

Parçalanmış Astrofiziksel Diskler

Suzan Doğan^{1,2*}

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 35100, İzmir, Türkiye.

²University of Leicester, Department of Physics and Astronomy, LE1 7RH, Leicester, UK.

Özet: Toplanma diskleri evrende yıldız ve gezegen oluşum disklerinin bulunduğu sistemler, kataklizmik değişenler (CV), X-ışın çiftleri ve etkin gökada ötekleri (AGN) gibi pek çok astrofiziksel sistemde karşımıza çıkar. Çoğu zaman bu diskler dış torkların etkisi ile presesyon hareketi yapar. Bu bildiride çift sistemin yörünge düzlemine göre eğik disklerin parçalanma sürecine ilişkin analitik öngörülerimiz ile 3 boyutlu ve yüksek çözünürlüklü simülasyonlardan elde ettiğimiz bulgular sunulmuştur. Presesyon torku viskoz torkları yendiğinde disk bütünlüğünü koruyamayıp parçalanmaktadır. Parçalanma süreci merkezi cisme düşen madde oranını kaydadeğer biçimde arttırmaktadır. Bu sonuç çok büyük kütleli kara deliklerin büyümesi ve X-ışın çiftlerinde gözlenen patlamaları açıklayabilme potansiyeli taşıması bakımından önemlidir. Çalışmanın bir diğer önemli sonucu ise eğikliğin fazla olduğu durumlarda diskin Kozai çevrimine girmesidir. Böylelikle esas olarak, çift sistemin yörünge düzlemine göre yüksek eğikliğe sahip bir üçüncü cismin yörünge evrimini açıklamak için geliştirilen Kozai mekanizmasının toplanma disklerinde de geçerli olabileceği ve diskte eğiklik-basıklık alışverişine neden olacağı, bu çalışma ile ilk kez ortaya konmuştur. Basıklığı artan diskin enberi noktasının merkezi cisme yaklaştığı evrelerde toplanma oranlarında artış gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: toplanma diski, kara delik, X-ışın çiftleri, hidrodinamik.

Abstract: Accretion discs are the essential ingredient for a vast range of astrophysical phenomena, including star and planet formation, cataclysmic variables (CVs), X-ray binaries and active galactic nuclei (AGN). In most cases, the external torques induce precession in misaligned disc orbits. In this study, we present our analytical predictions about disc tearing in binary systems with an initially planar disc around one component, misaligned with respect to the binary orbital plane and our 3D hydrodynamical simulations with high resolution. When the precession torque is strong enough to overcome the internal viscous torques, disc breaks. Disc tearing enhances the accretion rates significantly. This would have significant implications for all binary systems: e.g. fuelling SMBH during the SMBH binary phase and accretion outbursts in X-ray binaries. When the inclination between the disc and the binary orbit is sufficiently large, disc goes through Kozai cycle. We have showed for the first time that the KL mechanism, which exchanges inclination for eccentricity in a highly misaligned particle orbit around a component of a binary system, can also operate in a fluid disk. When the disc has its peak eccentricity the pericentre of the ring approaches the accretion radius and creates a strong accretion rate.

Key Words: accretion disc, black hole, X-ray binaries, hydrodynamics.

1. Giriş

Toplanma süreci, evrende yıldız ve gezegen oluşum disklerinin bulunduğu sistemler, kataklizmik değişenler, X-ışın çiftleri ve etkin gökada ötekleri gibi pek çok astrofiziksel sistemde karşımıza çıkan bir olgudur. Maddenin merkezi bir gök cismi etrafında spiral yörüngelerde dolanarak birikmesi sonucunda toplanma diski adı verilen astrofiziksel yapılar oluşur. Merkezi gök cismi, oluşum sürecindeki bir yıldız, bir beyaz cüce, nötron yıldızı, yıldız kütleli kara delik ya da çok büyük kütleli bir kara delik olabilir. Toplanma disklerinin çoğunlukla eksen bakışlıktan uzak olduğu düşünülmektedir. Diskler dönen merkezi kara delikten kaynaklanan Lense-Thirring etkisi ile (Bardeen ve Peterson 1975), ısınım salımları (Pringle 1996, 1997) ya da yoldaş bileşenin çekim etkisi nedeniyle yerel bir eğiklik kazanabilir. Çok büyük kütleli kara delikler etrafındaki diskler etkin gökada öteklerindeki toplanma sürecinin kaotik doğası nedeniyle yörünge düzlemine göre eğiklik kazanabilir. Simetri yoksunluğu bu örneklerin tümü için benzer bir sonuç doğurur: diski oluşturan gaz halkaları merkezi cismin spin vektörüne ya da çiftin yörünge düzlemine göre eğik ise halkalar diferansiyel presesyon hareketi yapar ve disk eğrilik kazanır.

Eğri disklerin dinamiği iki farklı fiziksel süreç tarafından belirlenir, başka bir deyişle diskin eğriliği iki yolla taşınabilir (Papaloizou ve Pringle 1983): (i) çalkantı viskozitesi kaynaklı difüzyon, (ii) basınç dalgaları. Difüzyonun baskın olması $\alpha > H/R$ durumuna karşılık gelir. Burada α boyutsuz viskozite parametresi (Shakura ve Sunyaev 1973), H diskin basınç ölçek yüksekliği, R disk yarıçapıdır. Bu durumda disk akışkanı difüzyon denklemine uygun bir biçimde evrimleşir ve eğrilik difüzyon yoluyla taşınır. Ancak $\alpha < H/R$ ise, disk dalga-benzeri rejimdedir ve diskin eğriliği basınç dalgalarının yayılması yolu ile taşınır. Bu çalışmada, kara delik diskleri için geçerli olan $\alpha > H/R$ durumuna odaklanılmıştır.

Disk viskozitesi zayıf ya da diskin yalpalamasına neden olan dış torklar yeterince güçlü ise, diskin bütünlüğünü koruyamayıp halkalara ayrılması beklenir. Disk parçalanması önemli sonuçlar doğurur. Halkalar presesyon eksenine göre yeterince eğik ise, birbirine göre kısmen ters yönde dönecek kadar yalpalayabilir ve bu durum açıl momentumun doğrudan iptaline, dolayısıyla gazın serbest düşmesine ve toplanma oranının artmasına yol açar. Disk parçalanmasının merkezi kara delik

*Sorumlu Yazar E-Posta: suzan.dogan@ege.edu.tr

etrafındaki eğik toplanma disklerinde (Nixon ve ark. 2012) ve çift sistem etrafındaki eğik toplanma disklerinde (Nixon, King ve Price 2013) oluşabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada, çift sistemi oluşturan bileşenlerden birinin etrafında bulunan eğik diskin evriminin incelenmesi hedeflenmiştir. Böylesi bir durumda disk parçalanmasının mümkün olup olmadığını görebilmek için öncelikle diskteki viskoz torklar presesyon torku ile karşılaştırılmış ve disk için parçalanma koşulu türetilmiştir. Daha sonra bu öngörülerini test etmek amacıyla üç boyutlu hidrodinamik simülasyonlar yapılmıştır.

2. Analitik Öngörüler

Yoldaş bileşenin çekim etkisi nedeniyle yörünge düzlemine göre eğik disk üzerinde oluşan presesyonun frekansı

$$\Omega_p = \frac{3}{4} \frac{M_0}{M_1} \left(\frac{R}{a} \right)^3 \Omega \cos \theta \quad (1)$$

ile verilir (Bate ve ark. 2000). Burada θ disk ile çiftin yörünge düzlemi arasındaki açı, M_0 ile M_1 bileşenlerin kütleleri, a ayrıklık, R disk yarıçapı ve Ω diskin açısal frekansdır. M_1 etrafında disk bulunduran bileşeni temsil etmektedir. Birim alana etki eden presesyon torkunun büyüklüğü

$$|G_p| = |\Omega_p \times L| = \frac{3}{4} \frac{M_0}{M_1} \left(\frac{R}{a} \right)^3 \Sigma R^2 \Omega^2 \cos \theta \sin \theta \quad (2)$$

olarak yazılır. Burada, L açısal momentum vektörü, Σ diskin yüzey yoğunludur. Birim alan başına etki eden azimutal ve dikine viskoz torklar ise

$$|G_{v1}| = \frac{3\pi v_1 \Sigma R^2 \Omega}{2\pi R H} \quad (3)$$

ve

$$|G_{v2}| = \frac{2\pi R \Sigma R^2 \Omega^2 v_2 |\partial l / \partial R|}{2\pi R H} \quad (4)$$

biçiminde yazılır (Papaloizou ve Pringle 1983). Burada v_1 azimutal viskozite, v_2 dikine viskozite, l birim açısal momentum vektörüdür. Kepler dönme profili gösteren bir disk için $v_1 = \alpha_1 H^2 \Omega$ tanımından toplam viskoz tork

$$|G_{toplaml}| = |G_{v1}| + |G_{v2}| = \frac{\Sigma R^2 \Omega^2}{2} \frac{H}{R} [3\alpha_1 + \alpha_2 |\psi|] \quad (5)$$

olarak yazılabilir. Burada $|\psi| = \partial l / \partial R$ diskin eğrilikliğini tanımlar. (2) ile verilen presesyon torku ve (5) ile verilen viskoz torkların kıyaslanması diskin bütünlüğünü koruyup koruyamayacağı hakkında bilgi verir. Eğer diske etki eden presesyon torku diskin viskoz torklarından daha yeğin ise diskin parçalanması beklenir. Bu karşılaştırma sonucunda diskin hangi radyal uzaklıktan itibaren yırtılacağını ifade eden $R_{parçalanma}$ koşuluna ulaşılır:

$$R_{parçalanma} \geq \left(\frac{4\alpha}{\sin 2\theta} \frac{H}{R} \frac{M_1}{M_0} \right)^{1/3} a. \quad (6)$$

(6) nolu eşitlik türetilirken dikine viskoz torkun ihmal edildiğini belirtelim. Diskin eğrilikliği hem konum hem de zamanın bir fonksiyonu olduğundan burada basitlik amacıyla $\alpha_1 = \alpha$ varsayımı yapılmıştır. Bu koşula göre tipik bir kara delik diski parametreleri için, örneğin $\alpha = 0.1$ ve $H/R = 0.01$ için, bileşenin kütesinin yeterince büyük olması durumunda belli bir eğikliğe sahip tüm disklerin parçalanması olasıdır. Eğri disklerin viskoz kararsızlığı ve parçalanması için gerekli koşullar Doğan ve ark. (2018) tarafından kapsamlı bir biçimde irdelenmiştir.

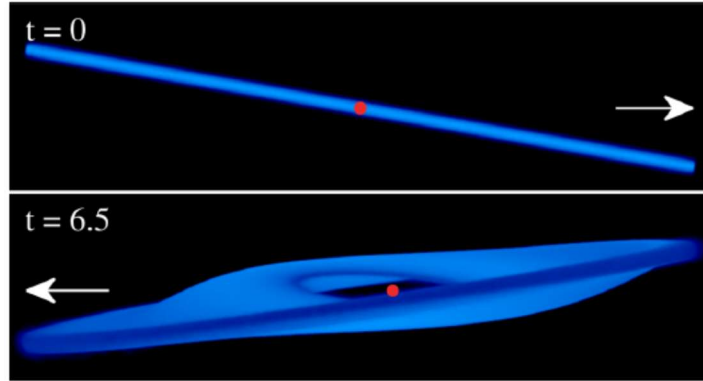
3. Üç Boyutlu Hidrodinamik Simülasyonlar

Analitik öngörülerin doğruluğunu test etmek amacıyla bir düzgünleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (SPH) kodu olan PHANTOM (Price 2012, Price ve ark. 2017) kodu kullanılarak üç boyutlu hidrodinamik simülasyonlar yapıldı. Simülasyonlar Leicester Üniversitesi'nin DiRAC isimli bilgisayar kümesi kullanılarak yürütüldü. Başlangıç varsayımları şöyle özetlenebilir: Diskin başlangıçta düz olduğu varsayılmıştır. Diskin iç yarıçapı bileşenlerin ayrıklığı cinsinden $0.1a$, dış yarıçapı ise $0.35a$ olarak kabul edilmiştir. Yüzey yoğunluğu profili $\Sigma = \Sigma_0 (R/R_c)^{-p}$ ve yerel olarak eşitsiz ses hızı profili $c_s = c_{s,0} (R/R_c)^{-q}$ biçimindedir ve burada $p = 3/2$, $q = 3/4$ olarak alınmıştır. Yüzey yoğunluğu ve ses hızının başlangıç değerleri diskin kütlesi tarafından belirlenmektedir. Disk kütlesi $M_d = 10^{-3} M$ ve iç disk için açısal yarı kalınlık $H/R = 0.01$ 'dir. Başlangıç anında disk 4 milyon parçacıktan oluşmaktadır. Disk viskozitesi $\alpha = 0.1$ kabul edilmiştir. Bileşenlerin kütleleri eşit alınmıştır, böylelikle M toplam kütle olmak üzere bileşenlerin kütleleri toplam kütle cinsinden $M_1 = M_0 = 0.5M$ olarak kabul edilir. Bileşenin $0.05a$ kadar yakınına düşen her parçacık bileşen tarafından toplanmış kabul edilmektedir. Simülasyonlar $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ için yinelenmiştir.

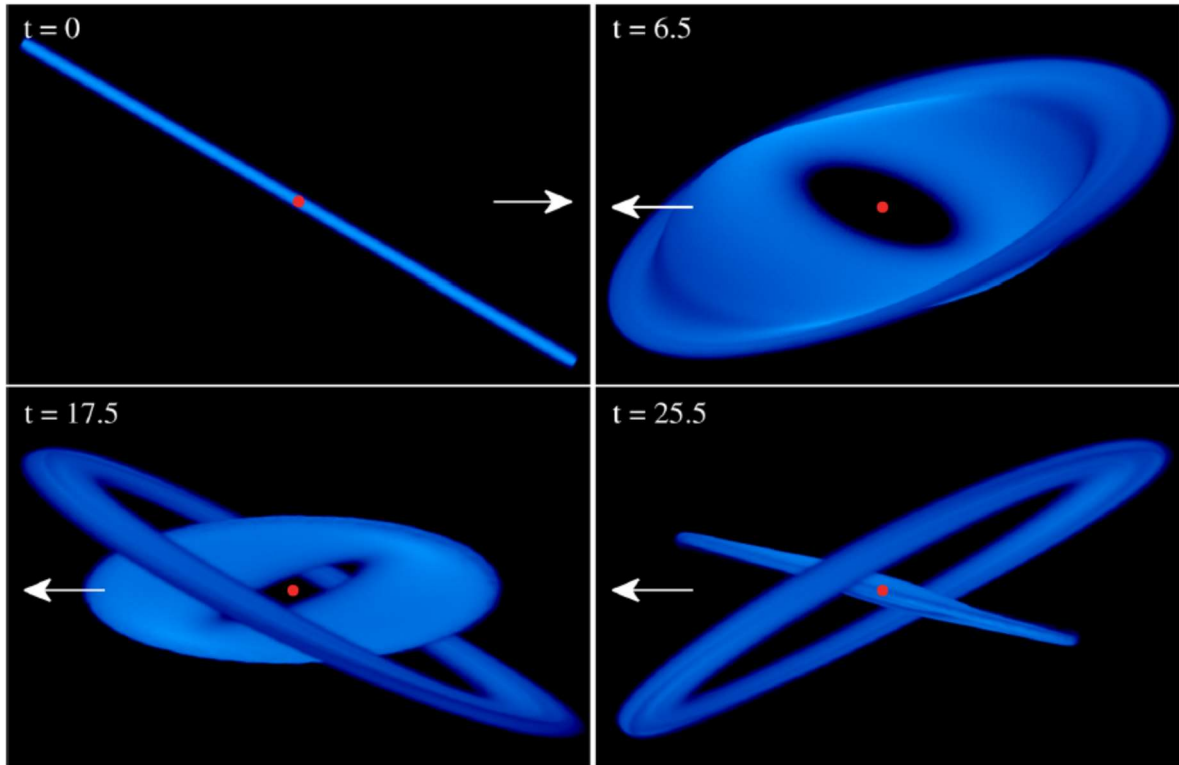
Şekil 1, $\theta = 10^\circ$ durumu için disk evrimini göstermektedir. Bu durumda eğiklik açısı düşük olduğundan bileşenin diske uyguladığı presesyon torkunun yeğlinliği düşüktür. Dolayısıyla disk hafif bir eğrilik kazanarak evrimleşmektedir. (2) nolu eşitlikten görüldüğü üzere eğiklik açısı 30° olduğunda presesyon torkunun yeğlinliği artmaktadır. Böyle bir diskin evrimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu durumda disk birkaç yörünge dönemi sonunda büyük bir eğrilik kazanmaktadır ve sonrasında dış disk yırtılıp ayrı bir halka oluşturmaktadır. Benzer sonuç eğiklik açısının 45° olduğu durumda da gözlenmiştir. Bu durumda presesyon torkunun maksimum değerini aldığı (2) nolu eşitlikten görülmektedir. Şekil 3, $\theta = 45^\circ$ eğiklik açısına sahip diskin evrimini göstermektedir. Disk başlangıçta iki ayrı halkaya ayrılmaktadır, ardından güçlü presesyon nedeniyle üçüncü bir halka daha oluşmaktadır ancak dış halkalar hızlı bir biçimde etkileşip tekrar birleşmektedir.

Eğikliği 60° olan disk diğer disk simülasyonlarına göre oldukça farklı bir biçimde evrimleşmektedir. Bu simülasyonda disk, birkaç yörünge dönemi içinde yırtılmaya başlamaktadır. Ancak diskin geri kalanından ayrılan iç disk maddesi çok hızlı bir biçimde merkezi cisim tarafından toplanmaktadır. Geriye kalan dış disk ise oldukça basıklaşmakta ve diskin eğikliği salınım yapmaya başlamaktadır (bkz Doğan ve ark. Şekil 4). Disk eğikliğinin salınımına diskin basıklığındaki

salınımların da eşlik ettiği gözlenmiştir. Sonuç olarak diskin Kozai çevrimine girdiği görülmüştür. Böylesi bir çevrimde diskin basıklığı periyodik bir biçimde artarken (azalırken), eğikliği azalmaktadır (artmaktadır) (Martin ve ark. 2014).



Şekil 1: Eğikliği 10 derece olan diskin başlangıç anı ve 6.5 yörünge dönemi sonrasındaki görüntüsü. Disk başlangıçta düzdür. Diske yörünge düzlemi doğrultusunda bakılmaktadır ve okun yönü yoldaş bileşenin bulunduğu konumu işaret etmektedir (Doğan ve ark. 2015).

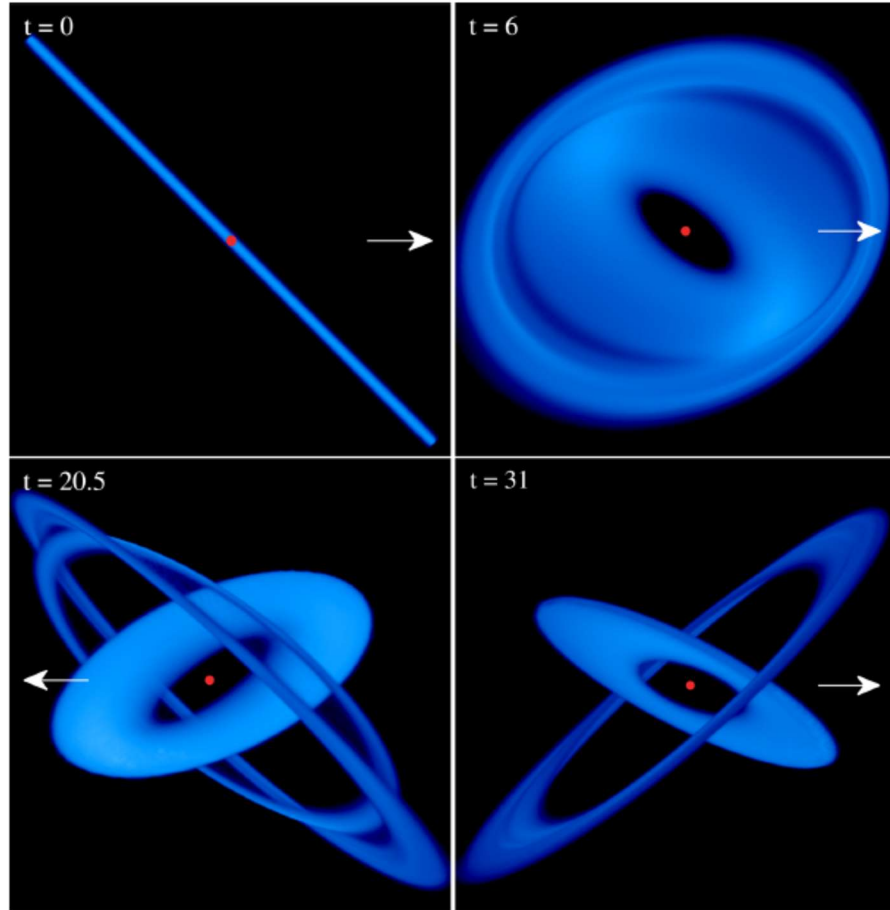


Şekil 2: Eğikliği 30 derece olan diskin başlangıç anı, 6.5, 17.5 ve 25.5 yörünge dönemi sonrasındaki görüntüleri. Diske yörünge düzlemi doğrultusunda bakılmaktadır ve okun yönü yoldaş bileşenin bulunduğu konumu işaret etmektedir (Doğan ve ark. 2015).

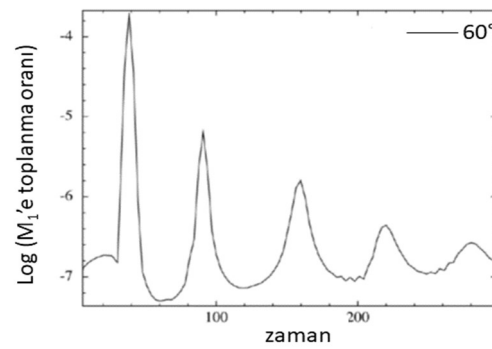
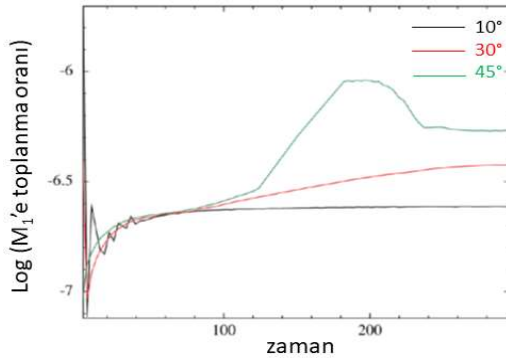
(6) nolu eşitlik ile verilen basitleştirilmiş formdaki parçalanma koşulu $\theta \geq 30^\circ$ olduğu durumlar için disk parçalanmasını başarılı bir biçimde öngörmüştür. Ancak, bu koşul $\theta = 10^\circ$ durumu için de diskin parçalanacağını söylemektedir. Çünkü bu durum için parçalanma yarıçapı $0.23a$ olarak bulunmaktadır ki, bu uzaklık diskin içinde yer almaktadır. Ancak simülasyonlarda bu diskin yaklaşık 20 yörünge dönemi içinde çiftin yörünge düzlemi ile aynı hizaya geldiği gözlenmiştir. Bu durum dikine viskoz torkun önemini vurgulamaktadır. Dikine viskoz torku göz önünde tutularak yapılan hesaplamalar parçalanma yarıçapı için $0.41a$ değerini vermiştir. Bu değer diskin dışında kalmaktadır ve bu sonuç simülasyonlarla uyum içindedir.

Farklı eğiklik değerlerine sahip disklerin toplanma oranlarına bakıldığında parçalanmış disklerin toplanma oranlarının parçalanmayana kıyasla kaydadeğer biçimde yüksek olduğu Şekil 4'te görülmektedir. 45° eğikliği bulunan diskin

yırılmasından sonra toplanma oranı yırılmayan diske göre birkaç kat artmaktadır. 60° eğikliği bulunan ve Kozai çevrimine giren diskin ise toplanma oranı oldukça değişken bir profil sergilemektedir. Bu simülasyonda disk basıklaştıktan sonra diskin enberi noktası merkezi cisme her yaklaştığında düşen madde miktarı da artış göstermektedir. Bu artışlar toplanma oranları grafiğinde açık bir biçimde görülmektedir. Bu simülasyon için toplanma oranlarındaki artış 10^3 kat mertebesine kadar çıkmaktadır.



Şekil 3: Eğikliği 45 derece olan diskin başlangıç anı, 6, 20.5 ve 31 yörünge dönemi sonrasındaki görüntüleri. Diske yörünge düzlemi doğrultusunda bakılmaktadır ve okun yönü yoldaş bileşenin bulunduğu konumu işaret etmektedir (Doğan ve ark. 2015).



Şekil 4: Farklı eğiklik değerleri için M_1 bileşeninin toplanma oranının zamanla değişimi. Toplanma oranı yörünge dönemi başına çiftin toplam kütlesi ve zaman yörünge dönemi birimindedir. Kodda yörünge dönemi 2π 'ye karşılık gelmektedir (renkli versiyon için bkz Doğan ve ark. 2015, şekil 5).

4. Sonuçlar

-Bu çalışmada bir çift sistemde bileşenlerden birinin etrafında bulunan ve diğer bileşenin çekim etkisi altındaki toplanma diskinin evrimi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular aşağıdaki biçimde özetlenebilir:

- Çift sistemlerde bir bileşen etrafındaki diskin ikinci bileşenin uyguladığı presesyon torku etkisi ile parçalanabileceği gösterildi.
- Disklerde parçalanma sürecinin toplanma oranlarını kaydadeğer biçimde arttırdığı gözlemlendi. Birbirinden bağımsız presesyon hareketi yapan disk halkaları birbirinin açısal momentumunu sıfırlayarak disk maddesinin merkezi cisme düşüşünü hızlandırmaktadır.
- Toplanma disklerinin de Kozai çevrimine girebileceği literatürde ilk kez gösterildi.

-Bu bulgular disk düzleminin yörünge düzlemine göre eğik olduğu X-ışın çiftleri ve çok büyük kütleli kara delik çiftlerinde viskoz evrimin açıklamakta yetersiz kaldığı toplanma miktarlarını açıklama potansiyeli taşıması bakımından önem taşımaktadır. Ayrıca Kozai çevrimine giren diskler özellikle Be/X-ışın çiftlerindeki Tip II X-ışın patlamalarına dair modelimizin temelini oluşturmaktadır.

5. Kaynaklar

- Bate M. R., Bonnell I. A., Clarke C. J., Lubow S. H., Ogilvie G. I., Pringle J. E., Tout C. A., 2000, MNRAS, 317, 773
Price D. J., 2012, J. Comput. Phys., 231, 759
Price D. J. et al., 2017, PASA, preprint (arXiv:1702.03930)
Martin R. G., Nixon C., Lubow S. H., Armitage P. J., Price D. J., Doğan S., King A., 2014, ApJ, 792, L33
Bardeen J. M., Petterson J. A., 1975, ApJ, 195, L65
Doğan S., Nixon C., King A., Price D. J., 2015, MNRAS, 449, 1251
Doğan S., Nixon C., King A., Pringle J. E., 2018, MNRAS, 476, 1519
Pringle J. E., 1996, MNRAS, 281, 357
Pringle J. E., 1997, MNRAS, 292, 136
Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A, 24, 337
Papaloizou J. C. B., Pringle J. E., 1983, MNRAS, 202, 1181
Nixon C., King A., Price D., Frank J., 2012, ApJ, 757, L24
Nixon C., King A., Price D., 2013, MNRAS, 434, 1946