



# **Nötron Yıldızı İç Yapı Dinamiğinin Gözlemsel Olaylara Etkisi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 117F330**

Proje Yürütücüsü:  
**Prof. Dr. Mehmet Ali ALPAR**

Bursiyer(ler):

Dr. Erbil GÜGERCİNOĞLU

Dr. Onur AKBAL (1 Eylül 2020 Tarihine Kadar)

TEMMUZ 2021  
İSTANBUL



## ÖNSÖZ

117F330 numaralı TÜBİTAK 1001 projemizde nötron yıldızlarının içyapı dinamiğinin gözlemsel olaylara etkisini araştırdık. Bu bağlamda, nötron yıldızlarının patlama aktivitesini, anormal frenleme indisi ölçümlerini, manyetarların zamanla değişen dış torklar tesiri altında düzensiz yavaşlama davranışlarını, pulsar sıçramalarını ve manyetik alan evrimini nötron yıldızı kabuğunun, iç kabuk ve iç bölge süperakışkanlarının katkılarını göz önüne alacak şekilde değerlendirdik. Yaptığımız analizler neticesinde kırılan kabuk parçasının büyüklüğü, sıçramalara katılan süperakışkan katmanlarının eylemsizlik momentleri, kuplaj zaman ölçekleri gibi yıldız yapısına dair önemli bilgiler elde ettik. Manyetarların manyetik alan bozunması ile süperakışkan kuplajı tesiri altında düzensiz yavaşlamasını tasvir eden denklemler takımını elde ettik. Sıklıkla sıçrama geçiren kaynaklar için sıçramaların katkılarından arındırılmış saf dış tork yavaşlamasının vereceği frenleme indisinin bulunması için bir yöntem geliştirdik. İç bölgede süperakışkan vorteks çizgileri ile manyetik akı tüpleri arasındaki takılma etkileşmesinin nötron yıldızlarının manyetik alan evrimindeki rolünü araştırdık. Uzun dönem pulsar yavaşlama davranışındaki düzensizliklerin kaynağı olarak lineer olmayan rejimdeki süperakışkan temelli kaos olasılığını tartıştık.



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	7
4. BULGULAR.....	9
5. TARTIŞMA.....	13
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	15
KAYNAKLAR.....	16



## TABLO VE ŞEKİL LİSTELERİ



## ÖZET

Bu projede nötron yıldızı içyapı dinamiğinin çeşitli gözlemsel olaylara etkisini araştırdık. Sıklıkla sıçrama yapan pulsarların sahici frenleme indisini bulmak için bir yöntem geliştirdik ve bunu PSR J0537-6910 kaynağına uygulayarak  $n = 2.7(4)$  değerini elde ettik. Bazı pulsarların sıçramalarına vorteks sızma modeli çerçevesinde eğri uydurması gerçekleştirdik ve yıldız yapısına dair parametrelerin çıkarımlarını yaptık. Süperakışkan vorteks çizgileri ile manyetik akı tüpleri arasındaki mikroskobik takılma etkileşmesi cinsinden manyetik akının iç bölgeden uzaklaştırılma hızının kestirimini yaptık. Bu hızın dönme oranına düz, manyetik alanın kareköküne ise ters orantılı olduğunu bulduk. Manyetik alan bozunmasıyla süperakışkan kuplajı tesiri altında manyetarların dönme evrimini tarif eden denklemler elde edilmiştir. Lineer olmayan rejimde süperakışkanlık ve sıçrama temelli hiperkaosun uzun dönem pulsar yavaşlama davranışında gözlenen düzensizliklerin izahını verebileceği sonucuna ulaştık. Faz diyagramındaki çevrimlerin sayısı ( $N$ ) ise, göz önüne alınan zaman aralığında pulsarın ( $N+1$ ) sıçrama geçirdiğini bulduk.

**Anahtar Kelimeler: Nötron Yıldızları, Yoğun Madde, Manyetik Alan**



## ABSTRACT

In this project we have investigated the effects of neutron star internal dynamics on various observational phenomena. We developed a method for finding true braking indices of frequently glitching pulsars and applied this to the timing data of PSR J0537-6910 to obtain  $n = 2.7(4)$ . We have made fits to the glitches of some pulsars using the vortex creep model and inferred structural parameters. We estimated the magnetic flux expulsion velocity in terms of the microscopic pinning interaction between the superfluid vortex lines and magnetic flux tubes which depends linearly on the rotation rate and inversely on the square root of the magnetic field itself. The equations describing the magnetar rotational evolution under magnetic field decay with superfluid coupling were obtained. We concluded that nonlinear superfluidity and glitch based hyperchaos can account for the irregularities observed in the long-term pulsar spin-down behaviour. Pulsar dynamics with glitches was investigated in terms of the chaotic behaviour. We found that the number  $N$  of cycles in the phase portrait are as a result of  $(N+1)$  glitches undergone by the pulsar during the considered timespan.

**Keywords: Neutron Stars, Dense Matter, Magnetic Field**



## 1. GİRİŞ

Nötron yıldızları çeşitli dalga boylarında sergiledikleri oldukça zengin ve birbirinden farklı gözlemsel olaylar ile Dünya'daki laboratuarlarda ulaşılamayacak şartlarda, yani çok yoğun, çok sıcak fakat etkin olarak sıfır sıcaklıkta, kuvvetli manyetik alan ortamındaki maddenin doğası hakkında disiplinler arası araştırmalara fırsat tanımaktadır. Bu heyecan dolu araştırma alanında yeni bilgilere ulaşmak amacıyla süperakışkanlık ve kabuk fiziği hakkında bilgilerimizi uygulayabileceğimiz ve nötron yıldızı yapısı hakkında çıkarımlar elde edebileceğimiz çeşitli gözlemsel olayları projemiz çerçevesinde ele aldık.

Bu bağlamda kabuk kırılması ile nötron yıldızlarının patlama aktivitesi arasındaki ilişkiyi 1E 1207.4–5209 kaynağı çerçevesinde inceledik.

Çok sık sızrama yapan PSR J0537-6910'nin uzun dönemde negatif olarak ölçülen frenleme indisinden sızramaların kalıcı etkilerini arındırarak kaynağın salt dış tork altında sahici yavaşlama davranışını tespit ettik. Geliştirdiğimiz yöntem, başka sıklıkla sızrama yapan pulsarların gerçek yavaşlama davranışının bulunmasını sağlayacak özgün niteliktedir.

Manyetarların düzensiz yavaşlama davranışını, nötron yıldızının kabuğunda çeşitli fiziksel süreçler neticesinde manyetik alanın bozunmasından ileri gelen zamanla değişen dış tork ile süperakışkandan kabuğa sürekli açısal momentum transferine yol açan iç tork katkılarının bileşke etkilerini göz önünde bulundurarak değerlendirdik.

İç bölgede süperakışkan vorteks çizgileri ile manyetik akı tüpleri arasındaki mikroskobik etkileşmelerin manyetik akının söz konusu bölgeden uzaklaştırılması ve manyetik alanın bozunmasındaki rolü incelenmiştir.

Farklı pulsarların gözlemlerinden elde edilen zamanlama verilerine vorteks sızma modeli çerçevesinde eğri uydurması yapılarak model parametreleri belirlenmiştir. Bu bağlamda Yengeç, Vela, PSR J1023-5746, PSR J2111+4606 ve PSR J2229+6114 pulsarlarının birkaç sızramasının doğrudan gözlem verisi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve model parametrelerinin bulunması neticesinde nötron yıldızının iç yapısı hakkında kısıtlamalar getirilmiştir.

Nötron yıldızlarının uzun dönemde yavaşlama davranışlarında gözlenen çeşitli şekillerdeki düzensizliklerin kaynağı olarak nötron yıldızlarının lineer olmayan rejimdeki iç kabuk süperakışkanının tekrarlamalı sızramalarının sebebiyet vereceği kaotik davranış olasılığı tartışılmıştır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Süpernova kalıntıları merkezindeki tıkHz cisimler (Central Compact Object-CCO) düşük manyetik alana sahip, yüzeyden termal ışınımı alınan nötron yıldızı türüdür (De Luca 2017). Bu kaynaklardan radyo ışınımının alınamaması, manyetik alanlarının yüzeylerinden yüklü parçacıkların sökülüp manyetosferde ivmelendirilemeyecek kadar küçük olmasıyla ya da manyetik dipol ve dönme eksenleri arasındaki açının bakış açımızla kesişmeyecek kadar küçük olmasıyla açıklanabilir. 1E 1207.4-5209 kaynağı 2000 yılında PKS 1209-51/52 süpernovasının içinde keşfedilmiştir. Periyodu 0.424 s'dir ve nispeten düşük yavaşlama oranı dipol formülü ile görece zayıf bir manyetik alana,  $B \cong 9.8 \times 10^{10}$  G işaret etmektedir. Bu ise kaynağın termal spektrumundaki absorpsiyon çizgilerinden görülen düzenli olarak ayrılmış tayfsal özelliklerin  $E_0 = 0.7$  keV'deki elektron temel siklotron çizgisinin harmoniklerinden ileri gelmesi durumunda elde edilen  $B \approx 8 \times 10^{10}$  G değerine oldukça yakındır. Zamanlama gözlemlerine bakacak olursak, 2015 öncesindeki 14 yıllık veri tek türlü bir çözüm ile öngörülelebilmektedir (Halpern ve Gotthelf 2015). 20 Haziran 2014 ile 28 Temmuz 2016 tarihleri arasında kaynağın gözlem verisi bulunmamaktadır. Gotthelf ve Halpern (2018), 22 Haziran 2017 ile 27 Ağustos 2018 tarihleri arasında 7 tanesi XMM Newton, 2 tanesi de Chandra uydusundan olmak üzere söz konusu veri noktaları ile gözlem boşluğundan sonraki zamanlama çözümünü elde ediyorlar. Mevcut tüm veri noktaları arasında faz sürekliliğinin sağlanması için 1E 1207.4-5209'nin 2016 yılından önce, muhtemelen 30 Eylül 2015 civarında en az  $\Delta v/v = (2.8 \pm 0.4) \times 10^{-9}$  büyüklüğünde bir sıçrama yapmış olması gerektiği sonucuna ulaşıyorlar. Bu, genç pulsarlardan gözlenen tipik bir sıçrama büyüklüğüdür. Ancak, yavaşlama oranındaki değişim alışılmadık ölçüde büyük ve  $\Delta \dot{v}/\dot{v} = 1.27 \pm 0.25$  kadardır. Bu ise yalnızca nötron yıldızı içyapı dinamiği ile anlaşılacak bir değerdir. Termal spektrumunda görülen siklotron absorpsiyon çizgileri yüzey manyetik alanının sıçramadan sonra ayırtına varılabilir bir değişikliğe uğramadığını, ~%2 hata payı ile sabit kaldığını göstermiştir. Bu ise kaynak üzerine etki eden dış torakta herhangi bir zamansal değişiklik yaşanmış olsa da hâlihazırda bu değişikliklerin kaybolduğu anlamını taşımaktadır. Kara cisim sıcaklığı ise ~%0.5 seviyesinde değişmemiş kalmıştır. Bu da deprem vb. bir olay neticesinde yerel olarak ortaya çıkmış ısıtma kaynakları neticesinde sıcaklık artışının tüm yüzeye yayılıp durağan denge durumuna geldiğine işaret eder. Proje iş paketi 2. adımı ile bağlantılı olarak 1E 1207.4–5209 kaynağının bu ilginç zamanlama gözlemini göz önüne aldık.

PSR J0537-6910 Büyük Magellan Bulutsusunda 1998 yılında keşfedilmiştir (Marshall vd. 1998). İzole nötron yıldızları arasında en hızlı dönenidir ve Yengeç pulsarından sonra en yüksek yavaşlama oranına sahip kaynaktır. Radyo ışınımı olmayan PSR J0537-6910, Rossi X-ışın zamanlama kâşifi (Rossi X-ray Timing Explorer-RXTE) uydusu tarafından uydunun görevine son verildiği 2012 yılına kadar sürekli biçimde gözlenmiştir. Bu kaynağı ilginç kılan



iki önemli özelliği bulunmaktadır. Birincisi, yılda 3.2'lik bir değerle en yüksek sıçrama yapma oranına sahip pulsardır. Tüm RXTE uydusu gözlemlerinden 45 sıçraması tespit edilmiştir (Antonopoulou vd. 2018, Ferdman vd. 2018). İkinci özellik ise uzun dönemde yavaşlama oranının artma eğiliminde olmasıdır ki yüzeysel bir yaklaşım negatif bir frenleme indisi ölçümüne,  $n = -1.25$  yol açar. PSR J0537-6910 frenleme indisi ölçülebilmüş tüm pulsarlar arasında tek negatif değere sahip olan kaynaktır. PSR J0537-6910'nin 2017-2020 tarihleri arasında nötron yıldızı içyapı bileşimi kâşifi (Neutron star Interior Composition ExploreR-NICER) uydusu ile yapılan gözlemlerinden 11 yeni sıçraması daha kaydedilmiştir ve negatif frenleme indisine sahipmiş gibi görünme özelliğinde bir değişiklik yaşanmadığı gözlenmiştir (Ho vd. 2020, Abbott vd. 2021). Proje iş paketi 3. adımı ile bağlantılı olarak PSR J0537-6910 kaynağının anormal frenleme indisini ve sıçramalar ile olan ilişkisini ele aldık.

Manyetarlar  $P \sim 1 - 10$  s'lik uzun periyotları ve yüksek yavaşlama oranları ile periyot-periyot türevi diyagramında izole nötron yıldızlarından ayrılırlar. Düzenli radyo ışınımı yapmamaları, izole kaynak olmalarına rağmen çok yüksek X-ışın ışıma gücüne sahip olmaları ve patlama aktivitesi göstermeleri ayırt edici özellikleridir. Öyle ki X-ışın ışıma güçleri dönme enerjilerinin sağlayabileceğinden bir hayli yüksektir ve  $B \sim 10^{15}$  G'luk kuvvetli manyetik alanlarının bozunmasının hem X-ışın ışıma gücünün hem de kabuk kırılması ile manyetik alan çizgilerinin burulması gibi fiziksel süreçler ile patlama aktivitesinin kaynağı olduğu önerilmiştir (Thompson ve Duncan 1996). Manyetarların sıçramalarına da bu patlamalar eşlik edebilmektedir ve sıçrama öncesi ile sonrası farklı zamanlama çözümleri ile betimlenebilmektedir (Kaspi ve Beloborodov 2017). Manyetarların bu düzensiz yavaşlama davranışı projemizin iş paketi 4. adımı çerçevesinde incelenmiştir.

Nötron yıldızlarının manyetik alan evrimi, kabuk ve iç bölgelerinde cereyan eden çeşitli fiziksel süreçler neticesinde gerçekleşir (Goldreich ve Reisenegger 1992). Kabukta manyetik alanın kaynağı olan akımların Ohm difüzyonuna uğraması manyetik enerjinin sarfiyatı için başlıca mekanizmadır. Igoshev (2019) süpernova kalıntılarının yaşları ile bu süpernovalar içerisinde yer alan nötron yıldızlarının periyotlarının periyot türevlerine oranlanmasından elde edilen karakteristik yaşlarını karşılaştırarak manyetik alanın Ohm difüzyonu neticesinde bozunması durumunda bozunmanın zaman ölçeğinin  $8 \times 10^6$  yıldan daha az olamayacağı sonucuna ulaşmıştır. Kabukta elektronların iyonlara karşı yanal hareketi olan Hall sürüklenmesi manyetik alanı küçük ölçeklere dağıtır fakat enerji sarfiyatına yol açmadığından dolayı manyetik alanda bozunmaya neden olmaz. İç bölgede ise Lorentz kuvveti tesiri altındaki elektron-proton plazması yüksüz nötronlara göre hareket hâlinindedir ve ambipolar difüzyon denilen bu süreç neticesinde iç bölge manyetik alanı  $\leq 10^9$  yıl içerisinde bozunur. Çift sistemlerden evrimleştikleri bilinen milisaniye pulsarları  $\geq 10^9$  yıl yaşlarına rağmen hâlâ  $\sim 10^9$  G'luk manyetik alanlara sahiptirler (Bhattacharya ve van den Heuvel

1991). Bu da evrimleri boyunca nötron yıldızlarının manyetik alanlarının bozunabileceği ama önemli bir miktar artık manyetik alanın da geriye kalacağı anlamına gelir. Nötron yıldızlarının iç bölgesinin bir tip II süperiletkeni olması beklenir ve bu durumda manyetik alan akı tüpleri içerisinde kuvantize olur (Baym vd. 1969). Süperakışkan-süperiletken iç bölgenin oldukça yüksek elektrik iletkenliğinden ötürü üzerine bir kuvvet etki etmemesi durumunda akı tüpleri nötron yıldızı eylemsizlik sistemine göre tüm evrim boyunca neredeyse hareketsiz kalır. Easson ve Pethick (1977) akı tüpleri üzerine etki eden hacimsel kuvveti hesap etmek üzere Maxwell gerilim tansörünün süperiletkenlik durumundaki eşdeğerinin diverjansını almıştır. Bu hacimsel kuvvet ifadesini Boltzmann çarpışma integralinde kullanarak ve elektronların çarpışma durulma referans çerçevesini akı tüpleri olarak Jones (2006) akı tüplerinin iç bölgeden kaçış hızını hesaplamıştır. Bulduğu kaçış hızı yüksektir ve iç bölge manyetik akısının  $\sim 10^6$  yılda bozunacağına işaret etmektedir. Bu da yaşlı nötron yıldızlarının manyetik alana sahip olması gerçeğiyle çelişmektedir. Srinivasan vd. (1990) ise spin yavaşlaması esnasında kabuğun dönme hızını takip edebilmek için alan yoğunluğunu azaltacak biçimde radyal olarak dışarı doğru açılması gereken vorteks çizgilerinin denk geldikleri manyetik akı tüplerine yapışarak beraberinde sürükleyeceğini önermişlerdir. Bu süreç ile manyetik alanın bozunmasının zaman ölçeği nötron yıldızının karakteristik yaşı mertebesinde dir. Ancak, akı tüplerine yapışık durumda ya da serbest olsun vorteks çizgilerinin aynı hızla hareket ediyor olması önerilen modelin eksikliğini teşkil etmektedir. Proje iş paketi 5. adım ile bağlantılı olarak vorteks çizgisi-akı tüpü takılmasının daha gerçekçi bir etkileşmesini göz önüne alarak iç bölgeden manyetik akının uzaklaştırılması hızı elde edilmiştir.

Yengeç pulsarı düzensiz aralıklar ile görece küçük sıçramalar,  $\Delta v/v \leq 10^{-8}$ , yapan genç bir pulsardır. Uzun süreli bir pasif dönemin ardından Yengeç pulsarı 8 Kasım 2017 tarihinde  $\Delta v/v = 0.516 \times 10^{-6}$  ve  $\Delta \dot{v}/\dot{v} = 6.969 \times 10^{-3}$  ile en büyük sıçramasını yapmıştır (Shaw vd. 2018, Zhang vd. 2018). Bu sıçramanın bir başka ilgi çekici özelliği hem dönme oranındaki hem de yavaşlama oranındaki artışın maksimum büyüklüğüne 2 günlük bir zaman ölçeği sonrasında ulaşmasıdır. Daha önce 1989 (Lyne vd. 1992) ve 1996 (Wong vd. 2001) sıçramalarında da benzer bir davranış gözlenirse de 2017 sıçraması söz konusu olgunun en iyi çözünürlükle elde edilebildiği durumdur. Sıçrama sonrası uzun dönem sönümü ise iki üssel bozunan bileşen ve yavaşlama oranının lineer biçimde sönmesi ile kalıcı artışlar ile tarif edilmiştir (Zhang vd. 2018). Proje iş paketi 6. adım ile uyumlu olarak Yengeç pulsarının en büyük sıçramasını ve sıçrama sonrası kısa dönem davranışı ile uzun vadeli sönümünü vorteks sızma modeli çerçevesinde ele aldık.

Vela pulsarının 2016 yılında meydana gelen sıçraması, yüksek zamansal ayırma güçlü gözlemi ile verinin Bayes analizinin yapılabilmesine olanak tanınması (Ashton vd. 2019) ve sıçrama anında tek tek puls şekillerinin evrimlerinin incelenebilmesi (Palfreyman vd. 2018)

bakımından önem arz etmektedir. Yapılan bu analizler neticesinde sıçramanın oluşumu, kısa ve uzun dönem sönümlerin ayrıntılı davranışı ve pulsarın elektromanyetik karakteristiğinin sıçrama boyunca değişimi konularında şu önemli gözlem ve çıkarımlar elde edilmiştir:

(i) İlk kez bir pulsarın sıçramasından hemen önce dönme oranında azalma gözlenmiştir.

$$\Delta v_- = 5.40^{+3.39}_{-2.05} \mu\text{Hz}$$
 büyüklüğünde olan bu değişim  $\sim 100$  s kadar sürmüştür.

(ii) Sıçramanın meydana geldiği zaman civarında puls şeklinde genişlemeler, lineer polarizasyonda azalma ve bir puls atım kaybı meydana gelmiştir. Tüm bu değişimler  $\sim 4.4$  s sürmüştür. Sonrasında pulsar eski elektromanyetik davranışına geri dönmüştür.

(iii) Sıçramanın oluşum zamanı için en sıkı limit olan  $t_{\text{hızlanma}} < 12.6$  s kısıtlaması elde edilmiştir.

(iv) Sıçramanın akabinde kabuk dönmesindeki başlangıçtaki artışın tepe değeri

$$\Delta v_{d+} = 17.77^{+13.68}_{-7.99} \mu\text{Hz}, \tau_{d+} = 53.96^{+24.02}_{-14.82} \text{ s}$$
 içerisinde üssel olarak bozunmuştur.

(v) Başlangıç sıçrama tepe değeri söndükten sonra geriye kalan  $\Delta v = 16.01(5) \mu\text{Hz}$  kadarlık kısım zaman ölçekleri 1 ve 6 gün olan iki kısa dönem üssel sönüm yapan bileşen ve sabit  $\Delta \dot{v}$  ile bozunmuştur (Xu vd. 2019).

Vela pulsarının 2016 yılı sıçramasının bu 5 özelliği vorteks sızma modeli çerçevesinde proje iş paketi 6. adımının parçası olarak incelenmiştir.

Sıçrama büyüklükleri ve yaş aralığı bakımından Vela pulsarına benzeyen PSR J1023-5746, PSR J2111+4606 ve PSR J2229+6114 kaynaklarının her biri için 10 yıldan fazla olan FERMI uydusu ile alınmış zamanlama çözümlerinin analizi ve vorteks sızma modeli kullanılarak sıçramalardan itibaren nötron yıldızı içyapısına dair kısıtlamalar yine proje iş paketinin 6. adımı bağlamında gerçekleştirilmiştir.

Sıçramalar haricinde uzun vadede nötron yıldızlarının yavaşlama davranışında çeşitli düzensizlikler ve kararsızlıklar mevcuttur (Hobbs vd. 2010). Lyne vd. (2010) bunu açıklamak üzere iki farklı yavaşlama mekanizması arasında geçiş yapan pulsar manyetosfer yapısı önerisini ortaya atmış ancak iki mekanizmanın ne olduğu ve aralarındaki geçişin hangi zamanlarda aktive olacağı sorularını yanıtsız bırakmıştır. Biryukov vd. (2012) ise manyetik dipol radyasyonu ve bunun üstüne binen hem genliği hem de fazı zamanla değişen sinüzoidal bileşenin gözlenen düzensizlikleri açıklayabileceğini önermiştir. Ancak sinüzoidal bileşenin fiziksel kökeni hakkında tatminkâr bir açıklama getirememişlerdir. Alternatif olarak, nötron yıldızı spin yavaşlama dinamiğindeki Lorenz ve Rössler türü klâsik kaotik çekicilerin bu türden düzensizliklerin altında yatan neden olarak önerilmiştir (Harding vd. 1990, Seymour ve Lorimer 2013). Lyapunov üslerinin sayısından kaosa yol açan dinamiğin nötron yıldızının dönme davranışını idame ettiren en az ikisi birbirine bağlı üç denklem sistemi ile



tarif edileceği sonucuna varmışlardır. Sıçramaların sistemin yavaşlamasında bir kırılmaya yol açması ve orijinal davranışa bir zaman gecikmesinden sonra tekrardan ulaşılması gerçeklerinden hareketle lineer olmayan süperakışkanlık ve sıçrama temelli kaosu pulsarların spin yavaşlama davranışını açıklayabilme olasılığı projemizin iş paketi 6. adımı ile bağlantılı olarak tartışılmıştır.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

1E 1207.4-5209 kaynağının geçirdiği sıçrama ve yavaşlama oranındaki büyük değişimi açıklamak üzere daha önce kabuk kırılmasının vorteks çizgilerinin boşalmasını hangi yolla tetikleyebileceğini, dış torkta nasıl değişimlere yol açabileceğini tartıştığımız ve PSR J1119-6127 yüksek manyetik alanlı pulsarının gözlemlerine uyguladığımız Akbal vd. (2015) çalışmasından yararlandık. Bu bağlamda Akbal vd. (2015) çalışmasındaki (16) ve (17) numaralı denklemler 1E 1207.4-5209 kaynağına uygulanarak yavaşlama oranındaki gözlenen değişimine sebebiyet veren sıçrama ile birlikte nötron yıldızının yapısında meydana gelen yapısal değişiklikler bulunmuştur.

PSR J0537-6910 pulsarının uzun vadede yavaşlama oranında artışa yol açan ve böylelikle de negatif frenleme indisi ölçümü veren etkiler bu kaynağın geçirdiği sık sıçramalar ile ilintili olmalıdır. Sıçramayı takiben yavaşlama oranının türevinde sıçrama öncesindeki duruma göre  $\sim 100$  katlık bir artış yaşandığından frenleme indisi çok yüksek değerlere ulaşır. Vorteks sızma modeli çerçevesinde bu beklenen bir durumdur. Çünkü sıçramaya sebep olan vorteks boşalmasına uğrayan kabuktaki süperakışkan katmanları dış torktan ayrıştığından dolayı dış tork artık daha az eylemsizlik momenti üzerine etki eder. Bu ise yavaşlama oranında vortekslerin boşaldığı bölgenin kesirsel eylemsizlik momenti mertebesinde bir çarpanla artışa ve  $\dot{\nu} = |\Delta\dot{\nu}|/t_g$  şeklinde ivmelenmeye yol açar (Alpar ve Baykal 2006). Süperakışkan iç torkun neden olacağı bu yüksek değer sıçramanın sönümünün tamamlanacağı  $\sim t_g$  zaman sonra kaybolur ve pulsar yine dış tork tesiri altında durağan yavaşlama durumuna geri döner. Bu durum için bir istisna, sıçrama ile birlikte kabukta sürekli açısal momentum transferi sağlayan süperakışkan bölgelerinde deprem vb. bir dış etki ile vorteks akımının kesildiği vorteks tuzaklarının oluşumudur (Alpar vd. 1996). Bu düşünce, her bir büyük Yengeç sıçramasından sonra yavaşlama oranında gözlenen sönüksizin kalan artışları izah etmek için geliştirilmiştir. Biz bu fikri PSR J0537-6910'a uyguladık. PSR J0537-6910 yüksek yavaşlama oranına sahip olması ve yaşının Yengeç'ten çok fazla olmaması benzer özellikleri taşıyabileceğini düşündürmektedir. Yani, yavaşlama oranı yüksek olduğundan  $t_g$ 'si kısa ve frenleme indisine sıçrama kaynaklı süperakışkan iç tork katkıları  $\sim 120$  günlük süreçte tamamlanmaktadır. Buna karşın Yengeç pulsarında olduğu gibi her büyük sıçraması ardında kalıcı bir artış bırakırsa bunların 56 sıçrama neticesindeki birikmiş toplamı yavaşlama oranında uzun dönemde artış olarak gözlenir ve negatif frenleme indisi ölçümüne yol açar.

Manyetarların düzensiz yavaşlamasının incelenebileceği teorik formalizm tarafımızdan Gügercinoğlu ve Alpar (2017) çalışmasında geliştirilmiştir. Burada, zamanla değişen keyfi dış tork ile süperakışkan katmanlarının kuplajı için denklemler sistemi elde edilmiştir. Bu çalışmamızda manyetik alanın bozunmasının çeşitli modları için yavaşlama davranışının süperakışkan iç tork katkısıyla nasıl değişeceği araştırılmıştır.



İç bölgeden manyetik akının hangi hızla uzaklaşacağını bulmak üzere akı tüpleri üzerine etkili olan hacimsel kuvvet olarak vorteks çizgileri ile mikroskobik etkileşmesini göz önüne aldık. Bunun için Gügercinoğlu ve Alpar (2016) çalışmamızda elde ettiğimiz takılma enerjisi değerini kullandık.

Yengeç pulsarının en büyük sıçramasının verilerini Shaw vd. (2018) çalışmasından ve meslektaşımız Dr. Mingyu Ge'nin kendi yapmış olduğu gözlemlerden aldık. Vela'nın 2016 sıçramasına ait uzun dönem sönüm verisini Xu vd. (2019) çalışmasından aldık. PSR J1023-5746, PSR J2111+4606 ve PSR J2229+6114 kaynaklarının zamanlama verileri meslektaşımız Dr. Mingyu Ge tarafından sağlanmış olup, analizleri Shiqi Zhou ve Prof. Jiangping Yuan tarafından gerçekleştirilmiştir. Tüm bu sıçramalara vorteks sızma modeli çerçevesinde eğri uydurması yapılmış ve model parametreleri bu yolla belirlenerek nötron yıldızının yapısı hakkında çeşitli kısıtlamalar getirilmiştir.

#### 4. BULGULAR

1E 1207.4-5209'nin yavaşlama oranında büyük değişiklik meydana getiren sıçramasının sebebini kabuk depremi neticesinde manyetik alanının dik bileşeninin kırılan kabuk parçasının hareketiyle kayması olarak değerlendirdik. Dönme ve manyetik dipol momenti eksenleri arasındaki eğim açısının  $\Delta\alpha \approx 0.04$  radyan kadar kayması gözlenen sıçrama büyüklüğünü ve yavaşlama oranındaki alışılmadık büyük değişimi izah etmeye yetmektedir. Ayrıca  $\alpha \sim 4^\circ$  elde ettik ki bu CCO'lar için manyetik moment ile dönme eksenlerinin hemen hemen aynı hizada olduğu görüşü ile uyum içindedir. Böylelikle eğim açısındaki oldukça küçük bir oynamanın bile manyetosfer yapısında sezilebilir bir farklılık oluşturmadan yavaşlama oranında %100'lük değişiklik meydana çıkarabileceği sonucuna ulaştık. Bu konu ile ilgili bulgularımızı 2. proje gelişme raporunda daha ayrıntılı olarak incelemiştik.

PSR J0537-6910 özel kaynağı ile ilgili olarak iki çalışma yürüttük. Öncelikle Antonopoulou vd. (2018) çalışmasındaki 45 sıçrama arasından yeterli sayıda sıçrama sonrası sönüm veri noktası bulunan 35 sıçramasının her birine vorteks sızma modeli çerçevesinde eğri uydurması yapıp model parametrelerini belirledik. Buradan korelasyonlar ve nötron yıldızının içyapısı hakkında çeşitli kısıtlamalar elde ettik.  $\Delta v/|\Delta v|$  oranı ile  $t_g$  arasında çok iyi bir lineer ilişki (korelasyon katsayısı 0.95) bulduk. İç kabuk sıcaklığını  $T = 0.9 \times 10^8$  K olarak kestirdik. İç bölgesinde vorteks çizgileri ile akı tüpleri arasındaki kesim başına takılma enerjisini  $E_{v-\Phi} = 4.32$  MeV ve toroidal akı bölgesinin kesirsel eylemsizlik momentini  $I_{tor}/I = (7 \pm 2) \times 10^{-3}$  olarak tahmin ettik. Sıçrama model parametrelerinin belirlenmesinden sonra PSR J0537-6910 için yavaşlama oranındaki kalıcı kaymaların ortalama değerini hesapladık. Sıçrama ile ilgili bu katkıların arındırılmasıyla PSR J0537-6910'nin dış tork tesiri altında sahici frenleme indisini  $n = 2.7(4)$  olarak belirledik. PSR J0537-6910 ile ilgili bulgularımızı bir yayına dönüştürdük (Akbal vd. 2021).

Manyetarların düzensiz yavaşlama davranışına açıklık getirmek için ilk olarak yalnızca Colpi ve diğ. (2000) çalışmasındaki gibi parametrize edilen çeşitli manyetik alan bozunma modlarının yol açacağı dönme dinamiği üzerine daha önce literatürde Dall'Osso vd. (2012) tarafından elde edilmiş denklemler yeniden bulunmuştur. Böylelikle süperakışkan iç tork katkıları işin içine dâhil edildiğinde dinamik davranışın bundan nasıl etkileneceğine dair temel denklemler elimizde mevcut oldu. Manyetik alanın söz konusu modlarla bozunmasının yol açacağı zamana bağlı dış torkun genel ifadesi için süperakışkan iç tork ile kuplajının meydana getireceği denklemlerin tam analitik çözümünün olmadığı görülmüş oldu. Dolayısıyla manyetarların manyetik alan bozunması ve süperakışkan kuplajı altında yavaşlama davranışının tayin edilebilmesi için nümerik çözüme gidilmesi gerektiği sonucuna ulaşıldı. Bu nümerik çözümlerin elde edilmesinin projenin bitiminden kısa süre sonra

tamamlanması hedeflenmektedir. Bu konu ile ilgili bulgularımızı proje son dönem raporunda daha ayrıntılı olarak ele aldık.

Takılma enerjisini Gügercinoğlu ve Alpar (2016) çalışmamızdan alarak hesapladığımız vorteks çizgisi-akı tüpü etkileşmesi ile iç bölgeden manyetik akının uzaklaştırılma hızı nötron yıldızının açısal dönme hızı ile doğru orantılı, manyetik alanın karekökü ile ise ters orantılıdır,  $v_{\Phi}(t) \propto \Omega(t)B^{-1/2}(t)$ . Bu bakımdan  $v_{\Phi}$ 'nin uzun vadeli zamansal değişimi nötron yıldızının manyetik-dönme evrimini bir arada çözmeyi gerektirmektedir. Bunu yapmadan bile bu bulgumuzun sezgisel olarak doğru yönde olduğunu söyleyebiliriz. Dönme hızının düşmesi ile iç bölgeden manyetik akının uzaklaşma hızının azalması beklenen bir şey. Çünkü dönme hızı vorteks sayısı ile orantılı ve vorteks çizgileri akı tüplerini beraberinde taşıyarak manyetik alanın bozunmasına yol açabiliyor. İç bölgede manyetik alanın azalmasıyla akı tüplerinin dışarı kaçış hızının artması da beklenen bir durum. Çünkü manyetik alanın bozunmasıyla vorteks çizgisi başına akı tüpü sayısında bir azalma meydana gelecek ve böylelikle vorteks çizgileri daha az sayıdaki akı tüplerini daha kolay dışarı doğru itebilecektir. Bu konu ile ilgili bulgularımızı proje son dönem raporunda daha ayrıntılı olarak tartıştık.

Yengeç pulsarının 8 Kasım 2017 tarihinde meydana gelen sızmasını deprem sonucu kırılan kabuk parçasının kendisine takılı vorteks çizgilerinin bir miktar içeri yönde hareket ederek daha büyük ölçekli vorteks boşalmasını tetiklemesi doğrultusunda değerlendirdik. Gözlem verisine yapmış olduğumuz eğri uydurmasından ve vorteks sızma model parametrelerinden Yengeç pulsarının fiziksel parametreleri hakkında önemli bilgilere ulaştık. Kırılan kabuk parçasının büyüklüğünü  $D \approx (6 - 18)$  m olarak hesapladık. Vorteks çizgilerinin deprem gibi bir dış etkiyle bir miktar içeri taşınmasının her zaman dönme ve yavaşlama oranlarındaki sızramalarının maksimum büyüklüğe ulaşmasını geciktireceğini bulduk. Eğri uydurmasından bulduğumuz bir sonraki sızramaya kadar olan zaman için  $t_0 = 180(10)$  gün tahminimiz gözlenen  $t_0 = 176$  gün değerine çok yakındır. Yengeç pulsarının en büyük sızması için bu bulgularımız Gügercinoğlu ve Alpar (2019) çalışmasında yayımlanmıştır.

Vela pulsarının 2016 yılında meydana gelen sızması ile ilgili her bir gözlem için getirdiğimiz teorik açıklamalar şu şekildedir:

- (i) Sızramanın hemen öncesinde gözlenen dönme oranındaki yavaşlamanın sebebi, kabuk depremi ile yeni vorteks tuzaklarının oluşumuyla karşılık gelen süperakışkan bölgesinde sürekli vorteks akımının kesilmesidir. Yavaşlamanın zaman ölçeği ise takılma potansiyeli altında yeni vorteks düzenlenmesinin oluşumu için vorteks geçiş zamanıdır.
- (ii) Sızrama zamanı ile çakışan pulsarın elektromanyetik davranışındaki süreksiz değişimler deprem neticesinde kırılan kabuk parçasına çakılı manyetik alan çizgilerinin elâstik hareketleri neticesindedir.



- (iii) Sıçramanın oluşumunun gerektirdiği kısa zaman ölçeği, vorteks boşalması esnasında yapışık olduğu atom çekirdeğinden kurtularak serbest hâle gelen vorteks çizgileri üzerinde indüklenen kelvon dalgalarının örgü fononları ile kuplajından ileri gelmektedir.
- (iv) Sıçramanın akabinde kabuk dönmesindeki başlangıçtaki artışın tepe değerine ulaştıktan sonra 1 dakika içinde sönmesi iç bölge süperakışkanının kabuğa zamana bağlı olarak katılımını yansıtmaktadır.
- (v) Sıçrama sonrası uzun dönem sönüm davranışından üssel sönümün iç bölgede akı tüplerine karşı sızmasının sıçrama nedeniyle etkilendiği vorteks çizgilerinden kaynaklandığını gözledik. Buradan kesim başına vorteks çizgisi-akı tüpü takılma enerjisinin Vela pulsarı için  $E_{v-\Phi} = 2$  MeV olduğunu bulduk. Eğri uydurmasından bulduğumuz bir sonraki sıçramaya kadar olan zaman için  $t_0 = 781(13)$  gün tahminimiz gözlenen  $t_0 = 180$  gün değerinden yalnızca 1 gün sapmaktadır.

Vela pulsarının 2016 yılı sıçraması ile ilgili bu bulgularımız Gügercinoğlu ve Alpar (2020) çalışmasında yayınlanmıştır.

Vela ve 3 tane Vela benzeri pulsardan her bir kaynağa ait 10'ar yılı aşkın FERMI uydusu verilerini analiz ederek 10'u yeni gözlem olmak üzere toplamda 19 tane sıçrama tespit ettik. Bunlar arasında yavaşlama oranında değişimler meydana getiren 15 tane büyük sıçramaya vorteks sızma modeli çerçevesinde eğri uydurması gerçekleştirdik. Tüm durumlarda vorteks sızma modelinin öngördüğü bir sonraki sıçramaya kadar geçen zaman tahmini ile gözlenen değerlerin birbirine yakın olduğunu gördük. Ele aldığımız kaynaklar arasında PSR J1023-5746'nın tüm sıçrama gösteren pulsar popülasyonu arasında en yüksek sıçrama aktivitesine sahip cisim olduğunu bulduk. PSR J2229+6114 kaynağının sıçramaların etkilerinden arındırılmış frenleme indisini  $n = 2.63(30)$  olarak hesapladık. Vela benzeri gama ışın pulsarlarında sıçramalar ile ilgili bu bulgularımızı bir yayına dönüştürdük (Gügercinoğlu vd. 2020).

Pulsarların spin yavaşlama oranlarındaki düzensizliklerin kabuktaki lineer olmayan rejimdeki süperakışkandan kaynaklanabileceği yönündeki önerimizi test etmek üzere biri sıçramalı diğeri sıçramasız iki set sentetik veri oluşturduk. İki duruma ait dönme fazlarını birbirinden çıkararak dönme faz farkını elde ettik. Bir eksene bu dönme faz farkı değerini diğer eksene de belli bir zaman ötelemesi verilmiş dönme faz farkını yazarak zaman gecikmeli dönme faz farkı diyagramını oluşturduk. Gördük ki bir eşik zaman ötelemesi alt sınırının yukarısında kaotik davranışın imzası niteliğindeki kendi üstüne kapanmayan çevrimler meydana geliyor. Bu çevrimlerin sayısı da rastgele olarak ortaya çıkmış değil. Her seferinde çevrimlerin sayısı sıçrama sayısının bir eksiği oluyor. Böylece belli bir gözlem zamanı için bir pulsarın geçirdiği sıçramaların toplam sayısının bulunması için yeni bir yöntem geliştirmiş oluyoruz: Zaman



gecikmeli dönme faz farkı diyagramını oluşturup diyagramdaki çevrimleri saymak. Çevrimlerin sayısı pulsarın karşılık gelen zaman aralığında geçirdiği tüm sıçramaların bir eksiği oluyor. Pulsarların kaotik spin yavaşlama davranışı ve sıçramaların bulunması için yeni bir yöntem sunan bu bulgularımızı bir yayına dönüştürdük (Gügercinoğlu vd. 2021).

## 5. TARTIŞMA

Vela ve Yengeç pulsarlarının sıçramalarının ayrıntılı analizinden, ayırma gücü yüksek kaliteli verilerin olması durumunda sıçramaların oluşum, kısa zaman ölçeklerine ait ve uzun dönem sönüm davranış safhalarını kabuk depremi ve vorteks boşalması-takılması-sızması modellerinin bir kombinasyonu olarak şöyle yorumlayabileceğimiz sonucuna ulaştık:

- (i) Bir kabuk depremi vorteks tuzaklarının oluşumuna yol açar ve büyük ölçekli vorteks boşalmalarını tetikler. Boşalan vorteks çizgileri radyal olarak dışarı doğru hareket ederek açısız momentumlarını kabuğa aktarırlar ve kabuğun hızlanmasını sağlayarak sıçrama dediğimiz olayı meydana getirirler.
- (ii) Kabuk kırılması hareket eden plakaya takılı manyetik alan çizgilerinin plâstik hareketleri neticesinde sıçrama anı ile çakışan puls şekli, polarizasyon seviyesi, emisyon özellikleri gibi manyetosfer yapısında geçici değişimlere sebebiyet verir. Deprem yüzeye ne kadar yakınsa ilgili değişimlerin süresi de o kadar uzun olur.
- (iii) Vorteks boşalmasının yaşandığı süperakışkan katmanlarında dış torktan ayrışma da gerçekleşir. Dış tork artık daha az eylemsizlik momenti üzerine etki ettiğinden bir sıçramaya yavaşlama oranının mutlak değerinde artış eşlik eder.
- (iv) Vorteks boşalması kırılan kabuk parçasının hareketinin sebep olduğu radyal olarak içeri doğru vorteks taşınımı içerirse sıçrama büyüklüğünün maksimum değerine belli bir süre geçtikten sonra ulaşması beklenir.
- (v) Büyük ölçekli vorteks boşalması yaşanmasından sonra kabuk süperakışkanından açısız momentum alan ilk bileşen kabuk normal maddesidir ve bu sıçramanın akabinde dönme oranını tepe değerine ulaştırır. Elektronların iç bölgedeki vorteks çizgilerinden saçılmasıyla kabuğun sahip olduğu fazladan açısız momentum iç bölge ile paylaşılır ve sıçrama sonrası denge artış değerine varılır.
- (vi) İç bölge süperakışkanı kabuk normal maddesinin dönme hareketine katıldıktan sonra dış torktan ayrılmış bileşen olarak geriye yalnızca kabuk süperakışkanı kalır. İç kabuk süperakışkanının yıldızın geri kalanı ile denge durumuna gelmesi vorteks sızma sürecinin tekrardan sıçrama öncesindeki koşullara doğru yaklaşmasıyla olur.

PSR J0537-6910'un sıçramaların etkisinden arındırılması ile ilgili kanımızca tutarsızlıklar içeren Ferdman vd. (2018) çalışmasına değinmek isteriz. Ferdman vd. (2018), PSR J0537-6910'un her bir sıçraması için yavaşlama oranındaki sıçrama sonrası verilerin tamamını sıçrama sonrası ilk veri noktasından çıkarıp bu yolla elde ettikleri tüm verileri sıçramadan geçen zamana karşı üst üste çizdiriyorlar. Oluşan şeklin başlangıçta  $\tau = 27_{-6}^{+7}$  zaman ölçekli üssel sönüme benzemesi ve geriye kalan kısmın zamanla lineer toparlanmaya benzemesinden hareketle lineer parçanın eğiminden dönme oranı için yüksek bir sabit ikinci

türev elde ediyorlar. Bu yüksek ikinci türev PSR J0537-6910 için  $n = 7.4 \pm 0.8$  'lik bir frenleme indisi tahmini elde etmelerine sebep oluyor. Andersson vd. (2018) nötron yıldızı akışkanının r-modu salınımları için kütleçekim radyasyonu ile yavaşlamasının  $n = 7$  'lik bir frenleme indisi öngörmesinden yola çıkarak PSR J0537-6910'nin bir sürekli kütleçekim radyasyonu kaynağı olacağını önermişlerdir. Hâlbuki sıçrama sonrası tüm veriden sıçrama sonrasındaki ilk verinin çıkarılması fiziksel olarak anlamsızdır. Sıçramanın nötron yıldızında ne gibi değişiklikler ortaya çıkardığı ancak sıçrama öncesindeki değerler ile mukayese edilerek anlaşılabilir. Ayrıca yüksek sabit ikinci türev muhtemelen sıçrama ile ilgili sönüm tamamlanmadan önce hâla var olan süperakışkan iç tork katkıları sebebiyledir. PSR J0537-6910 kaynağından kütleçekim radyasyonu arayışı ile ilgili ilk çalışmalar (Fesik ve Papa 2020, Abbott vd. 2021) başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Eğer bizim bulduğumuz  $n = 2.7(4)$  değeri gerçek değere daha yakınsa, PSR J0537-6910 zaten kütleçekim radyasyonu gözlenmesi bakımından ilginç bir kaynak olmayacaktır.

Sıçramaların nötron yıldızlarının spin-yavaşlama davranışında başlangıçta getirdiği kırılma ve bir zaman gecikmesi sonrasında orijinal davranışa doğru evrilme, bir boyutlu sistemlerin yeterince uzun zaman gecikmesi durumunda sonsuz boyutlu hâle gelebileceğini söyleyen hiperkaos ile uyumludur. Bu bakımdan çalışmamız klâsik kaotik çekicileri içeren Harding vd. (1990) ile Seymour ve Lorimer (2013) çalışmalarından farklılaşmaktadır. Hiperkaosun en bilinen örneklerinden bir tanesi damar içindeki kan akışının kanserli hücreler etrafındaki besin konsantrasyonu ile değişimini tarif eden Mackey ve Glass (1977) sistemidir. Dolayısıyla hiperkaosa pulsar astronomisi çatısı altında bir örnek bulan çalışmamızın sonuçlarının bu konuda disiplinler arası araştırmalarda kendisine iyi bir yer edinmesini beklemekteyiz.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kabuk kırılması ve hareketiyle bağlantılı olarak manyetik dipol momentinin dik bileşeninin değişimini eğim açısındaki kayma ile ilişkilendirdiğimiz modelimizi depremi açığa çıkaracağı enerjinin sarfiyatını da içerecek biçimde geliştirmek istiyoruz. Böylelikle modelimiz manyetarların patlama aktivitelerine de uygulanabilecek duruma gelecektir.

PSR J0537-6910 kaynağına uyguladığımız sıçramaların sönümlü ve kalıcı etkilerinden arındırılmış frenleme indisini bulma yöntemini öncelikle benzer davranışta bir pulsar olan Yengeç'e uygulamayı hedefliyoruz.

Manyetarların manyetik alan bozunması ve süperakışkan iç tork katkıları altındaki yavaşlama davranışını nümerik olarak elde ettikten sonra evrimleri boyunca karakteristik yaş-gerçek yaş, dipol formülünden çıkan manyetik alan-gerçek manyetik alan, gerçek frenleme indis-ölçülen frenleme indis gibi özelliklerinin karşılaştırmasını yapmayı plânlamaktayız.

İç bölgede vorteks çizgisi-akı tüpü etkileşmesi neticesinde manyetik akının uzaklaştırılma hızı için nötron yıldızı manyetik-dönme evriminin nümerik çözümünün izole ve çift sistem üyesi nötron yıldızları için ayrı ayrı ele alınıp farklı fiziksel durumların ortaya çıkıp çıkmadığının detaylı bir incelenmesinin yapılması tasarlanmaktadır.

Sıçrama sayısı ve kaosun belirteci olan çevrim sayısı arasında sentetik veri oluşturarak bulduğumuz ilişki için gerçek pulsar verisi kullanılarak modelimize gözlemsel dayanak elde etmek niyetindeyiz.



## KAYNAKLAR

- Abbott, R., Abbott, T.D., Abraham, S. 2021. "Diving below the spin-down limit: Constraints on gravitational waves from the energetic young pulsar PSR J0537–6910", *Astrophysical Journal*, 913, 2, 27 (15pp).
- Akbal, O., Gügercinoğlu, E., Alpar, M.A. 2021. "Glitch analysis and braking index determination of the unique source PSR J0537-6910", arXiv: 2106.03341.
- Akbal, O., Gügercinoğlu, E., Şaşmaz Muş, S., Alpar M. A. 2015. "Peculiar glitch of PSR J1119-6127 and extension of the vortex creep model", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 449, 933-941.
- Alpar, M.A, Anderson, P.W., Pines, D., Shaham, J. 1984. "Vortex creep and internal temperature of neutron stars. I. General theory", *Astrophysical Journal*, 276, 325-334.
- Alpar, M.A., Baykal, A. 2006. "Pulsar braking indices, glitches and energy dissipation in neutron stars", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 372, 489-496.
- Alpar, M. A., Chau, H. F., Cheng, K. S., Pines, D. 1996. "Postglitch Relaxation of the Crab Pulsar After its First Four Major Glitches: The Combined Effects of Crust Cracking, Formation of Vortex Depletion Region and Vortex Creep", *Astrophysical Journal*, 459, 706-716.
- Andersson, N., Antonopoulou, D., Espinoza, C.M., Haskell, B., Ho, W.C.G. 2018. "The enigmatic spin evolution of PSR J0537–6910: r-modes, gravitational waves, and the case for continued timing", *Astrophysical Journal*, 864, 137 (8pp).
- Antonopoulou, D., Espinoza, C.M., Kuiper, L., Andersson, N. 2018. "Pulsar spin-down: The glitch dominated rotation of PSR J0537-6910", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 473, 1644-1655.
- Ashton, G., Lasky, P.D., Graber, V., Palfreyman, J. 2019. "Rotational Evolution of the Vela Pulsar During the 2016 Glitch", *Nature Astronomy*, 3, 1143-1148.
- Baym, G., Pethick, C.J., Pines, D. 1969. "Electrical conductivity of neutron star matter", *Nature*, 224, 674-675.

- Bhattacharya, D., van den Heuvel, E.P.J. 1991. "Formation and Evolution of Binary and Millisecond Radio Pulsars", *Physics Reports*, 2003(1), 1-154.
- Biryukov, A., Beskin, G., Karpov, S. 2012. "Monotonic and cyclic components of radio pulsar spin-down", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420, 103-117.
- Colpi, M., Geppert, U., Page, D. 2000. "Period clustering of the anomalous X-ray pulsars and magnetic field decay in magnetars", *Astrophysical Journal Letters*, 529, L29-L32.
- Dall'Osso, S., Granot, J., Piran, T. 2012. "Magnetic field decay in neutron stars: from soft gamma repeaters to 'weak-field magnetars'", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422, 2878-2903.
- De Luca, A. 2017. "Central Compact Objects in Supernova Remnants", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 932, 012006.
- Easson, I., Pethick, C.J. 1977. "Stress tensor of cosmic and laboratory type II superconductors", *Physical Review D*, 16(2), 275-280.
- Ferdman, R.D., Archibald, R.F., Gourgouliatos, K.N., Kaspi, V.M. 2018. "The Glitches and Rotational History of the Highly Energetic Young Pulsar PSR J0537-6910", *Astrophysical Journal*, 852, 123 (12pp).
- Fesik, L., Papa, M.A. 2020. "First search for r-mode gravitational waves from PSR J0537-6910", *Astrophysical Journal*, 895, 11 (13pp).
- Goldreich, P., Reisenegger, A. 1992. "Magnetic field decay in isolated neutron stars", *Astrophysical Journal*, 395, 250-258.
- Gotthelf, E.V., Halpern, J.P. 2018. "The First Glitch in a Central Compact Object Pulsar 1E 1207.4-5209", *Astrophysical Journal*, 866, 154 (6pp).
- Güğercinoğlu, E. 2017. "Post-Glitch Exponential Relaxation of Radio Pulsars and Magnetars in Terms of Vortex Creep Across Flux Tubes", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 469, 2313-2322.

- Gügercinoğlu, E., Alpar, M.A. 2016. “Microscopic vortex velocity in the inner crust and outer core of neutron stars”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 462, 1453-1460.
- Gügercinoğlu, E., Alpar, M.A. 2017. “Neutron star dynamics under time-dependent external torques”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 471, 4827-4831.
- Gügercinoğlu, E., Alpar, M.A. 2019. “The largest Crab glitch and the vortex creep model”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488, 2275-2282.
- Gügercinoğlu, E., Alpar, M.A. 2020. “The 2016 Vela glitch: a key to neutron star internal structure and dynamics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496, 2506-2515.
- Gügercinoğlu, E., Doğan, M., Ekşi, K.Y. 2021. “Nonlinear superfluidity and time-delay based chaotic spin-down in pulsars”, arXiv: 2103.05421.
- Gügercinoğlu, E., Ge, M.Y., Yuan, J.P., Zhou, S.Q. 2020. “Glitches in four gamma-ray pulsars and inferences on the neutron star structure”, arXiv: 2011.14788.
- Halpern, J.P., Gotthelf, E.V. 2015. “Proper motion and timing of two unusual pulsars: Calvera and 1E 1207.4-5209”, *Astrophysical Journal*, 812, 61 (7pp).
- Harding, A.K., Shinbrot, T., Cordes, J.M. 1990. “A chaotic attractor in timing noise from the Vela pulsar”, *Astrophysical Journal*, 353, 588, 596.
- Ho, W.C.G., Espinoza, C.M., Arzoumanian, Z., Enoto, T., Tamba, T., Antonopoulou, D., Bejger, M., Guillot, S., Haskell, B., Ray, P.S. 2020. “Return of the big glitcher: NICER timing and glitches of PSR J0537–6910”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498, 4605-4614.
- Hobbs, G., Lyne, A.G., Kramer, M. 2010. “An analysis of the timing irregularities for 366 pulsars”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 1027-1048.
- Igoshev, A.P. 2019. “Ages of radio pulsar: long-term magnetic field evolution”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 482, 3415-3425.





- Jones, P.B. 2006. "Type-II superconductivity and magnetic flux transport in neutron stars", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365, 339-344.
- Kaspi, V.M., Beloborodov, A.M. 2017. "Magnetars", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 55, 261-301.
- Lyne, A.G., Graham-Smith, F., Pritchard, R. S. 1992. "Spin-up and Recovery in the 1989 Glitch of the Crab Pulsar", *Nature*, 359, 706-707.
- Lyne, A.G., Hobbs, G., Kramer, M., Stairs, I., Stappers, B. 2010. "Switched magnetospheric regulation of pulsar spin-down", *Science*, 329, 408-412.
- Mackey, M.C., Glass, L. 1977. "Oscillation and chaos in physiological control systems", *Science*, 197, 287-289.
- Marshall, F.E., Gotthelf, E.V., Zhang, W., Middleditch, J., Wang, Q. D. 1998. "Discovery of an Ultrafast X-Ray Pulsar in the Supernova Remnant N157B", *Astrophysical Journal Letters*, 499 (2), L179-L182.
- Palfreyman, J., Dickey, J.M., Hotan, A., Ellingsen, S., van Straten, W. 2018. "Alteration of the Magnetosphere of the Vela Pulsar During a Glitch", *Nature*, 556, 219-222.
- Seymour, A.D., Lorimer, D.R. 2013. "Evidence for chaotic behaviour in pulsar spin-down rates", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 428, 983-998.
- Shaw, B., Lyne, A. G., Stappers, B. W., Weltevrede, P., Bassa, C. G., Lien, A. Y., Mickaliger, M. B., Breton, R. P., Jordan, C. A., Keith, M. J., Krimm, H. A. 2018. "The Largest Glitch Observed in the Crab Pulsar", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 478, 3832-3840.
- Srinivasan, G. Bhattacharya, D., Muslimov, A.G., Tsygan, A.I. 1990. "A novel mechanism for the decay of neutron star magnetic fields", *Current Science*, 59(1), 31-38.
- Thompson, C., Duncan, R.C. 1996. "The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars. II. Quiescent neutrino, X-ray, and Alfvén wave emission", *Astrophysical Journal*, 473, 322-342.



- Wong, T., Backer, D. C., Lyne, A. G. 2001. "Observations of a Series of Six Recent Glitches in the Crab Pulsar", *Astrophysical Journal*, 548, 447-459.

- Xu, Y.H., Yuan, J.P., Lee, K.J., Hao, L.F., Wang, N., Wang, M., Yu, M., Li, Z.X., Yue, Y.L., Liu, Z.Y., Yuen, R., Wen, Z.G., Dang, S.J., Bai, J.M., Chen, W., Huang, Y.X., Yan, W.M. 2019. "The 2016 Glitch in the Vela Pulsar", *Astrophysics and Space Science*, 364, 11 (8pp).

- Zhang, X., Shuai, P., Huang, L., Chen, S., Du, Y. 2018. "X-Ray Observation of the 2017 November Glitch in the Crab Pulsar", *Astrophysical Journal*, 866, 82 (5pp).