygunluğunu sağlamak için hata değerleri ve parlaklık değerleri veri seti kullanılarak yeniden hesaplanmıştır (Tunç 2024). Parlaklık ve hata hesaplamaları katalog değerleriyle birebir örtüşmüştür. Böylece çift kontrol sağlanmıştır.

FPBH için 2-10 keV gözlemleri kullanılmaktadır (Merloni ve diğ. 2003). Mevcut katalog 0.2-12 keV arası veriler içermektedir ve FPBH için 2-12 keV arasındaki dört alt bandın verileri kullanılmıştır. Mesafe verisiyle yeniden hesaplanan parlaklık ve hata hesaplamalarının katalog yöntemiyle ve katalog değerleriyle birebir örtüştüğü görülmüştür.

2.3 Kaynak Seçimi

Seçilen yaklaşık 400 kaynağın birçok gözlemi içermesi nedeniyle farklı tespit kimliklerine (detection ID) sahip olmayan ancak aynı kaynak kimliğine (source ID) sahip olan kaynakların özgün olduğu çıkarımıyla kaynak elemesi yapılmıştır. Bu yinelenen kaynakların temizlenmesi parametreler arası ilişkilerin aranması nedeniyle önceliklik bir adım olup bu nesnelere ait tüm gözlemsel parametrelerin ortalamaları alınarak tek değere indirgenmiştir. Yinelenen gözlemlere sahip kaynakların her biri için gözlem değerlerinin ortalamaları alınarak tek bir değer elde edilmiştir (Bernadich ve diğ. 2022; Tunç 2024).

Bu çalışmada kullanılan katalog, Bernadich ve diğ. (2022) tarafından XMM-DR9 kataloğundaki 50 bin kaynaktan belirli parametreler kullanılarak seçilen ve 1466 ULX içeren alt kümedir. Bu kaynakların gözlem değerlerinin ortalamaları alınarak kaynak sayısı 779'a indirgenmiş ve bu adayların radyo gözlemleriyle konuma göre eşlenebilenler kullanılmıştır. Seçim kriteri olarak VLASS gözlemlerinin 45" açısal çözünürlüğe sahip olması seçilmiştir. VLASS -40° dikaçıklığına kadar gözlem yapabilmesi nedeniyle aday katalogdaki bazı nesneler bu noktada elenmiştir ve sonuçta eşleşen 101 aday tespit edilmiştir. Yeterli sayıda örneğin hâlâ mevcut olması nedeniyle olası bir korelasyonu görmek ve ULX'lerin fiziksel özelliklerini bu özelliklere göre yorumlayarak gruplandırmak mümkün olacaktır.

Bu noktada, dikkat çeken bir diğer sorun, X-ışını ve radyo gözlemleri açısal çözünürlük içinde olsa bile ULX'ler bir galaksi içinde bulunduğundan, radyo gözlemlerinin

228 Tunç, E. ve diğ.

Çizelge 1. Seçim Kriteri.

Kriter	Kaynak# Kaynak#	
i criteri	(Once)	(Sonra)
ULX Candidate Catalog	50000	1466
Yinelenen Kaynakların Eliminasyonu	1466	779
Çapraz Eşleştirme 45"	779	348
Çapraz Eşleştirme 23"	348	101
Görsel Filtreleme	101	19
Örnek ULX'lerin Eklenmesi	19	23

galaksinin gözlemleriyle kısmen veya tamamen karışabileceğidir. Aladin üzerindeki görsel incelemeler sırasında bu durum gözlemlendiğinden, seçim kriterlerini daraltmak ve görsel seçim yapmadan bu soruna bazı çözümler bulmak gerekmiştir. İlk olarak, eşleştirme yarıçapı 45" den 22".5'e düşürülmüştür. Bunun nedeni, bu 101 nesnenin Gordon ve diğ. (2021)'den alınan 3 GHz bandındaki gözlem verilerini kataloğa eklemek ve bu bandın daha yüksek açısal çözünürlüğe sahip verilerinin X-ışını gözlemleriyle tutarlı olması durumunda bu verileri kullanmaktır. Bu bandın FWHM değeri 23" dir.

Tüm bu veri temizleme işlemlerine ek olarak görsel bir seçim yöntemi de kullanılmıştır. Bunun nedeni:

- Veri setindeki ULX'ler (ve ait oldukları galaksiler) 3 ila 130 Mpc uzaklıktadır.
- Galaksilerin açısal çözünürlükleri büyük farklılık göstermektedir.
- Galaksilerin şekilleri ve bize göre yönelimleri farklıdır.
- Galaksi içindeki ULX'lere yakın olan başka kaynaklar radyo verisini kirletebilir.

Bu nedenle, 22["].5'lik alan içine tüm galaksinin düştüğü veya radyo gözleminin orta noktasının galaksinin merkezi olduğu veriler kullanılmamıştır (Tunç 2024).

Tüm bu veri azaltma yöntemlerine göre, 101 kaynak işaretlenmiş ve 0, 1, 2, 3 değerleri atanmıştır. 0, verinin bulunmadığını; 1, yalnızca 1.4 GHz verisinin mevcut/kullanılabilir olduğunu; 2, yalnızca 3 GHz verisinin mevcut/kullanılabilir olduğunu; 3 ise hem 1.4 GHz hem de 3 GHz verilerinin mevcut/kullanılabilir olduğunu ifade etmektedir. Spektral indeks hesabı için hem 1.4 GHz hem de 3 GHz verileri gerekli olduğundan spektral indeks hesabında yalnızca 3 numaralı bayrağı bulunan nesneler kullanılmıştır. Gültekin ve diğ. (2019)'de belirtildiği gibi bu nesneler için -0.8 ile -1.3 aralığında değerlerin kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, Gültekin ve diğ. (2019)'de belirtildiği gibi ortalama bir değer kullanılması mümkündür. Bayrak 3 verilerinden elde edilen ortalama spektral indeks -1.05 olarak belirlenmiş ve tüm veri setinde bu değer kullanılmıstır. Tüm bu filtreleme yöntemlerinden sonra kullanılabilir nesne sayısı 19 olmuştur.

NRAO'nun düşük açısal çözünürlüğü, gökyüzünü homojen şekilde taramaması ve μ Jy aralığındaki duyarlılığı göz önüne alındığında, veri setindeki kaynak sayısı oldukça azalmıştır. Ayrıca, bu veri setinin radyo ve X-ışını verileri bilinen doğrulanmış ULX örnekleriyle karşılaştırılması gereklidir. Bu nedenle, dört adet örnek ULX ve farklı kütle hesaplaması yöntemleri Jang ve diğ. (2018); Chandrajit Singha & Senorita Devi (2019); Wolter ve diğ. (2015); Sutton ve diğ. (2012)'den seçilmiştir.

Sonuç olarak, gerekli filtreleme işlemleri sonrasında, radyo verisinin yeterli kalitede olmaması, düşük duyarlılık,

gökyüzünün homojen şekilde taranmaması ve ULX kavramının güncel olmadığı dönemlerde alınmış olması nedeniyle ~700 adaylık bir katalogdan geriye 19 örnek kalmıştır. Bu, bir set olarak incelenmesi için hâlâ yeterli bir örneklemdir.

Çizelge 1, seçim kriterlerinden önce ve sonra kalan kaynakların listesini göstermektedir.

2.4 ULX Aday Kataloğunun Analizi

Veri analizi için kullanılan veriler, 5 farklı X-ışını bandının sertlik değerleri, 2-12 keV X-ışını gözlemleri ve 1.4 ve/veya 3 GHz gözlemlerinden ölçeklenen 5 GHz verileri ile bunların oranlarıdır. Buna ek olarak, özellikle 5 GHz verilerinin kullanılmasının nedeni olan Temel Karadelik Bağıntısı (Merloni ve diğ. 2003) üzerinden bazı tahmini kütle hesaplamaları yapılmıştır.

2.4.1 Temel Karadelik Bağıntısı ve Alternatifleri

Temel Karadelik Bağıntısı (FPBH), hem yıldız kütleli LMXB/HMXB'ler hem de QSO/AGN Süper Kütleli Karadelikler için kullanılabilen bir bağıntı sunmaktadır. Bu nedenle, ULX'lerin (en azından BHULX'lerin) bir şekilde bu bağıntıya uyum sağlaması beklenir. FPBH bağıntısı hem yıldızsal hem de süper kütleli karadeliklerin gözlem verilerinin analizi sonucunda oluşturulmuştur ve karadelikler arasındaki ölçek farkı nedeniyle $\sim \pm 4.06$ gibi bir sapma ile doğrusal bir bağlantı sunmaktadır.

$$\log L_{\mathsf{R}} = 0.60^{+0.11}_{-0.11} \log L_{\mathsf{X}} + 0.78^{+0.11}_{-0.09} \log M + 7.33^{+4.05}_{-4.07}$$
(3)

 L_X X-ışını ışınımını, L_R radyo ışınımını, M ise Güneş kütlesi cinsinden kütleyi ifade etmektedir. Bu denklemi kütle hesaplaması için yeniden yazarsak:

$$\log M = \frac{\log L_{\rm R} - 0.60 \log L_{\rm X} - 7.33}{0.78} \tag{4}$$

Merloni ve diğ. (2003) tarafından da belirtildiği gibi, önemli saçılma değeri σ_R =0.88'dir. Bu denklem ULX örneklemi üzerinde uygulandığında, elde edilen kütle hesaplamaları yıldız kütleli karadelikler için oldukça çarpıcı ve beklenmedik sonuçlar göstermiştir. En küçük sonuç 677 M_☉ ve en büyük sonuç $1.2 \times 10^6 M_{\odot}$ olarak bulunmuştur. ULX'ler için başlangıçtaki IMBH fikrinin zamanla daha az olası olduğu düşünülse de bu kütle değerleri IMBH'ler için tutarlıdır.

Literatür araştırmalarında görüldüğü gibi önceki çalışmalarda da benzer bir sorunla karşılaşılmış ve bu hesaplanan kütleleri üst sınır olarak kabul ederek farklı yöntemlerle alt sınırları hesaplama hedeflenmiştir (Jang ve diğ. 2018; Chandrajit Singha & Senorita Devi 2019; Cseh ve diğ. 2012). Bu hesaplamalar, veri setimize eklenen dört doğrulanmış ULX'ten ikisi için zaten mevcuttur.

Veri seti FPBH grafiğine (Merloni ve diğ. 2003) yerleştirilip artık hesabı yapıldığında, denklemin eğimi ile veri setinin eğiminin oldukça benzer olduğu Denklem 4'ün en sağındaki doğrusal öteleme elemanı +7.33 teriminin (+4.07, -4.05) aralığına izin verdiği görülmüştür.

Veri setinin FPBH'ye nasıl daha uygun hale getirilebileceği bu doğrusal öteleme elemanı üzerinde yapılan değişikliklerle incelenmiş ve FPBH'nin ULX'ler üzerindeki kullanılabilirliği bu yolla incelenmiştir. Veri setindeki dört doğrulanmış ULX ve bunlardan ikisinin daha önce iki farklı yöntemle hesaplanmış kütle tahminleri iyi bir rehber olmuştur. Sonuç olarak, bu iki ULX için aynı değerleri elde ettiğimiz aralık 9.65 ve 7.33'tür. Bu, FPBH'nin y-ekseni boyunca doğrusal olarak yukarı kaydırılmasıdır ve Cseh ve diğ. (2012)'deki yeni ULX kütle

Çizelge 2. Ultraluminous Durumlar. UL: Ultraluminous, BD: Broadened Disk. (Tunç 2024)

UL Durumu	Baskınlık	Açıklama
Hard UL Soft UL	İç Katmanlar Dışarı akan iç fotosfer	1.5-3 keV Kara cisim 0.1-0.3 keV Kara cisim(ler)
Super Soft UL	Dış katman, fotosfer	Hyperluminousity düşük enerjilerden kaynaklanır
BD	Disk	Eddington sınırının hemen üstünde
Daha Parlak BD	Disk, huni (<i>funnel</i>)	Huni(<i>funnel</i>)'den gelen radyasyon diske düşer ve yansır

hesaplamalarının bu çalışmadakiyle tutarlı hale getirilmesini sağlar. Bu yöntemle, ULX aday veri seti için de aynı işlem kullanılabilir ve maksimum kütleler ${\sim}700$ ila $10^6\,M_{\odot}$ arasında değişirken bu aralık 3 ila $1300\,M_{\odot}$ 'e düşer.

Bu, FPBH'yi ULX'lere uygulamanın en mantıklı yoludur. FPBH normalde AGN'ler için $\log(L_R/L_X)$ =(-5.1, 0) ve XRB'ler için $\log(L_R/L_X)$ =(-7.75, -6.25) ilişkisini öngörse de, ULX'ler için durum farklıdır. Bu durumun izleri, §3.3'te açıklanacaktır.

2.5 Sertlik ve Parlaklık Oranları

Literatürdeki geleneksel yöntemler Earnshaw ve diğ. (2019) ile aynı şekilde sertlik analizi için kullanılmıştır. Ana yöntem, HR_i ile HR_{i+1} gibi karşılaştırmalar yaparak veri setinin genel olarak ne tür bir kümelenme ve eğilim gösterdiğini görmek ve bunu diğer bilinen X-ışını kaynaklarıyla karşılaştırmaktır. Kullanılan X-ışını bantları 0.2-0.5, 0.5-1, 1-2, 2-4.5 ve 4.5-12 keV'dir. Sertlik hesaplaması basitçe:

$$HR_{i} = \frac{F(i+1) - F(i)}{F(i+1) + F(i)}$$
(5)

Burada F(i+1) ve F(i), iki enerji bandı çiftinin akılarını temsil eder. F(i+1) ise daha yüksek enerji bandını ifade eder.

HR1 vs HR2, HR2 vs HR3 ve HR3 vs HR4 grafikleri veri seti için çizilmiştir. Bu grafiklerde gruplamalar, tahmin edilen yeni kütle hesaplamalarına göre yapılmış ve grupların dağılımları kontur çizgileriyle gösterilmiştir. Kütlelerin gruplaması şu şekilde yapılmıştır: (1) <3.3 M_{\odot}, (2) 3.3-100 M_{\odot}, (3) >100 M_{\odot}. Daha sonra elde edilen sonuçlar, önceki Earnshaw ve diğ. (2019) çalışması ile karşılaştırılmış ve ULX'lerin sertlik eğilimlerinin LMXB/HMXB, AGN/QSO gibi diğer X-ışını kaynaklarıyla benzerlikleri incelenmiştir.

2.6 X-ışın Bantları

ULX adaylarının davranışları 0.2-12 keV aralığındaki beş ayrı ve ardışık X-ışını bandındaki gözlemler ile incelenmiştir. Bu değerlerin durumlarına gri tonlamalı grafiklerle yapılan karşılaştırmalar üzerinden yorum yapılması hedeflenmiştir. Örnekler, toplam X-ışını parlaklıklarına göre sıralanmış ve Xışını bandında hangi bölgede ve ne kadar keskin bir tepe yaptıklarına göre gruplandırılmıştır. Ayrıca, literatürden alınan dört onaylı ULX de bu gruplamaya eklenmiştir (Jang ve diğ. 2018; Chandrajit Singha & Senorita Devi 2019; Cseh ve diğ. 2012).

Maksimum ve minimum değerler dahil edilerek yapılan kütle hesaplamaları da analiz edilmiştir. Böylece, kütle ile toplam X-ışını parlaklığı ve ULX durumları arasında bir

TJAA Vol. 6, Special Issue, p.226-235 (2025).

korelasyon olup olmadığı incelenmiştir. Amaç, $L_{\rm R}/L_{\rm X}$ oranı ve ardışık X-ışını bantlarına bakarak ULX'lerin diğer X-ışını kaynaklarıyla benzerliklerini incelemek ve altta yatan fiziği daha iyi anlamaktır. X-ışın bandındaki analiz sonucunda ULX'lerin sert durum, yumuşak durum, süper yumuşak durum ve genişlemiş disk durumu gibi adlandırılan durumlardan hangisinde yer aldığı ortaya çıkarılmıştır. Bu durumların farklı davranışları belirli enerjilerde modellenmiş ve King ve diğ. (2023)'de tanımlanmıştır. Tahmini kütle hesaplamasıyla korelasyonları incelenmiştir.

Aynı süreç literatürden alınan örnek ULX'ler için de uygulanmıştır. Böylece $L_{\rm R}/L_{\rm X}$ oranı ve X-ışını bantları arasındaki korelasyonlar incelenmiş ve literatürdeki benzerleriyle karşılaştırılarak tutarlılık analiz edilmiştir (Earnshaw ve diğ. 2019).

2.7 UL Durumları

Bahsedilen ULX durumları, yani sert durum, yumuşak durum, süper yumuşak durum ve genişlemiş disk durumları hakkında detaylı bilgiler King ve diğ. (2023); Sutton ve diğ. (2013)'te açıklanmıştır. 0.3-10 keV aralığındaki bu durumlar Çizelge 2'de özetlenmiştir (Tunç 2024).

3 Bulgular

FPBH'nin ULX'lere uygulanabilirliği incelenirken analizleri desteklemek adına kütle tahminleri, sertlik oranları ve $L_{\rm R}/L_{\rm X}$ oranlarına dayanarak üç farklı perspektiften de ek analizler yapılmıştır. ULX'ler için literatürdeki önceki sınıflandırmalara ek yöntemler tartışılacaktır. Hiç ele alınmamış konularla bağlantı kurarak FPBH uygulanabilirliğine ek katkılar sağlanması amaçlanmaktadır.

3.1 Temel Karadelik Bağıntısı

Her bir kaynağın X-ışını ve radyo akılarından, ve uzaklık bilgisinden türetilen X-ışını ve radyo parlaklıkları, kütle tahmini ve hata payı kapsamında, her kaynak için alt ve üst sınırları belirlemek amacıyla Klasik FPBH'de kullanılmıştır. Aynı işlem, değiştirilmiş FPBH ile tekrarlanmış ve aynı veriler kullanılarak her nesne için ikinci bir kütle değeri hesaplanmıştır.

Klasik FPBH ile yapılan kütle analizlerinin NSULX ve BHULX'ler için tutarlı olmayan sonuçlar verdiği ve literatürdeki örnekler için de çalışmadığı görülmüştür. Değiştirilmiş FPBH'nin, literatürden alınan dört kaynağın alternatif yöntemlerle hesaplanan kütleleriyle tutarlı sonuçlar verdiği bulunmuştur (Jang ve diğ. 2018; Chandrajit Singha & Senorita Devi 2019; Cseh ve diğ. 2012).

Her ne kadar ULX'lerin X-ışını bandında Eddington parlaklığını aşan yıldız kütleli karadelikler olduğu fikri baskın olsa da HLX'ler ve bazı ULX'ler için IMBH fikri tamamen dışlanmamıştır. Hesaplanan minimum kütle değerleri FPBH ile daha az uyumlu olsa da gerçek kütlelere daha yakın olma olasılığı daha baskındır. Bu nedenle, tüm veri seti IMBH veya GBH olarak değerlendirilmek yerine her iki olasılık da incelenmiştir.

Sonuç beklenildiği gibi dikkate değerdir. Elde edilen kütle değerlerinin yeni FPBH için 2.99-1290 M_{\odot} aralığında (olağan dışı bir örnek: $0.75\,M_{\odot}$) ve klasik FPBH için 701 ile $1.29 \times 10^6\,M_{\odot}$ arasında olduğu görülmüştür. Yeni kütle hesaplamalarına göre $100\,M_{\odot}$ 'den büyük IMBH adayı sayısı 6, yıldız kütleli aday sayısı 10 ve düşük kütleli iki aday (2.99 ve $0.75\,M_{\odot}$) belirlenmiştir ve bu adaylar sırasıyla grafikte kırmızı



Şekil 1. ULX verileri, FPBH bağıntısına 0.6 L_X ve L_R olarak yerleştirilmiştir. FPBH verileri, kütleler eklenmediği için dahil edilmemiştir.

ve yeşil ile işaretlenmiştir. Aynı zamanda, bu adaylar $\pm \sigma_1$ için gri ile gölgelenmiş bölgenin dışında kalan adaylardır.

Kütle hesaplamaları dahil edilmeden FPBH'ye yerleştirilen veri seti, Klasik FPBH sınırları ile Şekil 1'de, tüm kaynakları içeren yakınlaştırılmış versiyonu ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Veri seti, tahmini kütleler eklenmeden FPBH üzerine çizildiğinde ortaya çıkan grafik L_R vs. 0.6 L_X grafiğine karşılık gelmektedir. Hem veri setinin genel eğilimi görülebilir, hem de dört çeyreğe bölündüğünde belirli bölgelerde yoğunlaşmalar ve bazı izole kaynaklar ortaya çıkmaktadır. Dört çeyreğe bölünmüş biçimi Şekil 2'de görülebilir.

Bu kaynaklardan en belirgini, grafikte dördüncü çeyrekte yeşil ile gösterilen, veri setine kıyasla yüksek X-ışını parlaklığına ancak düşük radyo parlaklığına sahip olan adaydır. Bir diğeri, literatür verilerinden alınmış ve birinci çeyreğin sağ üst bölgesinde, veri seti ve eğilimden oldukça uzakta konumlanan pembe kaynaktır (Sutton ve diğ. 2012). Bu aday, aynı zamanda literatürde güçlü bir IMBH adayı olarak tanımlanmıştır.

Mavi ile işaretlenmiş ve veri setinin yoğunlaştığı, genel eğilimin baskın olduğu bölgede bulunan kaynaklar, kütle hesaplamalarında yıldız kütleli karadelik olarak sınıflandırılmış nesnelerdir. Aynı bölgede benzer eğilimler gösteren ve literatürde yer alan iki kaynak daha bulunmaktadır (Jang ve diğ. 2018; Chandrajit Singha & Senorita Devi 2019).

Bir diğer kaynak, üçüncü çeyreğin sol alt bölgesinde konumlanmış, veri setinden ve eğilimden ayrılmıştır (bu kaynak $\pm \sigma_1$ bölgesinde değildir) ve kırmızı ile gösterilmiştir. Ne yazık ki, üçüncü ve dördüncü çeyreklerin aşırı bölgelerinde bulunan kırmızı ve yeşil kaynaklarla eşleşen herhangi bir literatür örneği bulunmamaktadır.

Her ne kadar bu kaynakların $L_{\rm R}/L_{\rm X}$ oranları ve kütle tahminleri bilinse de FPBH üzerindeki konumları karşılaştırıldığında daha doğru tahminler ve gruplamalar yapmak mümkündür. Son olarak, radyo gözlem veri setinin düşük hassasiyeti ve düşük açısal çözünürlüğü nedeniyle, bir NSULX adayı bulmanın diğerlerine göre çok daha düşük bir olasılık olduğunu belirtmek gerekir.

Minimum kütle tahminlerinin, Sutton ve diğ. (2012); Jang ve diğ. (2018); Chandrajit Singha & Senorita Devi



Şekil 2. $0.6L_X$ ve L_R olarak FPBH bağıntısına yerleştirilen ULX verilerinin yakınlaştırılmış biçimi. Kütleler eklenmediği için FPBH verileri dahil edilmemiştir.

(2019) çalışmalarında belirtilen literatür bulgularıyla daha tutarlı sonuçlar verdiği ve bu verilerin FPBH'ye uyarlanmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu uyarlama için denklemin nasıl değiştirildiği önceki bölümlerde açıklanmış olup, denklemin orijinal ve yeni versiyonları grafikte siyah ve kesikli kırmızı çizgiyle gösterilmiştir.

Bu nedenle, FPBH'ye uyum sağlamak için kullanılan kütle tahmin değerleri, klasik FPBH ile yapılan ilk hesaplamalardan daha düşük olan ve yeni hesaplanmış değerlerdir. Minimum kütle tahminlerinin literatür bulgularıyla daha tutarlı sonuçlar verdiği ve bu verilerin FPBH'ye uyarlanmış olduğu tekrar gözlemlenmiştir. Uyarlama için kullanılan denklemin değişimi önceki bölümlerde açıklanmış olup, orijinal ve yeni versiyonları grafikte siyah ve kesikli kırmızı çizgiyle gösterilmiştir. Bu nedenle, FPBH'ye uyarlama için mevcut $L_{\rm R}$ vs. 0.6 $L_{\rm X}$ verilerine eklenerek kullanılan veriler başlangıçta belirtilen minimum kütle tahminleridir.

Kütle tahminleri eklendikten sonra veri setinin FPBH'ye uyarlanmış hali Şekil 3'te hem yakınlaştırılmış hem de orijinal FPBH ölçeğinde gösterilmiştir. ULX'lerin konumlandığı bölgenin çok az veri kaynağı içeren bazı aktif olmayan galaksi çekirdeklerini kapsayan bir bölge olduğu gözlemlenmiştir. X ve Y eksenleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde, Y eksenindeki radyo gözlemlerinin L+T ve Sy alanı olarak belirtilen değerlere benzediği, X eksenindeki değerlerin ise GBH ile L+T ve Sy alanı arasındaki bölgeye düştüğü görülmektedir.

Klasik FPBH kullanıldığında hesaplanan kütleler L+Tdoğrultusunda ULX'lerin, Sy ve kaynaklarının başlangıcından hemen önce başlayıp SMBH'lerin bulunduğu bölgenin orta değerlerine doğru ilerlediği görülmüştür. Bu nedenle, ULX veri setinin orijinal FPBH yönünde galaksi çekirdekleriyle paralel bir yol izlediği sonucuna varılmıştır. Tahmini kütle sonuçlarının literatür bulgularıyla paralel elde edildiği yeni FPBH yönünde ise bu veri setinin parlaklık açısından bu iki sınıfa da uymayan bir bölgede, ancak kütle hesaplaması açısından bir kısmının GBH, bir kısmının ise IMBH'lere uyduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak, FPBH üzerinde radyo ve X-ışını verileri kullanılarak hem klasik FPBH ile hem de modifiye edilmiş



Şekil 3. Klasik FPBH, ULX adayları ve tahmini kütleleriyle birlikte onaylı ULX'leri içermektedir. Sol üstteki lejant ULX adaylarına aittir ve tahmini kütle hesaplamalarına göre renklendirilmiştir. Orta üstteki lejant, literatürden alınan dört onaylı ULX'e aittir ve yine kütle hesaplamalarına göre renklendirilmiştir. Sağ alt köşedeki lejant, orijinal FPBH'ye aittir. QSO: Quasi-Stellar Objects (Yıldız Benzeri Nesneler), Sy: Seyfert Galaksileri, L: LINER (Düşük İyonizasyonlu Nükleer Emisyon Çizgi Bölgeleri), T: Geçiş Nesnesi (LINER/H II) anlamına gelmektedir. X ve Y ekseni sınırları orijinal FPBH ile aynı tutulmuştur. Siyah çizgi, Temel Bağıntıyı (Fundamental Plane) temsil eder. Kesikli siyah çizgiler, denklemde değişkene bağımsız kısım için ± 4.03 hata payını göstermektedir. Kırmızı kesikli çizgi ise ULX'ler için önerilen yeni FPBH denklemidir. Hiçbir veri için hata çubukları eklenmemiştir (Merloni ve diğ. 2003). Hata çubuklarının ne denli küçük olduğu Tunç (2024)'da incelenmiş ve gösterilmiştir.

FPBH ile kütle hesaplamaları yapılmış ve bu hesaplamalar literatürdeki bazı benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Modifiye edilmiş FPBH'nin ULX'lerin beklenen ve literatürdeki örnekleriyle tutarlı olan sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla klasik FPBH'nin ULX'ler için doğru kütle hesapları sağlamadığı açıkça görülmüştür. ULX'lerin FPBH'ye uymadığı ancak FPBH üzerinde kayda değer değişikliklerin ardından tutarlı sonuçlar verdiği en önemli bulgudur.

3.2 Radyo ve X-ışını Parlaklıklarının Oranları

Radyo Parlaklığı ve X-ışını Parlaklığı oranlarına bakıldığında, ULX'lerin ne AGN/QSO gibi süper kütleli kaynaklara ne de LMXB/HMXB gibi güneş kütleli kaynaklara benzediği görülmektedir. L_R/L_X oranı bu iki değer arasında olan ULX'ler, FPBH üzerinde bu iki grup arasındaki bölgeye yerleşmektedir. Bunun detayları Tunç (2024) incelemiş ve görselleştirmiştir.

ULX'lerin bulunduğu bu bölge, FPBH oluşturulurken kullanılan yıldız kütleli ve süper kütleli karadelikler arasında daha az verinin bulunduğu ve daha düşük yoğunluklu bir bölgedir. Birkaç ULX adayı dışında, verilerin çoğu AGN olasılığının başladığı ve artış gösterdiği bu bölgede yoğunlaşmıştır. Bu durum, Klasik FPBH kullanılarak yapılan kütle hesaplamalarının neden 700 ile milyonlar arasında değiştiğini açıklamaktadır.

Ayrıca, FPBH üzerindeki yıldız kütleli karadeliklerin $\log(L_R/L_X)$ oranı -7.75 ile -6.25 arasında, AGN'ler için ise - 5.1 ile 0 arasındadır. Analiz sonucunda, ULX'ler için bu oran -6.35 ile -3.53 arasında bulunmuştur. -6.36 değerine sahip tek

bir örnek olduğu ve veri setindeki diğer örneklerden oldukça uzak olduğu belirtilmelidir. En yakın örnek -5.54 değerindedir.

Bu durum, bazı ULX örneklerinin yıldız kütleli karadeliklere, bazılarının AGN'lere benzediğini, ancak bazılarının her iki grupla da uyumsuz olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, parlaklık oranına bakıldığında, beklentilerin aksine, ULX popülasyonunun çoğunluğunun AGN'lerle benzer bir eğilim sergilediği söylenebilir. ULX'lerin bu iki grup arasında yer alan ancak belirli bir ölçüde her iki grup ile de örtüşen nesneler olduğu ifade edilebilir.

3.3 Sertlik Orani (HR)

Bunlara ek olarak, sertlik analizinde görülen durum farklıdır. HR_{i+1} vs. HR_i analizi, veri setinin dağılım oranlarının AGN'lerden ziyade XRB'lerle daha tutarlı olduğunu göstermiştir. Bu durum, Earnshaw ve diğ. (2019) çalışmasında da doğrulanmıştır. Ancak, XRB ve AGN dağılım oranlarının kesiştiği bölgelerde bir yoğunlaşma gözlemlenmiştir. İki örnekte bu iki bölge içinde yer almayan sertlik oranları gözlemlenmiştir. Diğer iki örnek ise XRB'lerin dağılım oranlarının dışında ancak AGN'lerin dağılım oranlarının içinde kalan sertlik oranları göstermektedir.

Sertlik oranı grafiklerine detaylı ve ayrı ayrı bakıldığında daha ilginç bir senaryo ortaya çıkmaktadır. Sertlik oranları karşılaştırılırken minimum kütle hesaplamaları kullanılmıştır.

Sertlik oranlarının karşılaştırıldığı grafikler (HR1 vs. HR2, HR2 vs. HR3, HR3 vs. HR4) Şekil 4'te görülebilir. HR1 vs. HR2 grafiğinde, yani düşük X-ışını enerjilerinin sertlik oranlarında, her iki grubun (XRB ve AGN) dışında kalan iki örnek (orta kütleli; mavi) ve sadece XRB dağılımının dışında kalan iki örnek (bir orta kütleli; mavi, bir yüksek kütleli; kırmızı) tespit edilmiştir.

HR2 vs. HR3 grafiğinde, hem AGN hem de XRB dağılımına uymayan bir örnek, sadece XRB dağılımına uymayan iki örnek (yüksek kütleli; kırmızı) tespit edilmiştir.

HR3 vs. HR4 grafiğinde, iki gruba da (XRB ve AGN) uymayan üç yüksek kütleli (kırmızı) örnek bulunmaktadır. Orta kütleli iki ULX, sadece XRB'lere uymayan bir oran sergilemektedir. Ayrıca bir aday yüksek enerjilerde gözlemi olmaması ve yüksek enerjilerde tüm veri setiyle tutarsızlık gösterdiği için şüpheli olarak işaretlenerek analizlerden dışlanmıştır.

3.4 X-ışını Bantları

X-ışını bantlarındaki veriler ULX veri setinin süper yumuşak durum, sert durum ve genişlemiş disk durumu gibi tüm durumları barındırdığını göstermiştir. Bu durumların tanımlamaları King ve diğ. (2023)'den alınmıştır. Sayıca baskın olan sert durumun yanı sıra, genişlemiş disk durumu da ikinci en baskın durumdur.

Literatürden alınan 4 veri ve ULX adayı olan 17 veri olmak üzere toplam 21 veri üzerinde yapılan analiz, toplam entegre bant üzerinden sıralanmış ve bu banttaki zirveler ile bu zirvelerin özelliklerine bakılarak gruplandırılmaları amaçlanmıştır (King ve diğ. 2023; Tunç 2024). Örneklerin 5 banttaki X-ışını parlaklık değerleri, maksimum değer için koyu kırmızıdan minimum değer için beyaza doğru bir tonlamada gösterilmiştir.

Tüm veri setinin, literatür verileri de dahil olmak üzere, beş X-ışını bandındaki spektrumları Şekil 5'te gösterilmiştir. X ekseni, 0.2-12 keV arasındaki her bir X-ışını bandı için bölünmüş



Şekil 4. (Sol panel) Elde edilen dört farklı sertlik oranı verisinin HR_i vs. HR_{i+1} olarak karşılaştırılması. Her grafikte tüm veri seti (tüm kütleler) bir bütün olarak gösterilmektedir. Yukarıdan aşağıya her bir grafik farklı sertlik karşılaştırılmalarını temsil eder. Kaynaklar, FPBH kütle tahminlerine göre renklere ayrılmış ve dağılımları izometrik çizgilerle gösterilmiştir (ortalama hata çubuğu mavi, en büyük hata çubuğu turuncu ile gösterilmiştir). (Sağ Panel) Elde edilen dört sertlik oranının HR_i vs. HR_{i+1} her bir kütle grubu için karşılaştırıması. Yukarıdan aşağıya her bir grafikte, belirli bir kütle grubu için 3 farklı HR_i vs. HR_{i+1} karşılaştırması ait olduğu kütle grubu için birlikte gösterilmiştir.

ve eksenin tamamı, kara cisim dağılımını taklit etmek amacıyla gri tonlamalı olarak gösterilmiştir.

21 ULX adayı X-ışını parlaklıklarını göre sıralanmış ve hem Klasik FPBH hem de modifiye edilmiş FPBH ile yapılan kütle tahminleri de grafikte yanlarına eklenmiştir. En parlak 13 adayın 10'u sert ve üçü yumuşak/süper yumuşak durum özellikleri göstermektedir. Daha az parlak ($<10^{39}$ erg s⁻¹) sekiz aday arasında dört HUL adayı gözlemlenmiştir. Bu parlaklık sınırında, BD rejimini gösteren dört ULX adayı tespit edilmiş ve en düşük parlaklık 7×10^{38} erg s⁻¹ olarak ölçülmüştür. HUL rejimini gösteren adaylar arasındaki belirgin farklılıklar nedeniyle, bu adaylar üzerinde bazı gruplamalar ve işaretlemeler yapılmıştır (Tunç 2024).

HLX seviyesi $(10^{41} \text{ erg s}^{-1})$ ile $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ seviyesi arasında BD rejimi gösteren hiçbir aday bulunmamıştır. Dominant rejim HUL olarak görünmekle birlikte, literatür



Şekil 5. ULX adaylarının ve doğrulanmış dört ULX'in X-ışını spektrumları. Koyu kırmızı en yüksek parlaklık değerini, beyaz ise en düşük parlaklık değerini temsil etmektedir. Her kaynak, kendi maksimum ve minimum değerlerine göre renklendirilmiştir. Soldaki kutularda X-ışını parlaklıkları sırasıyla 0.2-12 keV aralığında gösterilmiştir. Yeni FPBH'ye göre ve klasik FPBH'ye göre yapılan kütle hesaplamaları yer almaktadır. Her kaynağın durumu, zirve yaptığı noktada belirtilmiştir.

verilerindeki dört örnekten üçü SUL veya SSUL rejimlerini göstermektedir. Bu nedenle, BD rejiminin 10^{39} erg s⁻¹ in üzerinde bulunmadığı ve yüksek parlaklıklarda HUL ile SUL rejimlerinin gözlemlendiği söylenebilir.

Ayrıca, bu durumlar kütle hesaplamalarıyla karşılaştırılmış ancak net bir korelasyon gözlemlenmemiştir. Bu nedenle FPBH ile yapılan kütle analizleri ile ULX adaylarının X-ışını bantlarındaki davranışları arasında ne yazık ki net bir bağ olmadığı sonucuna varılmıştır.

En parlak 13 örnekten altısının kütle açısından IMBH sınıfına, altısının GBH sınıfına düştüğü ve bir tanesinin veri setinden ayrılmış, daha önce FPBH'de belirtildiği gibi bir güneş kütlesinden daha az hesaplandığı gözlemlenmiştir. Kalan 8 örneğin $<\!10^{39};$ erg s $^{-1}$ değerinde kaynaklar olduğu hatırlanırsa, bu sekiz örnekten altısının GBH 2.99-20 M_{\odot} ve ikisinin 272-445 M_{\odot} aralığında IMBH adayı olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, X-ışını bantlarındaki davranış ile ULX

kütlesi arasında bir korelasyon gözlenememiş, NSULX adayı olan veri setinin en düşük kütleli adayının bile aşırı parlak bölgede bulunduğu görülmüştür. Bu başka bir açıdan tutarlı bir gözlemdir çünkü güncel bazı çalışmalarda ortaya çıkan NSULX'lerin bile çok yüksek X-ışını parlaklıklarına ulaşabildiği bulgusuyla örtüşür (Abarca ve diğ. 2021; Tunç 2024).

4 Tartışma

4.1 Çalışmanın Özeti

Bu çalışmada, literatürdeki dört ULX'in farklı kütle hesaplama yöntemleriyle (parlaklık ilişkisi dışında) hesaplanan kütleleri, aynı ULX'lerin klasik FPBH ile hesaplanan kütleleriyle karşılaştırılmıştır. Klasik FPBH, bu farklı kütle hesaplama yöntemleriyle benzer sonuçlar elde etmek için modifiye edilmiştir. Böylece FPBH'nin ULX'ler üzerinde kütle hesabı için uygulanabilir ve kullanılabilir olup olmadığı incelenmiştir. Sonuçta ortaya çıkan FPBH, modifiye edilerek ULX'ler için en iyi uyumlu olan hali şu şekilde bulunmuştur:

$$\log L_{\rm R} = 0.60 \log L_{\rm X} + 0.78 \log M + 9.645 \tag{6}$$

Daha sonra, ULX adayı veri setimize hem klasik FPBH hem de bu yeni modifiye edilmiş FPBH kullanılarak kütle hesaplamaları yapılmış ve veri seti, bu yeni modifiye edilmiş FPBH ile yapılan kütle hesaplamalarına göre gruplandırılmıştır. Bu gruplar sertlik karşılaştırmalarıyla ayrı ayrı incelenmiş ve AGN'ler ve XRB'lerle benzerlikleri ve farklılıkları araştırılmıştır. Veri setinin AGN'ler veya XRB'lerle daha benzer bir davranış gösterip göstermediği parlaklık oranına bakılarak incelenmiş ve son olarak, X-ışını spektrumları incelenerek ULX durumları belirlenerek bu durumlarla modifiye edilmiş FPBH ile yapılan kütle hesaplamaları arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular dört başlık altında özetlenmiştir:

- Klasik FPBH'nin Kullanılma Nedeni: FPBH'nin neden kütle hesaplama yöntemi olarak seçildiği ve çalışmanın temelini nasıl oluşturduğu tartışılmıştır.
- IMBH Adayları ve Katkıları: ULX'lerin hala IMBH potansiyeline sahip olduğunu gösteren bulgularımız tartışılırken, güçlü adayların nasıl belirlendiği açıklanmıştır.
- Nötron Yıldızı ULX'lerinin ve Radyo Verilerinin Eksikliği: Çalışmada neden sadece bir NSULX adayının bulunduğu açıklanmıştır. Bu durumun hangi bağlamda beklentilerimize uygun olduğu tartışılmıştır.
- Gelecek Çalışmaları: bkz. §4.5.

4.2 Klasik Temel Karadelik Bağıntısının Kullanılma Sebebi

FPBH ilk olarak 2003 yılında ortaya çıkmış olmasına rağmen (Merloni ve diğ. 2003) AGN, Sy, LINER'ler ve XRB'ler verilerini kullanarak hazırlanmış bir bağıntıya atıfta bulunmaktadır. Daha sonraki dönemlerde, bu bağıntıya çeşitli alternatifler ortaya çıkmış ve farklı şekillerde ele alınmıştır. Farklı veri setleri kullanılmış olmasına rağmen, ULX'ler hiçbir veri setine dahil edilmemiştir. Bu nedenle, en temel çalışmaya dayanmak önemlidir.

Ayrıca, bu seçim, Klasik FPBH grafiğindeki eğimin, ULX veri setinin kalıntı hesaplamalarındaki eğim ile yüksek benzerliği ve sağladığı sapma marjının kütle temelinde $10^8\,\text{M}_\odot~(\log_{10}$ ölçeğinde $\pm4.06)$ mertebesinde olması nedeniyle yapılmıştır. Bu sapma marjı içinde, ULX'lerin çoğunluğunun yıldız kütleli

karadelikler ve nötron yıldızı sistemleri olduğunu göz önüne alarak (Wiktorowicz ve diğ. 2017), veri setindeki en düşük kütle adayının, yeni modifiye edilmiş FPBH'nin geçiş noktası olması amaçlanmıştır.

Bu FPBH yöntemiyle elde edilen değerler, diğer yöntemlerle hesaplanan, veri setindeki onaylanmış ULX'lerin yıldız kütleli karadelik kütle modelleriyle karşılaştırılmış ve korelasyonlar gözlemlenmiştir. Elde edilen tüm değerlerdeki benzerlik, FPBH modifiye yönteminin daha tutarlı ve bilimsel analizler için kullanılabileceğini göstermektedir. Bu uyum, sadece yıldız kütleli karadelikler için değil, aynı zamanda IMBH adayları için de tutarlıdır. Bu nedenle, bu korelasyonlar, bu yöntemle elde edilen değerlere dayalı bir analiz yapılmasını kabul edilebilir kılmaktadır.

Ancak, tüm bu tutarlılık için FPBH'nin yaklaşık $10^{2.5}$ mertebesinde değiştirildiğini belirtmekte fayda vardır. Yani açık bir şekilde Klasik FPBH'nin ULX'ler için tutarlı ve kullanılabilir olmadığını söylüyoruz.

4.3 IMBH Adayları ve Katkıları

Altı IMBH adayından ikisi güçlü aday olarak değerlendirilmektedir. Bu çıkarımı sağlayan ilk kriter, kütle hesaplamalarıdır. Ayrıca, bu iki örneğin parlaklık oranları, literatürden alınan IMBH adaylarıyla uyum göstermektedir.

Bunun yanında, bu iki aday, ULX aday setinin σ değerleri içinde yer almayan ve veri setinden sapma gösteren örnekleridir. HR3 vs HR4 karşılaştırmasında, IMBH adaylarının AGN, XRB ve diğer ULX'lerden farklı bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Altı örneğin üçü (ikisi yukarıda güçlü IMBH adayları olarak tanımlanan örneklerdir) yüksek sapma göstermekte ve bu davranışı güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu nedenlerden dolayı, iki aday güçlü IMBH adayları olarak değerlendirilmektedir. Bunun nedeni, parlaklık oranlarının literatürle benzerliği, HR3 vs HR4 davranışları ve hesaplanan kütlelerin $100 \, M_{\odot}$ 'den büyük olmasından dolayıdır. Bu altı adaydan ikisi güçlü aday olarak öne çıkarken, kalan dört adaydan birinin HR3 vs. HR4 davranışı da bu iki adayla benzerlik göstermektedir.

4.4 NSULX Eksikliği ve Radyo Verileri

Nötron yıldızlarının da ULX oluşturabilen sıkı nesneler olduğuna dair genel kabul nedeniyle, ilk akla gelen beklentilerden biri, bu veri setinin onaylanmış ULX'lerdeki NSULX/ULX oranına yakın bir oranda NSULX içermesi olacaktır. ULX popülasyonundaki N(NSULX)/N(ULX) oranı, gözlemler ve bazı modellerle sınırlıdır (Wiktorowicz ve diğ. 2017), bu nedenle bu oranın gerçeği tam olarak yansıtıp yansıtmadığına dair net bir şey söylenemez.

Veri setinin elde edildiği ULX adayı kataloğunun ~770 bağımsız kaynak içerdiği göz önüne alındığında, bu orandan çok daha düşük bir oranda bile olsa, NSULX adaylarının görülmesi beklenmelidir. Önceki bölümlerde bahsedilen NRAO'nun düşük hassasiyeti nedeniyle, Condon ve diğ. (2002) gözlemlerin minimum radyo parlaklığından bahsetmiştir. Bu nedenle, gözlemlenen nesnelerin bulunduğu 3-130 Mpc aralığındaki gözlemlerimizin alt sınırı belirlenebilir.

van den Eijnden ve diğ. (2021); Muno ve diğ. (2005); Migliari ve diğ. (2012); Titarchuk & Shaposhnikov (2005) çalışmalarında belirtildiği gibi yalnızca NSULX'ler değil, tüm NS ikili sistemleri, karadelik sistemlerine kıyasla 30 kat

234 Tunç, E. ve diğ.

daha düsük radyo parlaklıkları gösterebilmektedir. Ayrıca, NS ikili sistemlerinin $L_{\rm R}/L_{\rm X}$ oranlarına göre geliştirilen modellerde, ULX olarak sınıflandırılabilecek NS sistemlerinin, BHULX'lere kıyasla daha düşük radyo parlaklıkları göstereceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, NRAO'nun neden olduğu sınırlama nedeniyle bir NSULX'ün sahip olabileceği radyo parlaklıklarının gözlemlenmesi beklenmemektedir. Ek olarak, veri setindeki tek NSULX adayının, BHULX eğiliminden ziyade NS ikili sistemleriyle bir korelasyon gösterdiği ortaya konulmuştur. Tüm bunlara ek olarak, ULX'lerin galaksiler icindeki nokta kaynaklar olduğu göz önüne alındığında, NRAO'nun sınırlayıcı faktörleri (düsük acısal cözünürlük, homojen olmayan veri seti), radyo verilerinin ULX'lere ait olma olasılığını azaltan ve 770 kaynaktan 20 kaynağa düşüşe neden olan temel faktörlerdir (Condon ve dig. 2002). Bu nedenle, bu sınırlayıcı faktörler, aday katalogdan veri setine geçiş sürecinde birçok kaynağın kaybına neden olsa da NSULX'leri çok daha yüksek bir olasılıkla elemiş olmaktadır.

Özetle, daha yüksek hassasiyete ve çözünürlüğe sahip radyo verileri NSULX'lerin incelenmesi ve bu makalede uygulanan yöntemler için şarttır. Radyo verilerindeki kısıtlamalar nedeniyle NSULX'lerin elendiği istemsiz bir eğilimin gerçekleşmiş olma ihtimalini çok yüksek görüyoruz. Ancak, eğer ihtimal doğruysa veri setinin neredeyse tamamen (kesin olmayan tek bir NSULX adayı bulunmakta) BHULX'ler ve IMBH'lerden oluştuğu sonucu ortaya çıkar (Tunç 2024).

4.5 Gelecek Çalışmaları

Son olarak, bu çalışmada yapılabilecek iyileştirmelere değinmek isteriz. Bunlardan ilki, daha büyük bir veri setiyle aynı yöntemlerin test edilmesidir. Veri setinin genişletilmesi halinde yöntemlerin önce sadece BHULX ve IMBH'lere uygulanması ve incelenmesi, sonrasında ise NSULX'ler de dahil edilerek tüm veri setine uygulanması gerekmektedir. İkincisi, daha yüksek çözünürlüklü ve daha yüksek hassasiyetli radyo verilerinin kullanılmasıdır. Bu, hem aday kaynakların sayısını artıracak hem de orantılı olarak daha fazla NSULX bulunmasını ve daha tutarlı analizler yapılmasını sağlayacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır: FPBH veya modifiye edilmiş hali, karadelikler için geliştirilmiş bir bağıntıdır. Dolayısıyla NSULX'lerinin karadelikler için geliştirilmiş bu bağıntıya uyup uymayacağı, ne denli uyacağı belirsizdir. Ayrı bir çalışmanın konusudur.

Merloni ve diğ. (2003); Gültekin ve diğ. (2019) çalışmasında klasik FPBH radyo verileri olarak 5 GHz gözlemlerinin kullanılmasının önemini vurgulamıştır (FPBH'de belirtildiği gibi). Farklı frekanslardaki radyo verilerinin uygulandığı modeller (örneğin 1.4 ve 8.5 GHz) kullanılarak bazı alternatif hesaplamalar yapılabilir (Cseh ve diğ. 2012; Chandrajit Singha & Senorita Devi 2019; Jang ve diğ. 2018). Bu yeni hesaplamalar mevcut olanlarla karşılaştırılarak, ortaya çıkan benzerlikler, korelasyonlar ve karşıtlıklar dikkate alınarak ULX'ler için daha iyi tahminler ve modellemeler yapılabilir.

5 Sonuç

Bu çalışmada, Temel Karadelik Bağıntısının (FPBH) Ultraluminous X-ışını Kaynaklarına (ULX) uyarlanabilirliği incelenmiştir. Ayrıca, ULX adayları üç farklı perspektiften (Radyo ve X-ışını parlaklık oranı, Sertlik oranı, X-ışını bantları) analiz edilerek çeşitli parametreler ve hesaplanan kütleler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu yolla, ULX'lerin benzersiz doğasını anlama amacı da bir diğer motivasyon olmuştur. Odak noktamız, ULX'ler için alternatif kütle hesaplama yöntemlerini, daha önce karadelik kütle hesaplamalarında kullanılan radyo ve X-ışını parlaklıkları arasındaki ilişkiye dayanan yöntemlerle karşılaştırmak ve tutarlılıklarını inceleyerek daha tutarlı hale getirebilmektir.

FPBH gözden geçirilerek modifiye edilmiş ve ULX'ler için daha tutarlı kütle hesaplamaları sağlayan genel bir karadelik kütle hesaplama yöntemi geliştirilmesini sağlamıştır:

$$\log L_{\rm R} = 0.60 \log L_{\rm X} + 0.78 \log M + 9.645 \tag{7}$$

Bu önerilen yeni kütle tahmin modeli sayesinde, yapılan gruplama sonucunda 18 veriden oluşan veri setinde altı IMBH adayı (ikisi güçlü aday), bir nötron yıldızı adayı, bir NS/BH sınır adayı ve yıldız kütleli karadelik içeren 10 ULX adayı belirlenmiştir.

Daha sonra, gruplandırılan bu adayların eğilimleri, hem sertlik hem de parlaklık oranlarının AGN'ler, XRB'ler ve diğer ULX'lerle karşılaştırılmasıyla incelenmiştir. ULX'lerin durumları, beş ardışık X-ışını bandının gözlemlenmesiyle belirlenmiştir. Görüldüğü üzere modifiye edilen FPBH, literatürdeki başka kütle hesabı yöntemleriyle tutarlı ve literatürden alınan bu ULX'ler için çalışan bir durumdadır.

ULX'lerin parlaklık oranları AGN'lere yakın olsa da, XRB'ler ve AGN'ler arasındaki boşluğa daha iyi uyum sağlamaktadır. Parlaklık oranları göz önüne alındığında, klasik FPBH (cFPBH) kütle hesaplamalarının ULX'ler için neden tutarlı çalışmadığı daha net görülebilir.

Klasik FPBH ile yapılan kütle hesaplamaları sonucunda, ULX'lerin AGN'lerin düşük kütleli örneklerinin bulunduğu bölgede yoğunlaştığı ve ayrıca bu bölgenin hemen altında, olası IMBH'lere karşılık gelen bölgede bulunduğu görülmektedir. Bu iki bölge, XRB'ler ve AGN'ler arasındadır ancak parlaklık oranlarının öngördüğü gibi AGN'lere daha yakındır. Bu, ilk çalışmalarda neden tüm ULX'lerin yanlış bir şekilde IMBH olarak yorumlandığına iyi bir açıklamadır. FPBH'yi modifiye etme motivasyonunu da haklı çıkaran önemli bir bulgudur.

ULX'ler ve diğer karadelik sistemleri arasında benzerlikler bulunsa da, önemli farklılıklar mevcuttur. Bu farklılıklar FPBH kullanımını engellemezken, IMBH'leri diğer ULX'lerden ayırmaya yardımcı olabilecek işaretlerdir. Modifiye edilmiş FPBH, karadelikler için hala geçerli olsa da nötron yıldızları için çalışması şüphelidir. Böylece, modifiye edilmiş FPBH, kütle hesaplamalarının olası karadelik kütle aralığında olup olmadığını görerek NSULX'leri ayırt etmeye de yardımcı olabilir. Bu nedenle çıkarımımız, yüksek enerjilerdeki sertliklerin IMBH'leri ayırt etmede, modifiye edilmis FPBH ile yapılan kütle hesaplamalarının ise NSULX'leri ayırt etmede yardımcı olabileceğidir. ULX'ler diğer karadelik sistemleriyle belirli benzerlikler gösterse de, bazı ULX'lerin nötron yıldızlarından oluştuğu göz önüne alındığında, analizlerinin diğer karadelik sistemleriyle karşılaştırılabilir olacak şekilde genelleştirilmesini uygun bulmuyoruz.

Modifiye edilmiş FPBH, karadelik barındıran herhangi bir ULX sistemi (BHULX, IMBH) için tutarlıdır.

Ayrıca, daha yüksek çözünürlüklü ve daha yüksek hassasiyetli radyo gözlemlerinin eksikliğinin en sınırlayıcı parametre olduğunu da vurgulamak isteriz.

Kaynaklar

Abarca D., Parfrey K., Kluźniak W., 2021, ApJ, 917, L31 Bachetti M., ve diğ., 2014, Nature, 514, 202

- Bernadich M. C. i., Schwope A. D., Kovlakas K., Zezas A., Traulsen I., 2022, A&A, 659, A188
- Brightman M., ve diğ., 2016, in AAS/High Energy Astrophysics Division #15. p. 207.03
- Brightman M., ve diğ., 2018, in 42nd COSPAR Scientific Assembly. pp E1.13–2–18
- Carpano S., Haberl F., Maitra C., Vasilopoulos G., 2018, MNRAS, 476, L45
- Centre de Données Astronomiques de Strasbourg (CDS) 2011, Aladin: Interactive Sky Atlas, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1112.019 (ascl:1112.019)
- Chandrajit Singha A., Senorita Devi A., 2019, in Journal of Physics Conference Series. p. 012003, doi:10.1088/1742-6596/1330/1/012003
- Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., Yin Q. F., Perley R. A., Taylor G. B., Broderick J. J., 2002, VizieR Online Data Catalog, p. VIII/65, ADS
- Cseh D., ve diğ., 2012, ApJ, 749, 17
- Doroshenko V., Tsygankov S., Santangelo A., 2018, A&A, 613, A19
- Earnshaw H. P., Roberts T. P., Middleton M. J., Walton D. J., Mateos S., 2019, MNRAS, 483, 5554
- Fabbiano G., 1989, ARA&A, 27, 87
- Fabrika S., Mescheryakov A., 2001, in Schilizzi R. T., ed., Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions Vol. 205, Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolutions. p. 268 (arXiv:astro-ph/0103070), doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0103070
- Gordon Y. A., ve diğ., 2021, ApJS, 255, 30 Gültekin K., King A. L., Cackett E. M., Nyland K., Miller J. M., Di
- Matteo T., Markoff S., Rupen M. P., 2019, ApJ, 871, 80 Israel G. L., 2017, Taking the beat of the UNSeEN (The Ultraluminous NS populatioN of ULXs), XMM-Newton Proposal
- ID #82445 Israel G. L., ve diğ., 2017, in Ness J.-U., Migliari S., eds, The X-ray Universe 2017. p. 104
- Jang I., Gliozzi M., Satyapal S., Titarchuk L., 2018, MNRAS, 473, 136
- King A. R., Davies M. B., Ward M. J., Fabbiano G., Elvis M., 2001, ApJ, 552, L109
- King A., Lasota J.-P., Middleton M., 2023, New Astron. Rev., 96, 101672
- Lipunova G. V., 1999, Astronomy Letters, 25, 508
- Merloni A., Heinz S., di Matteo T., 2003, MNRAS, 345, 1057
- Migliari S., Ghisellini G., Miller-Jones J., Russell D., 2012, in International Journal of Modern Physics Conference Series. pp 108–113, doi:10.1142/S2010194512004485
- Muno M. P., Belloni T., Dhawan V., Morgan E. H., Remillard R. A., Rupen M. P., 2005, ApJ, 626, 1020
- Poutanen J., Lipunova G., Fabrika S., Butkevich A. G., Abolmasov P., 2007, MNRAS, 377, 1187
- Rodríguez Castillo G. A., ve diğ., 2020, ApJ, 895, 60
- Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A, 24, 337, ADS
- Sutton A. D., Roberts T. P., Walton D. J., Gladstone J. C., Scott A. E., 2012, MNRAS, 423, 1154
- Sutton A. D., Roberts T. P., Middleton M. J., 2013, MNRAS, 435, 1758
- Titarchuk L., Shaposhnikov N., 2005, ApJ, 626, 298
- Tsygankov S. S., Doroshenko V., Lutovinov A. A., Mushtukov A. A., Poutanen J., 2017, A&A, 605, A39
- Tunç E., 2024, Master's thesis, Middle East Technical University
- Wiktorowicz G., Sobolewska M., Lasota J.-P., Belczynski K., 2017, ApJ, 846, 17
- Wolter A., Rushton A., Mezcua M., Cseh D., Pintore F., Prandoni I., Paragi Z., Zampieri L., 2015, in Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). p. 91 (arXiv:1412.5643), doi:10.22323/1.215.0091
- van den Eijnden J., ve diğ., 2021, MNRAS, 507, 3899

TJAA Vol. 6, Special Issue, p.226-235 (2025).

Access

M25-0357: Turkish J.A&A — Vol.6, Issue 3.