

Kütle Aktarımlı Milisaniye X-ışını Pulsarlarında Zaman Analizi Yöntemleri ile Uygulamalar

M. Turan Sağlam¹ *, Can Güngör² 

¹ İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Uzay Bilimleri Programı, İstanbul 34116, Türkiye

² İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 34119, Türkiye

Accepted: November 22, 2022. Revised: November 21, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Çalışmamızda, sürekli atma gösteren 5 kütle aktarımlı milisaniye X-ışını pulsarının (Accreting Millisecond X-ray Pulsar – AMXP) –SAX J1808.4-3658, IGR J1749.8-2921, XTE J1751-305, XTE J1807-294 ve XTE J1814-338– zaman analizi sonuçlarını sunmaktayız. Bu kaynaklara ait Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) uydusu üzerinde bulunan Proportional Counter Array (PCA) dedektörü verisini 3.0 – 30.0 keV aralığında sınırladıktan sonra 128 s zaman dilimlerine ayırdık. Her bir zaman dilimine karşılık gelen güç spektrumlarını iki farklı yöntemle (Z^2 testi ve maksimum olabilirlik çıkarımı) elde ettik. İki yöntemde de her bir kaynağa ait literatürden alınan dönme frekansları civarında milisaniye mertebesindeki duyarlılıklarla taramalar gerçekleştirilerek en olası dönme frekansları tespit ettik. Çalışmamız sonucunda her kaynağa ait dönme frekansının zaman evrimi ve güncel yörünge dolanma dönemi değerleri literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca örneğimizden SAX J1808.4-3658 kaynağına ait yörünge düzeltmeleri yapılmış ve elde edilen dolanma dönemleri teyit edilmiştir. İncelediğimiz kaynaklar kullanılarak milisaniye mertebesinde uygulanabilecek zaman analizi yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

Abstract

In our study, we present the temporal properties of 5 accreting millisecond X-ray pulsars (AMXPs) –SAX J1808.4-3658, IGR J1749.8-2921, XTE J1751-305, XTE J1807-294 and XTE J1814-338– showing continuous pulsation in their X-ray light curves. After limiting the data taken by Proportional Counter Array (PCA) on-board the Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) of these sources to the energy range of 3.0 - 30.0 keV, we split the data into 128 s time intervals. We obtain the power spectra corresponding to each time interval by using two different methods (Z^2 test and maximum likelihood). In both methods, the search is done with sub-millisecond sensitivities around the expected spin frequencies for the sources and the most probable spin frequencies are determined. As a result of our research, the time evolution of spin frequencies and orbital periods were obtained. Furthermore, we confirm the orbital period obtained throughout our analysis of SAX J1808.4-3658 via orbital correction.

Anahtar Kelimeler: timing analysis, Z^2 method, maximum likelihood technique

1 Giriş

Düşük kütleli X-ışını çiftleri, bileşenlerinden biri karadelik veya nötron yıldızı olan bir sıkışık nesne ve diğer bileşeni geç tip yaklaşık bir güneş kütlelerinden daha düşük kütleyle sahip olan anakol yıldızından oluşan çift sistemlerdir. Anakol yıldızı yaşamının son dönemlerinde hacmini genişleterek yarıçapını arttırmaya ve böylece eş potansiyel yüzeyini doldurmaya başlar. Sonuçta eşlikçi yıldız, sistemin birinci Lagrange noktasından sıkışık nesnenin Roche lobuna madde aktarır. Akan yıldız maddesi doğrudan sıkışık nesneye düşmek yerine, nesne etrafında bir disk yapısı oluşturur. Sıkışık cismin nötron yıldızı olduğu sistemlerde, diskin iç kısımlarında bulunan madde, nötron yıldızının manyetik alan çizgilerini takip ederek kutup bölgelerine yağar. Aktarılan maddenin kütle çekim potansiyel enerjisi, gözlenen X-ışın akısının ana kaynağıdır.

1995 yılında NASA tarafından yörüngeye yerleştirilen X-ışını uydusu RXTE'nin (Gruber ve diğ. 1995) görevi 2012 yılında sonlanmış olmasına rağmen 16 yıllık süreçte depoladığı veri hala gözlemsel X-ışını çalışan astrofizikçiler için önemli bir yere sahiptir. Çalışmamızda RXTE uydusuna ait 2-60 keV

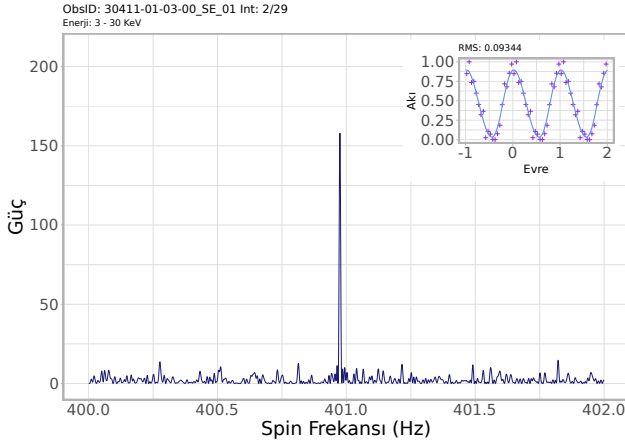
enerji aralığına duyarlı ve 256 enerji kanalına sahip olan PCA dedektörü (García ve diğ. 2014) verisi analiz edilmiştir. PCA dedektörünün en hassas enerji aralığı 3-30 keV'dir. Ayrıca incelediğimiz kaynakların da yumuşak X-ışında daha yağın atmalar göstermesi sebebiyle zaman analizlerinde bu enerji aralığı tercih edilmiştir.

Zaman analizi için uyguladığımız ilk metod Z^2 testi metodu (Brazier 1994) klasik fourier metoduna nazaran ışık eğrisi oluşturmadan uygulanabilen istatistiksel bir yöntem olması sebebiyle özellikle milisaniye mertebesinde spin dönemlerine sahip olan kaynaklar için daha verimli çalışmaktadır.

Z^2 metodunun yanı sıra yine çok düşük dönme frekanslarını tespit etmede çalışan maksimum olabilirlik çıkarımı yöntemini milisaniye X-ışını pulsarına uyguladık. Maksimum olabilirlik çıkarımı yöntemi Z^2 yöntemine göre daha duyarlı olsa da yöntemin handikabı olasılık fonksiyonu olarak kullanmak adına bir atma profiline ihtiyaç duymasıdır. Matematiksel sistematiğini aşağıda anlattığımız maksimum olabilirlik çıkarımı yöntemi ile verilen şablon atma profiline uygun değişimin olup olmadığı ve eğer uygun bir değişim varsa gelen foton paketi içerisindeki en olası faz kayma miktarı tespit edilebilmektedir.

Ayrıca, aynı Yer'in Güneş etrafındaki dolanımından kaynaklanan zaman farklılığı olması gibi X-ışını çiftlerinin

* mustafaturansaglam@ogr.iu.edu.tr



Şekil 1. SAX J1808.4-3658 kaynağına ait örnek bir gözlem (ObsID: 30411-01-03-00) verisinin ikinci 128 s zaman kesitinden elde edilen güç spektrumu (ana panel) ve en güçlü frekans değeri kullanılarak oluşturulan minimum ve maksimum akı değerlerine normalize edilmiş atma profili (sağ üst panel).

yörüngelerindeki hareketleri de fotonun ulaşma zamanında değişimlere sebep olmaktadır. Yörünge parametreleri bilindiği takdirde bu etki ortadan kaldırılabilir. Ancak çalışmamızda, maksimum olabilirlik çıkarımı yönteminin sonucu olarak bu etkiyi tespit etmeyi amaçladığımız için öncelikle yörünge düzeltmesi uygulanmamış yörünge dönemi zaman analizi çıktısı olarak tarafımızca tespit edilmiştir. En olası faz kaymalarının zaman evrimi kullanılarak Period04 (Lenz & Breger 2005) programı ile yörünge sistemlerinin yörünge dönemleri duyarlı bir şekilde tespit edilmiştir.

Son olarak literatürde oldukça çalışılmış bir kaynak olan SAX J1808.4-3658 için kullandığımız tekniklerin testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar hem Z^2 ve maksimum olabilirlik çıkarımı yöntemi kendi içerisinde hem de literatürdekilerle karşılaştırılmıştır.

2 RXTE Gözlemleri ve Veri Analizi

Örneğimizdeki 5 AMXP kaynağına ait tüm RXTE verisi HEASARC (Richmond & White 1994; HEASARC 2016) NASA tarafından koordine edilen veri tabanından "Archive Downloader" (Güngör ve diğ. 2022) programı ile veri yapısı korunarak, yerel sunucuya kopyalanmış ve veri analizi için hazır hale getirilmiştir. İlk olarak HEASOFT programının FXBARY alt programı ile ham veri içerisindeki zaman bilgisine "Güneş merkezine indirgeme işlemi" uygulanmıştır. Bu düzeltme sayesinde gözlem veri dosyalarına BARYTIME kolonu eklenmiş ve tüm zaman analizleri bu kolon üzerinden gerçekleştirilmiştir.

2.1 Z^2 Testi Methodu

RXTE/PCA ham verisinde bulunan her fotona ait ulaşma zamanı ve kanal bilgisi kullanılarak dedektörün en duyarlı olduğu 3.0-30.0 keV aralığında analizlerimizi gerçekleştirdik. Zaman analizi için kullandığımız ilk metod olan Z^2 metodu, Z^2 hesaplanan güç değeri; N , toplam foton sayısı, Φ ; fotonların ulaşma zamanlarının fazı; k , Φ 'nin kaçınıcı dereceden

çözümünün yapıldığı olmak üzere,

$$Z^2 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^N \cos k\Phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N \sin k\Phi_j \right)^2 \right] \quad (1)$$

fonksiyonu kullanılarak belirli bir spin frekansına ait güç değerinin hesaplanması temeline dayanır. Bu 5 farklı kaynağa ait dönme frekansları literatürde bulunmaktadır. Her bir kaynak için bunu merkezi frekans olarak kullanarak ± 1 Hz aralıklarında 10^{-4} Hz adımlarla Z^2 güç değerleri elde edilmiş ve her bir kaynağa ait güç spektrumları oluşturulmuştur. Bu sayede onbinde bir çözünürlükte frekans değişimleri tespit edilebilmektedir.

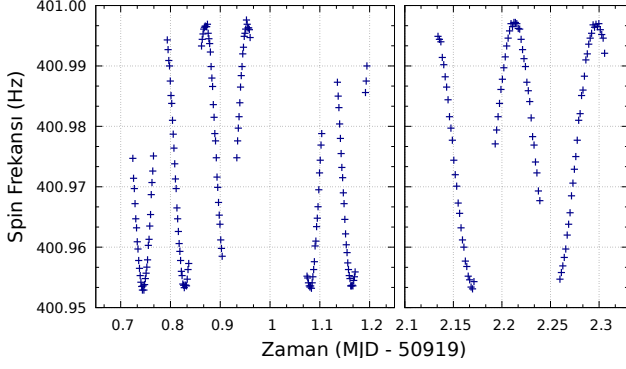
Her bir gözlem verisi 128 s'lik eşit zaman kesitleri ayrılarak, bu zaman kesitine ait Z^2 güç değerleri yani güç spektrumu elde edilmiş ve en güçlü spin frekansı tespit edilmiştir. Poz sürelerindeki, 128 s'nin tam katı olmayan kısım, gözlem başı ve sonundan eşit miktarda kesilerek, bu dönemdeki düzensizliklerden kaçınılmaya çalışılmıştır. Her bir 128 s'lik zaman kesitinde elde edilen dönme frekansına ait atma profilleri yumuşatılarak ortalama karekök (RMS, root-mean-square) değerleri tespit edilmiş ve bu sayede elde edilen atma profillerinin kalitesi sistematik bir şekilde ortaya konmaya çalışılmıştır. Şekil 1'de SAX J1808.4-3658 kaynağının örnek bir gözlemine (ObsID: 30411-01-03-00) ait güç spektrumu, en güçlü frekanstan elde edilen atma profili ile birlikte verilmektedir.

Örneğimizdeki AMXP kaynaklarına ait yörünge dönemleri, en güçlü frekans değerlerinin zaman evriminden elde edilebilir. Şekil 2'de SAX J1808.4-3658 kaynağına ait 3 farklı gözlem verisi (ObsID: 30411-01-03-00, 30411-01-04-00 ve 30411-01-05-00) üzerinde 128 s'lik zaman aralıklarında gerçekleştirilen Z^2 test sonuçlarından, maksimum güç değerine sahip olan frekansların zaman içerisindeki değişimi gösterilmiştir. Bu değişimin dönemini Period04 programı (Lenz & Breger 2005) ile "Hızlı Fourier Dönüşümü" (Fast Fourier Transform – FFT) kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 3'de Period04 programı ile elde edilen güç spektrumu gösterilmektedir. Bu sayede milisaniye mertebesinde Z^2 zaman analizi yöntemi kullanılarak elde edilen spin frekanslarının zaman evriminden sisteme ait yörünge dönemlerine ulaşılmıştır.

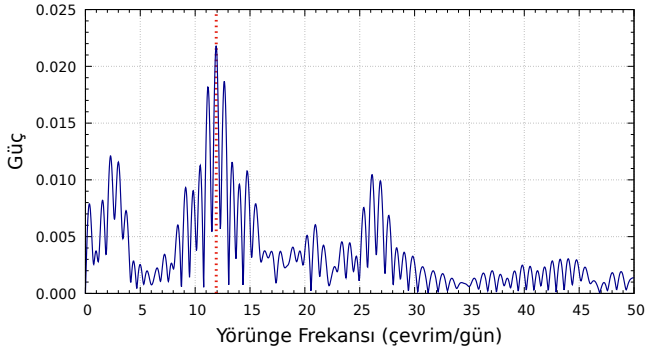
2.2 Maksimum Olabilirlik Çıkarımı

Maksimum olabilirlik çıkarımı, Z^2 tekniği ile edilen atma frekansı bilgisi, bir başlangıç zamanı ve atma profili kullanılarak, atma profiline benzer bir değişimin varlığındaki en olası faz kaymasının tespit edilmesine olanak sağlar. Yöntemin uygulanabilmesi için öncelikle atma profili elde edilmeli ve atma profilinin altında kalan alan bire eşit olacak şekilde kalibre edilerek atma profilinin olasılık fonksiyonu olarak kullanılması sağlanmalıdır. Denklem 2'deki $P(\Phi)$, atma profilinden elde edilen olasılık fonksiyonunu göstermektedir. Yöntemde öncelikle her bir zaman bilgisi (T_i) en uygun başlangıç zamanı (T_0) ve dönme frekansı (ν) kullanılarak evre değerleri elde edilmelidir (Φ_i). İncelenen bölgede varsayılan bir faz kayması (Φ_{off}) için gözlem kesitindeki tüm Φ_i değerleri kullanılarak

$$Prob(\Phi_{\text{off}}) = \prod_{i=1}^N P(\Phi_i - \Phi_{\text{off}}) \quad (2)$$



Şekil 2. SAX J1808.4-3658 kaynağının spin frekansının zaman evrimi.

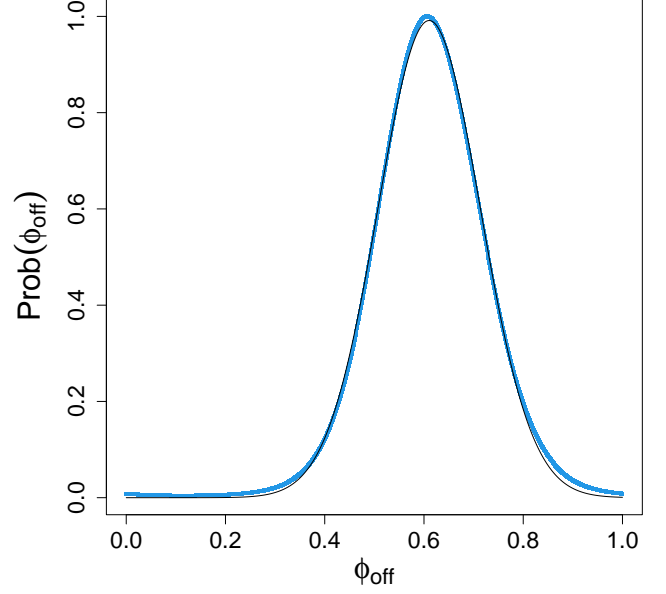


Şekil 3. SAX J1808.4-3658 kaynağının frekans zaman evriminden elde edilen güç spektrumu. Kırmızı düşey çizgi ile gösterilen en güçlü frekans değeri tespit edilen yörünge dönemini işaret etmektedir.

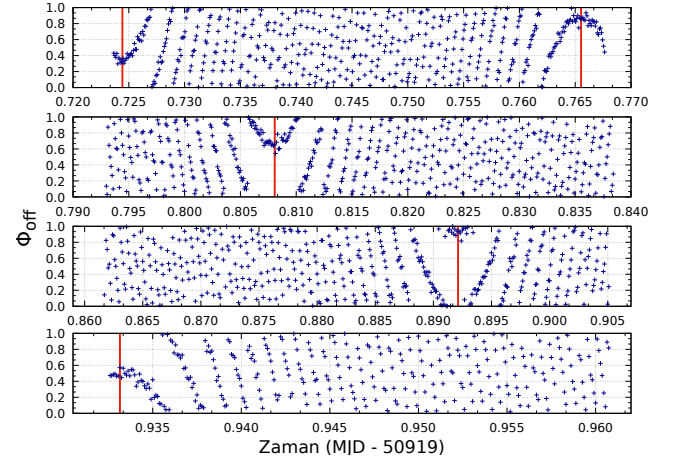
yardımıyla bir olasılık tespit edilir. Z^2 yöntemi ile atma profilinin elde edildiği, dolayısıyla T_0 ve ν değerlerinin belirlendiği zaman kesiti dışındaki kesitlerde maksimum olasılık çıkarımı yöntemi kullanılarak en olası faz kaymaları tespit edilir. Şekil 4'de SAX J1808.4-3658 kaynağına ait 30411-01-03-00 ObsID numaralı gözlem verisine ait 8 saniyelik bir zaman aralığının faz kayması değerlerinin olasılık dağılımı gösterilmektedir. Burada x eksenine Denklem 2'de Φ_{off} olarak verilen girdi faz kayması değerlerini ve y eksenine bu faz kaymalarına karşılık gelen olasılıkları göstermektedir. Şekle göre verilen zaman kesitindeki en olası faz kayması ~ 5.5 civarındadır. Gauss eğrisinin yarı yükseklikteki tam genişlik değeri (FWHM, full width at half maximum) elde edilen en olası faz kayması değerinin hatasını vermektedir.

Yöntem SAX J1808.4-3658 kaynağının RXTE gözlemlerine, her bir gözlem seti 8 s'lik zaman kesitlerine ayrılarak uygulanmış ve bu 8 s'lik kesit için en olası faz kayması değerleri tespit edilmiştir. Uygulanan zaman kesitinin 8 s gibi kısa bir süre olması maksimum olasılık çıkarımı yönteminin ne derece hassas çalışabildiğini göstermek adına bir kanıt oluşturmaktadır. Ancak bir girdi atma profiline ihtiyaç duyması yöntemin handikabıdır.

Atmanın kaynağı olan nötron yıldızının LMXB sistemi içerisinde, bileşen yıldız ile oluşturduğu ortak kütle merkezi etrafındaki dolanma hareketi kaynaktan gelen faz kaymalarının dönemsel bir biçimde değişimine neden olur. Dolayısıyla, elde edilen en olası faz kayması değerlerinin zaman içerisindeki evrimi kullanılarak sistemin yörünge döneminin hassas bir



Şekil 4. SAX J1808.4-3658 kaynağına ait örnek bir gözlem (ObsID: 30411-01-03-00) verisine ait ilk 8 s zaman kesitinden elde edilen faz kayması olasılık dağılımı.



Şekil 5. SAX J1808.4-3658 kaynağına ait 30411-01-03-00 ObsID'li gözlem verisi üzerine 8 s'lik zaman kesitlerindeki en olası faz kayması değerlerinin zaman evrimi. Kırmızı dik çizgiler uçdeğer noktalarını göstermektedir.

şekilde belirlenmesini sağlar. Şekil 5, arka arkaya 3 ObsID için 8 s zaman kesitlerinden elde edilen en olası fazların zaman içerisindeki evrimini göstermektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi bazı bölgelerde dönüm noktaları oluşturmaktadır. Bu dönüm noktaları PERANSO (Husar 2006) programı yardımıyla hassas bir şekilde belirlenmiştir. Sonuç olarak aynı türden dönüm noktaları arasındaki zaman farkı bize kaynağına ait yörünge dönemi bilgisini vermektedir.

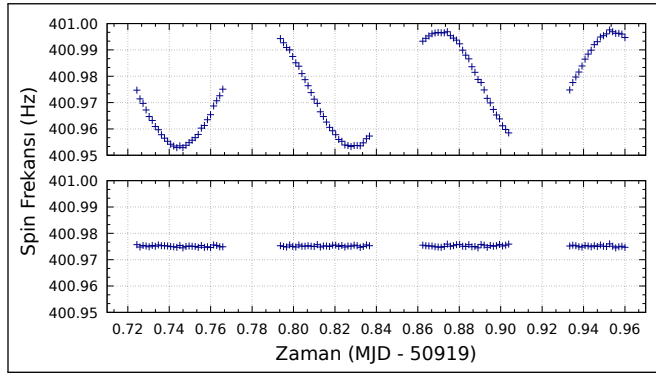
2.3 Yörünge Döneminin Belirlenmesi ve Yörünge Düzeltmesi

Gözlemlerden Yer'in yörünge etkisinin arındırılabilmesi için uygulanan Güneş merkezine indirgeme işlemi HEASOFT

Çizelge 1. Zaman analizi yapılan kaynaklara ait sonuçlar.

Kaynak	Veri Sayısı (RXTE)	Literatür Frekansları (Hz)	Minimum Frekans (Hz)	Maksimum Frekans (Hz)	Ortalama Atma Frekansı (Hz)	Yörünge Dönemi (saat)
SAX J1808.4-3658	764	401 ¹	400.9521	400.9985	400.9765±0.0227	2.0136±0.0027
IGR J1749.8-2921	167	401 ²	400.9221	401.0574	400.9946±0.0445	3.8474±0.0183
XTE J1751-305	298	435 ³	435.3058	435.3302	435.3185±0.0331	0.7071±0.0029
XTE J1807-294	217	190 ⁴	190.6193	190.6274	190.6235±0.0017	0.6679±0.0002
XTE J1814-338	169	314 ⁵	314.3051	314.4074	314.3568±0.0361	4.2748±0.0062

¹Marshall ve diğ. (1998); ²Papitto ve diğ. (2011); ³Markwardt (2001); ⁴Markwardt ve diğ. (2003); ⁵Markwardt & Swank (2003)



Şekil 6. SAX J1808.4-3658 SAX J1808.4-3658 kaynağına ait 30411-01-03-00 ObsID'li gözlem verisinin zaman içindeki frekans değişimi (üstte) ve yörünge düzeltmesi işleminin ardından yapılan zaman analizi sonrası frekans değişimi grafiği (altta).

bünyesinde bulunan FXBARY alt programı ile gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde ikili sistemin yörünge hareketi kaynaklı zaman gecikmeleri t_d , gecikme zamanı A , yarı-büyük eksenin izdüşümü; P_{orb} , yörünge dönemi; t_{em} , fotonun ulaşma zamanı ve T^* ise nötron yıldızının çıkış düğümünden geçme zamanı olmak üzere

$$t_d = A \sin\left(\frac{2\pi}{P_{orb}}(t_{em} - T^*)\right) \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Örnek olarak kullandığımız SAX J1808.4-3658 kaynağını literatürden toplanan yörünge parametreleri ile yörünge düzeltmesi uygulamadan önce ve sonraki tespit edilen spin frekansı Şekil 6'de gösterilmektedir. Yörünge düzeltmesi için gerekli olan yörünge dönemi düzeltme yapılmadan önce elde edilen spin frekansı zaman evriminden elde edilmiş ve yörünge düzeltmesi için kullanılmıştır. Denklem 3'de gerekli olan diğer tüm parametreler Hartman ve diğ. (2008)'den alınmıştır.

3 Sonuçlar ve Tartışma

Yaptığımız bu çalışmada iki farklı zaman analizi yöntemini 5 farklı milisaniye X-ışını pulsarı için denedik. Sonuçlarımız 1'de gösterilmiştir. Analizler sonucunda elde ettiğimiz verilerin, literatürde daha önceden tespit edilmiş değerlerle tamamen tutarlı olduğunu tespit ettik. Z^2 yöntemi özellikle milisaniye mertebesindeki zaman analizi hesaplamaları için çok daha kullanışlı olmaktadır. Z^2 yönteminin yetersiz olduğu bazı durumlarda kullandığımız istatistiksel bir yaklaşım olan maksimum olasılık çıkarımı, özellikle daha kısa zaman aralıklarında çalışabilmesi sebebiyle az sayıda foton içeren

gözlem kesitlerine ya da hızlı değişim gösteren kaynaklarda kısa zaman aralıklarına uygulanabilir. Z^2 yönteminde herhangi bir girdi frekansına ya da başka bir girdi parametresine ihtiyaç duyulmazken maksimum olasılık çıkarımı yönteminin çalışabilmesi için atma modelinin (ya da herhangi bir sistematik değişim) önceden tespit edilmiş olması gerekir.

Teşekkür

Deđerli çalışmalarından dolayı UAK2022 ekibine ve Türk Astronomi Derneđine teşekkür ederiz. Katkılarından dolayı hakemlere minnettarlığımızı sunarız. Bu çalışma TÜBİTAK, 120F094 numaralı "Düşük Kütleli X-ışın Çiftlerinde Olası Atmaların Maksimum Olasılık Çıkarımı Kullanılarak Araştırılması" isimli projenin bir parçasıdır. Destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz. Bu çalışma Bilim Akademisi Genç Bilim İnsanları Ödül Programı (BAGEP) ile desteklenmiştir. CG, desteklerinden dolayı Bilim Akademisine teşekkür eder.

Kaynaklar

- Brazier K. T. S., 1994, *MNRAS*, 268, 709
 García J. A., McClintock J. E., Steiner J. F., Remillard R. A., Grinberg V., 2014, *ApJ*, 794, 73
 Gruber D. E., MacDonald D., Rothschild R. E., Boldt E., Mushotzky R. F., Fabian A. C., 1995, Granularity of the Diffuse Background Observed, NASA STI/Recon Technical Report N
 Güngör C., Duran H. M., Sađlam M. T., 2022, Veri Bilimi, 5, 45
 HEASARC 2016, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov>
 Hartman J. M., ve diğ., 2008, *ApJ*, 675, 1468
 Husar D., 2006, BAV Rundbrief - Mitteilungsblatt der Berliner Arbeits-gemeinschaft fuer Veraenderliche Sterne, 55, 32, *ADS*
 Lenz P., Breger M., 2005, *Communications in Asteroseismology*, 146, 53
 Markwardt C., 2001, Observations of the Newly Discovered Millisecond Accreting Pulsar XTE J1751-305, Chandra Proposal ID 03408093
 Markwardt C. B., Swank J. H., 2003, *IAU Circ.*, 8144, 1, *ADS*
 Markwardt C. B., Smith E., Swank J. H., 2003, *IAU Circ.*, 8080, 2, *ADS*
 Marshall F. E., Wijnands R., van der Klis M., 1998, *IAU Circ.*, 6876, 1, *ADS*
 Papitto A., Ferrigno C., Bozzo E., Gibaud L., Burderi L., di Salvo T., Riggio A., 2011, *The Astronomer's Telegram*, 3556, 1, *ADS*
 Richmond A., White N., 1994, in *Bulletin of the American Astronomical*

Access:

M23-0378: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.