

## Sgr A\* Karadelığının Etrafındaki Yığılma Diskinin Dinamik Yapısının Modellenmesi

Orhan DÖNMEZ

Niğde Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü / NİĞDE  
Alınış tarihi:02.01.2010, Kabul tarihi:08.03.2010

**Özet:** Dönen ve dönmeyen karadelikler etrafındaki disklerin dinamik yapılarının modellenmesi ve disklerde oluşan şok dalgalarının özelliklerinin ortaya çıkarılması, genel rölativistik hidrodinamik denklemlerin yüksek çözünürlüğe sahip nümerik yöntemler kullanılarak çözülmesi ile elde edilmiştir. Diskler üzerinde durağan şok dalgalarının oluştuğu görülmüş, bu dalgalar kuyruk şok dalgası olarak adlandırılmıştır. Oluşan şok dalgaları karadelğin yüzeyi diye adlandırabileceğimiz olay ufku ile birleşmiş ve duran iki şok dalgası arasında kalan bölge "kovuk" olarak adlandırılmıştır. Bu şok dalgalarının ve kovuğun özellikleri, diskin adyabatik indeksine, açısız momentumuna, basıncına ve merkezde bulunan dönen karadelğin spinine bağlı olduğu bulunmuştur. Diskin salınım özelliklerini tanımlayan modların, bu tür şok dalgaları tarafından yakalandığı göz önüne alınırsa, diskin ve karadelğin bu parametreleri disk tarafından yayılan X-ışınlarının özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Diskin salınım özelliklerinin ve fiziksel doğasının ortaya çıkarılması, bu tür diskleri ihtiva ettiği düşünülen Sgr A\*deki büyük kütleli karadeliklerin özelliklerinin ortaya çıkarılmasına yardımcı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Rölativistik Hidrodinamik, Yığılma Diski, Kerr Karadelik, Şok Dalgası, Sayısal Modelleme, Sgr A\*

### Modelling of the Accretion Disk Dynamics Around the Sgr A\* Black Hole

**Abstract:** The numerical modeling of the disk dynamics around the rotating and non-rotating black holes and revealing the properties of shock wave created on the accretion disk can be achieved by solving the general relativistic hydrodynamic equation using the high resolution shock capturing scheme. It has been observed that the standing shock wave occurred and it is named as tail shock. The tail shock waves are connected to the black hole horizon and the region between two tail shocks are so-called "cavity". The properties of shock wave and cavity depend on the adiabatic index of the matter, angular momentum, pressure and black hole rotation parameter. If such shock wave captures the oscillation modes of the disc features, the parameters of the disk and black hole play an important role to determine the properties of the emitted X-rays. The revealing the physical nature of disk oscillation can help to understand the properties of massive black hole which is thought to be located at the center of Sgr A\*.

**Keywords:** Relativistic Hydrodynamics, Accretion Disc, Kerr Black Hole, Shock Wave, Numerical Simulation, Sgr A\*

### Giriş

Sagittarius A (Sgr A), Samanyolu Galaksi'sinin merkezinde kuvvetli radyo kaynağı olarak bilinen bir kaç bölgeden biridir. Sgr A\*, bu bölgenin içinde bulunan diskin merkezindeki büyük kütleli karadelik olarak bilinmektedir ve kütlesi yaklaşık  $3,6 \times 10^6 M_{\odot}$  dir (Genzel vd., 2003). Sgr A\*'nın etrafındaki yığılma diski, civarındaki maddenin farklı noktalardan karadelığe doğru düşmesiyle oluşmaktadır. Bu yolla oluşan diskler Bondi-Hoyle tipi yığılma diski denir.

Bondi-Hoyle tipi diskleri (Font ve Ibanez, 1998) ve (Font vd., 1998) kaynaklarında teorik olarak çalışılmış ve diskin dinamik yapısının ortaya çıkarılması konusunda uzun bir mesafe kat edilmiştir. Bu çalışmaların devamı olarak, bu çalışmada biz de benzer disklerin dinamik yapılarını modelleyeceğiz ve diskler üzerinde oluşan şok dalgalarının doğasını, göreceli olarak yerini ve hangi fiziksel değişkenlerin bunları etkileyebileceği modelleyerek, disk ile ilgili genel bir durum ortaya çıkaracağız. Bondi-Hoyle tipi yığılma diskleri maddenin iki farklı noktadan karadelığe doğru akması ile oluşurlar. Eğer madde doğal merkezci kuvvetten daha büyük bir gravitasyonel çekime maruz kalırsa, karadelığe doğru düşer. Çekimin yetersiz kaldığı aksi durumda ise karadelikten uzaklaşacak şekilde hareket ederler.

Karadelığe doğru düşen madde, karadelik etrafında yığılma diski oluştururken, aynı zamanda şok dalgalarının oluşumuna neden olur. Maddenin karadelğin etrafında birikimine sebep olan iki farklı fiziksel olay vardır. Bunlardan birinci viskozite iken, ikincisi ise disk üzerinde oluşan şok dalgalarının diskin açısız momentumunun kaybolmasına sebep oluşudur. Bizim hesaplamalarımız viskozite parametresini içermediği için, disk üzerinde şok dalgalarının olup olmadığına bakacağız. Disk üzerinde oluşan şok dalgaları salınım modlarının yakalanmasına neden olacaktır.

Karadeliklerin etrafındaki disklerin dinamik yapısının ortaya çıkarılması, diskin yaydığı X-ışınlarından elde edilen gözlem verileri ile karşılaştırma yapabilmemize yardımcı olur. Bu sayede diskin dinamik yapısının gözlem verileri ile nasıl ilişkili olduğu konusunda bir fikir yürütebiliriz. Gözlemlerden elde edilen veriler ile karadeliklerin kütlesi ve dönme açısız momentumları tahmin edilebilmektedir. Aynı şekilde karadelğin etrafındaki diskin dinamik yapısının ortaya çıkarılması ve disklerin salınım özelliklerinin araştırılması, karadeliklerin özelliklerini ortaya çıkarmada önemli bir yöntemdir. Eğer disk, karadelğin kendi etrafında oluşturduğu yüksek gravitasyonel çekim alanı ile etkileşirse, bunun sonucu olarak diskin belli bölgeleri

salınım özelliği gösterir. Salınım yapan diskin güç spektrumunu incelenerek diskin yaydığı quasi-periyodik salınım frekansı ölçülebilir.

Bu çalışmanın amacı, sadece Sgr A\* büyük kütleli karadeliğin etrafındaki disklerin dinamik yapıları, Genel Rölativistik Hidrodinamik (GRH) denklemleri çözen yazılımı kullanarak modellemektir. Bu yazılım, Dönmez (2004) tarafından yayınlanan makalede detaylı biçimde anlatılmıştır. Genel rölativistik hidrodinamik denklemlerinin yüksek çözünürlüğe sahip sayısal yöntemler kullanarak çözümü, bu yazılım kullanılarak yapılmaktadır. Karadeliğin etrafındaki diskler üzerinde şok dalgası oluşumunun çok olağan bir durum olduğu göz önüne alınır, şok dalgalarında iyi çözüm üreten yüksek çözünürlüklü sayısal yöntemlerin kullanılması zorunludur. Karadeliğin fiziksel boyutunu ve etrafındaki uzay-zamanı tanımlayan matrisin matematiksel ifadeleri Font vd. (1998) ve Dönmez ve Yıldırım'ın (2009) çalışmalarında bulunabilir. Makalenin tamamında  $c=G=1$  tanımlaması kullanılarak, hesaplanan hızın  $c$ , zaman ve uzunluğunda  $M$  boyutunda olması sağlanmıştır. Burada  $c$  ışık hızı,  $G$  kütle çekim sabiti ve  $M$  karadeliğin kütlesidir.

## Başlangıç ve Sınır Şartları

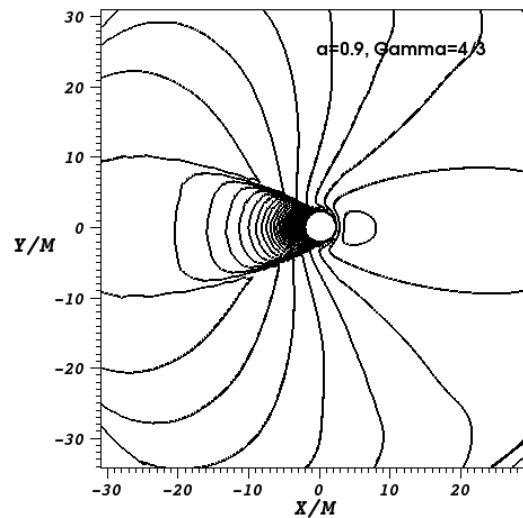
Font ve Ibanez, (1998), Font vd., (1998) ve Dönmez ve Yıldırım (2009) tarafından yapılan çalışmalarda karadeliğin etrafındaki diskin dinamik yapısı farklı başlangıç şartları kullanarak modellenmiştir. Bu makalede ise farklı gaz basıncı, yoğunluk, radyal ve açılma hız durumları için sayısal hesaplamalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu modellemeleri yaparken Çizelge 1'deki başlangıç şartları kullanılmıştır. Dönmez ve Yıldırım'ın (2009) yaptıklarından farklı olarak, diskin üzerine gönderilen maddenin hızı ve adyabatik indeksi farklı olarak alınmış, bunun sonucu olarak diskin ve şok dalgasının oluşumu modellenmiştir. Dışarıdan diskin modellendiği alana gönderilen maddenin radyal ve açılma yöndeki hız ifadeleri Denklem 1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} V^r &= -\sqrt{\gamma^{rr}} V_\infty \cos(\phi) \\ V^\phi &= \sqrt{\gamma^{\phi\phi}} V_\infty \sin(\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $V_\infty$  gazın sonsuzda sahip olduğu hız (asimptotik hız) ve  $\gamma$  üç matrisin elemanlarıdır.

**Çizelge 1.** Dış sınırdan diskin modellendiği alana gönderilen gazın sahip olduğu değişkenleri göstermektedir.  $\Gamma$ : adyabatik indeksi,  $a$ : karadeliğin dönme parametresini,  $V_\infty$ : akışkanın sonsuzda sahip olması gereken hızı (asimptotik hızı),  $C_{S_\infty}$ : ses hızını,  $M_\infty$ : Mach sayısını ve  $t_s$ : simülasyonun sonlandırıldığı zamanı gösterir.

| Model | $\Gamma$ | $a$ | $V_\infty (c)$ | $M_\infty$ | $C_{S_\infty} (c)$ | $t_s (M)$ |
|-------|----------|-----|----------------|------------|--------------------|-----------|
| A     | 5/3      | 0,9 | 0,5            | 5          | 0,1                | 10000     |
|       | 5/3      | 0,9 | 0,5            | 50         | 0,01               | 10000     |



**Şekil 1.** Hesaplamanın durdurulduğu  $t=10000M$  zamanında, karadeliğin dönme parametresi  $a=0.9$  ve adyabatik indeksi  $\Gamma = 5/3$  olduğu durum için oluşan diskin yapısı ve şok dalgaları gösterilmiştir. Disk üzerinde oluşan şok dalgası durağan ve maddeyi belli bölgeye hapseden bir yapı olarak ortaya çıkmıştır

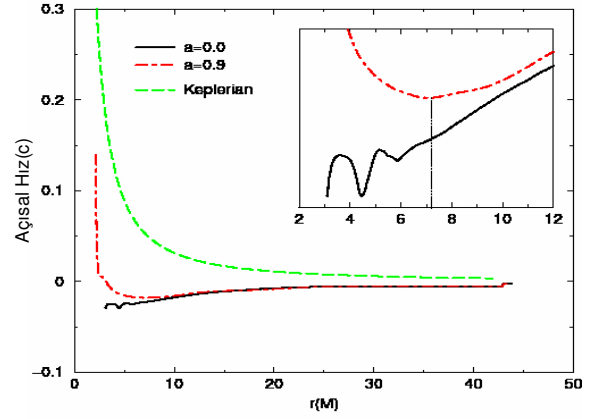
Nümerik simülasyonlarda sadece başlangıç şartlarını tanımlamak, problemi modellemek için yeterli değildir. Problemin fiziksel boyutunu tanımlamak için hem radyal yönde hem de açılma yönde sınırların tanımlanması gerekir. Buradaki hesaplamalarda açılma yönde periyodik sınır şartı kullanırken, radyal doğrultuda ise, dış sınıra ulaşan maddeyi diskin modellendiği alandan dışarı doğru atan bir sınır şartı kullanılmıştır. Bu sayede karadeliğe yaklaşan bir maddenin karadeliğe düşmesi sağlanırken, dış sınıra ulaşan bir maddenin hesaplama bölgesinden dışarı düşmesi sağlanmıştır. Böylece dışarıdan hesaplama bölgesine gelebilecek istenmeyen salınımlar engellenmiş olur. Karadeliğe yaklaşan bir maddenin olay ufku altında karadeliğe düşmesi, karadeliğin özelliklerinin bir sonucudur. Olay ufku dışında, disk üstünde madde viskozite sebebi ile merkezci kuvvetin yeterli kalmaması ve çekimin güçlü hale gelmesi durumunda da madde merkezdeki kara deliğe doğru sürüklenir. Karadeliğe bu şartlar altında yaklaşan madde ışık hızına yakın bir hızla ulaşır ve son kararlı yörüngeyi de geçerek karadeliğe düşer.

## Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

Dönen ve dönmeyen karadeliğin etrafındaki disklerin dinamik yapısının ve bunların yaptığı quasi-periyodik salınımların modellemeler sonucunda ortaya çıkarılması, karadeliğin kütlesini ve spinini belirlemede önemli bir yoldur. Karadeliği doğrudan gözlemek mümkün olmadığı için etraflarındaki disklerin modellenmesi, astrofizikte önemli bir fiziksel olay olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu amaçla elde edilen nümerik modellemelerin ilk sonucu Şekil 1'de gösterilmiştir. Çizelge 1'de verilen değerlere sahip gazın dış sınırdan diskin modellendiği bölgeye gönderilmesiyle, hem diskin kendisi hem de disk üzerinde şok dalgası

oluşturmuştur. Dış sınırdan karadeliğe doğru akan madde, akış tarafının tam ters yönünde biriktiği ve iki durağan kuyruk dalgası oluşturduğu görülmektedir (bkz **Şekil 1**). Disk hemen hemen  $t=500M$ 'de kararlı duruma ulaşmıştır. Madde dışarıdan karadeliğe doğru süpersonik olarak düşerken, disk üzerinde oluşmuş olan semer noktalarından geçebilir. Semer noktasını geçen madde arkasında bir şok dalgası oluşturur. Şekil 1 diskin kararlı duruma ulaşmasından çok zaman sonraki durumunu göstermektedir. Disk üzerinde oluşan şok dalgaları karadeliğin olay ufkuna bağlanırken, aynı zamanda bu iki şok dalgasının bir açılma açısı vardır. Nümerik sonuçlardan elde ettiğimiz deneyimlerimiz ve model sonuçları, bu açılma açısının karadeliğin sahip olduğu açılma momentum parametresine, gazın adyabatik indeksine ve dışarıdan gönderilen gazın radyal ve açılma hızına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Disk üzerindeki şok dalgaları, diskin açılma momentumunun kaybolması veya kinetik enerjisinin iç enerjiye dönüşmesine sebep olurlar. Bu sayede gaz, merkezci kuvvetini yenerek karadeliğe doğru düşer ve yığılmanın gerçekleşmesine sebep olur. Ayrıca karadeliğe yakın bölgelerde disk sıcaklığı artar ve bölgede ters Compton olayının da etkisiyle X-ışınlarının oluşumu meydana gelir. Aynı zamanda diskin sahip olduğu salınım modları, şok dalgaları ile çevrili bölge tarafından yakalanarak quasi-periyodik salınım (QPO) yapmalarına neden olurlar. Bu QPO'lar incelenerek karadeliğin özellikleri ortaya çıkarılabilir. Bu tür disklerin yaptığı quasi-periyodik salınımların ortaya çıkarılması ve elde edilen sonuçların gözlem sonuçları ile karşılaştırılması, şuan hazırlanmakta olduğumuz diğer makalemizde verilecektir.

Dönen ve dönmeyen karadeliklerin açılma momentumlarının, diskin açılma momentumuna yaptığı katkıları ortaya çıkarmak önemli bir fiziksel olaydır. Bunun anlaşılabilmesi için diskin modellenmesi gerekir. Gravitasyonel kuvvetinin yanında, merkezci ve basınç kuvvetleri de diskin oluşumuna etki ettiğinden, dışarıdan gönderilen madde, Kepler hızından daha yavaş bir hızla hesaplara dahil edilmesi gerekir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi diskin açılma hızı Kepler hızından daha yavaştır. Ayrıca dönen karadeliğin etrafındaki diskin açılma hızı  $r=7.1M$ 'den daha düşük radyal bölgede, karadeliğin dönme yönüne doğru hareket ederken, bu durum dönmeyen karadeliğin için tam ters yöndedir. Bu da, dönen karadeliğin etrafındaki uzay-zamanı dönme doğrultusunda büktüğünü ve dolayısıyla maddenin karadeliğin dönme yönünde harekete zorlandığını söyleyebiliriz. Şekil 2'in içinde çizilmiş küçük grafik bu durumu açık bir şekilde göstermektedir. Karadeliğe doğru dış sınırdan düşen madde, hem dönen hem de dönmeyen karadeliğin için aynı açılma hızına sahipken, bu durum  $r < 25M$  bölgesinde bozulmaktadır. Dönen karadeliğe doğru düşen maddenin açılma hızı karadeliğin açılma momentumundan dolayı daha büyük olmaktadır. Sonuç olarak, genel görelativitenin  $r < 25M$  bölgesinde etkin olduğu ve madde karadeliğe yaklaştıkça gravitasyonel kuvvetin karadeliğe yakın bölgelerde etkin bir rol oynadığını göstermektedir.



**Şekil 2.** Dönmeyen ve dönen karadeliğin etrafındaki diskin kararlı duruma ulaştıktan sonraki açılma hızının radyal yer değiştirmeye bağımlılığı gösterilmektedir. Bu grafik  $\phi = 0.0$  da,  $\Gamma = 5/3$  durumu için çizilmiştir. Açılma hızı dönmeyen ve dönen karadeliklerde,  $r < 25M$  bölgesinde birbirlerinden farklı değerlere sahip oldukları ortaya konmuştur. Diskin açılma momentumunun karadeliğin sahip olduğu açılma momentumu tarafından etkilendiği ve sonuç olarak dönen karadeliğin etrafındaki diskin açılma hızının dönmeyene göre farklı olduğu bulunmuştur. Burada çizilen küçük grafik, dönen karadeliğin etrafındaki diski oluşturan maddenin dönmeyen göre  $r < 7.1M$  bölgesinde ters yönde hareket ettiğini göstermektedir.

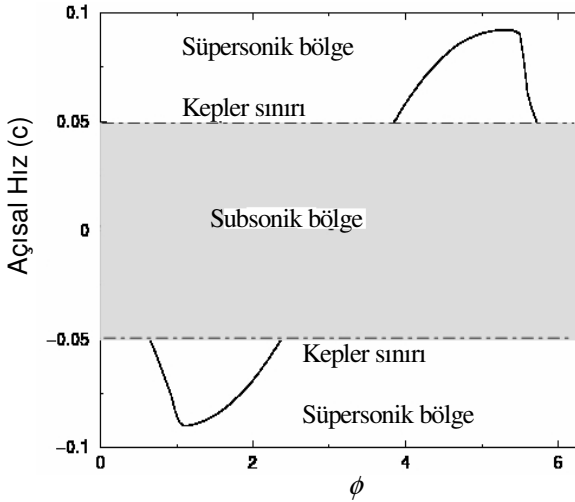
Dönen karadeliğin etrafındaki diskin  $r = 7.3M$  için açılma hızının  $\phi$ 'ye göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu durumdaki ses hızı -0.05 ile 0.05 aralığında değiştiğinden, karadeliğin etrafındaki madde bazı bölgelerde subsonik bazı bölgelerde de süpersonik hareket yapmaktadır. Değişimler, Şekil 3 üzerinde farklı bölgeler tanımlanarak gösterilmiştir. Disk üzerinde oluşan şok dalgalarının bulunduğu noktalarda madde süpersonik şekilde hareket ederken, diskin diğer bölgelerinde subsonik bir hareket yaptığını görülüyor. Subsonik bölgede madde birikerek diskin yoğun bölgesini oluşturur. Bu bölgeler QPO frekanslarının yayıldığı bölge olarak bilinir.

Kütle birikim oranı, diskin davranışını ve kararlı duruma ulaşma hızını gösteren önemli fiziksel göstergelerden biridir. Bu sebepten, diskin kütle birikim oranının diskin parametrelerine ve karadeliğin dönme parametrelerine bağımlılığı Font ve Ibanez (1998) ve Dönmez ve Yıldırım (2009) tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada karadeliğin dönme açılma momentumunun kütle birikim oranına açık etkisini Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, dönen karadeliğin etrafındaki kütle birikim oranı karadeliğin uzaklaştıkça azalmaktadır. Aynı zamanda dönen karadeliğin etrafındaki yığılma diski dönmeyene karadeliğinkine göre daha az olduğu görülüyor.

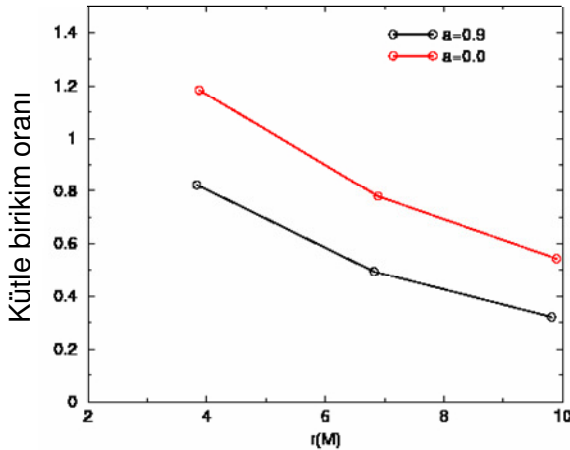
Disk üzerinde oluşan salınım modlarından biri, basınç değişiminden dolayı oluşan kuvvetin bir sonucudur ve bu p modu olarak adlandırılır. Basınç kuvvetleri diskin oluşturduğu düzleme dik yönde meydana gelir. Yığılma diskinin ekvator düzlemindeki modellerinde ince disk yaklaşımı yapılmış olsa da, diskin belli bir basıncı olduğundan dolayı bu kuvvetler ihmal

edilemezler. Bu kuvvetlerde diskin oluşumuna, oluşan şok dalgalarının özelliklerine ve kütle birikim oranına etki ederler. İki farklı basınç durumunda elde edilen kütle birikim oranlarının farkının, diskin yarıçapına göre değişimi Şekil 5’de gösterilmiştir. Disk basıncı, kütle birikim oranında değişime neden olmuştur.

Yine karadelinin disk üstündeki dönme etkisini özetleyen en önemli grafiklerden biride Şekil 6’da verilmiştir. Dönen ve dönmeyen karadelinin etrafındaki diskin herhangi bir sabit  $r$ ’deki yoğunluk, açıl hız, üç hız ve Mach sayısı,  $\phi$ ’ye bağlı olarak çizilmiştir. Karadelinin dönmesinden dolayı etrafındaki diskin dinamik yapısını değiştirdiği Şekil 6’da açıkça görülmektedir. Oluşan şok dalgaların konumları dönme etkisi ile uzay zamanın bükülmesinden dolayı değişmiştir.

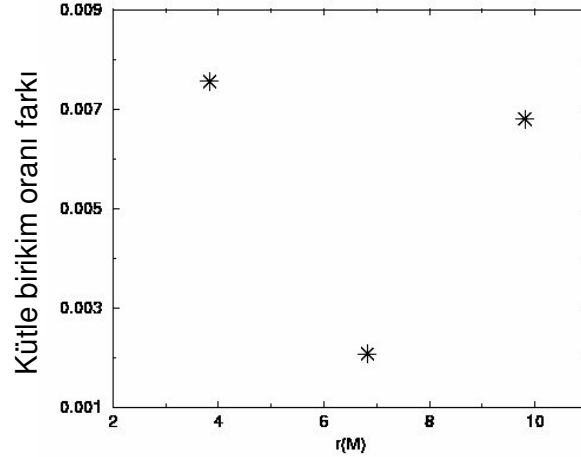


**Şekil 3.** Sabit bir radyal değer  $r = 7.3M$ 'de ve dönme açıl momentum parametresi  $a=0.9$  olan bir karadelinin etrafına, adyabatik indeksi  $\Gamma = 5/3$  olan bir gazın gönderilmesi ile oluşan diskin açıl hızının  $\phi$ 'ye göre değişimi. Farklı sonik noktalar gözlemlenmiştir



**Şekil 4.** Farklı karadelik dönme parametrelerinde,  $a=0$  ve  $a=0.9$ , hesaplamaların son zamanında ve farklı sabit yarıçaplar olan  $r=3.83M$ ,  $r=6.82M$  ve  $r=9.8M$ 'deki diskin birim zamandaki kütle değişim oranı gösterilmiştir. Dönmeyen ve dönen karadelikler etrafındaki diskin kütle birikim oranları her iki durumda da benzer davranış göstermiştir. Kütle birikim oranları  $r$ 'nin artması ile azalmaktadır

Diskün sahip olduğu üç hız, şok dalgalarının bulunduğu noktada ışık hızına yaklaşmıştır. Bu durumlar ancak genel rölativistik etki dikkate alınarak açıklanabilir. Şekil 6'dan elde edilen sonuçlar çalışmada neden genel rölativistik hidrodinamik denklemlerin çözümünün tercih edildiğini ortaya koymaktadır. Mach sayısının 1'den büyük olması durumunda diskin süpersonik (soğuk disk), 1'den küçük olması durumunda ise subsonik (sıcak disk) hareket yaptığı görülmüştür. Bu durum Şekil 6'da diskin Mach sayısı çizilerek gösterilmiştir.



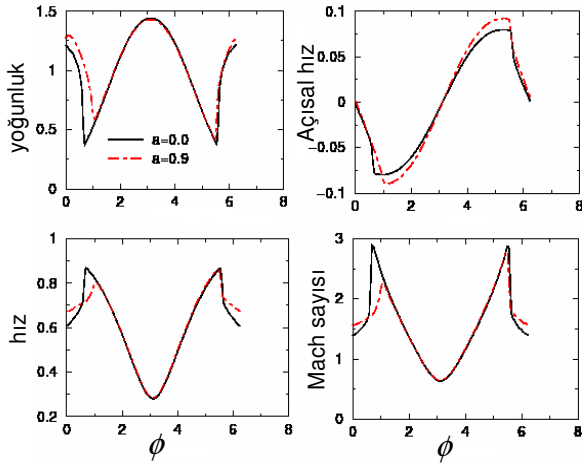
**Şekil 5.** Disk basıncının farklı değerleri için dönen karadelik ( $a=0.9$ ) etrafındaki diskin, birim zamandaki kütle birikim oranlarının farkı gösterilmiştir. Farklı basınç karşılıklı aynı disk parametreleri kullanılarak kütle birikim oranındaki değişim, radyal uzunluğa bağlı olarak tanımlanmıştır

Dönen veya dönmeyen karadeliklerin etrafındaki disklerin özelliklerinin ortaya çıkarılmasındaki önemli parametrelerden biri diskin sahip olduğu açıl momentumdur. Disk ve disk içinde model hesaplarını yaptığımız bölme için dışarıdan herhangi bir etki olmadığından, sistem üzerine uygulanan net tork sıfırdır. Bu durum fiziksel olarak açıl momentumun korunduğunu anlamına gelir. Açıl momentum korunumunun gerekliliği, yapılan hesaplamaların fiziksel olarak doğruluğunu gösterir. Böylece, disk üzerinde oluşan özel açıl momentumu korunumu, dört hızın korunumu  $U^\mu U_\nu = -1$  ve zaman benzeri (timelike) şartı  $ds^2 < 0$  kullanılarak hesaplanır. Ekvator düzleminde özel açıl momentum ifadesi (Lu vd., 1995)

$$\frac{1}{(U_t)^2} = -g^{tt} + 2g^{t\phi}l - g^{\phi\phi}l^2 \quad (2)$$

Kepler diskinin özel açıl momentumu Kerr koordinatlarında  $dU_t / dr = 0$  şartı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır (Lu vd., 1995).

$$l_K = -\frac{M^{1/3}r^{3/2}(r^2 - 2Mr + a^2) - Ma(3r^2 - 4Mr + a^2)}{r(r - 2M)^2 - Ma^2} \quad (3)$$

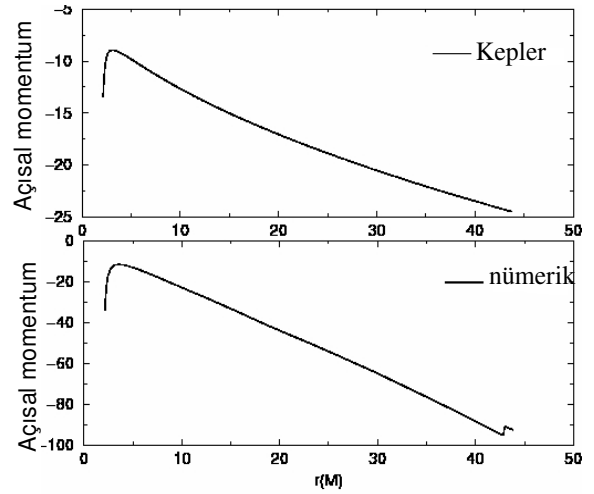


**Şekil 6.** Farklı karadelik dönme parametreleri için sabit radyal değer olan  $r = 7.58M$ 'deki disk, farklı parametrelerinin  $\phi$ 'ye göre değişimi. Grafik  $t = 8490M$  zamanında adyabatik indeksi  $\Gamma = 5/3$  durumu için çizilmiştir. Buradaki düz çizgi dönmeyen karadelik etrafındaki disk farklı disk parametrelerini, kesikli çizgi (kırmızı) ise aynı disk parametreleri için dönen karadeliginin etrafındaki disk durumunu göstermektedir

Karadelik etrafındaki şok dalgalarının oluşumu, yine disk üzerindeki sonik noktalar ile mümkündür. Bu sonik noktalar karadeliğe doğru düşen gazın parametrelerine, adyabatik indeksine ve açısal momentuma bağlıdır. Şekil 7, nümerik ve Kepler diskinin özel açısal momentumunu göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, nümerik sonuçlar teori ile uyum içerisindedir. Düşey yöndeki değerlerin farklı olması, elde ettiğimiz sonuçlar normalize edilmediğinden ve Kepler diskinde basınç kuvveti gibi etkilerin olmamasından kaynaklanmış olabilir. Ama nümerik sonuçlar ile teori benzer davranış gösterir. Aynı zamanda diskin toplam açısal momentumu korunur.

## Sonuç

Dönmez ve Yıldırım'da (2009) incelediğimiz dönen karadeliklerin etrafındaki disklerin modellenmesi, bu çalışmada farklı başlangıç durumu kullanılarak diskin dinamik yapısı ve akışkanın karadelik etrafında yaptığı hareketin durumu ortaya çıkarılmıştır. Bu modeller, genel rölativistik hidrodinamik denklemlerde yüksek çözünürlüğe sahip ve şok dalgasında iyi çözüm üreten nümerik yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diskin dinamik yapısı ve oluşan şok dalgalarının diskin basıncı ve adyabatik indeksi ile değişimi bu çalışmada detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Aynı zamanda dönen ve dönmeyen karadeliklerin etrafındaki disklerin dinamik yapıları ile şok dalgalarının özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Özellikle, dönen karadeliginin dönmeyene göre karadeliğe yakın bölgelerde farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Dönen karadelik etrafındaki bükülen konum-zaman, diskin ve oluşan şok dalgalarının özelliklerini değiştirmiştir. Bunun nedeni dönen karadeliginin sahip olduğu açısal momentum, karadeliginin diskle etkileşmesi sonucunda diske aktarılarak, diskin açısal momentumunun değişimine sebep olmasıdır.



**Şekil 7.** Nümerik sonuçtan ve Kepler disk için denklemlerle elde edilen özel açısal momentumun  $r$ 'ye bağlı değişimi görülmektedir. Grafikler, dönme parametresi  $a=0.9$  olan karadeliginin etrafındaki diskin adyabatik indeksi  $\Gamma = 5/3$  olduğu zamanki açısal momentumun değişimini göstermektedir. Her ne kadar grafikler üst üste binmesede, nümerik ve teorik sonuçların davranışları aynıdır

Karadeliginin etrafındaki diskin dinamik yapısını, şok dalgalarının oluşumunu ve oluşan şok dalgalarının açılma açısını etkileyen önemli parametreler, gazın sahip olduğu adyabatik indeks ve diskin başlangıçtaki basıncıdır. Diskin basıncı karadeliğe doğru biriken maddenin birikim oranını, adyabatik indeks ise şok dalgalarının dinamik yapısını, şok dalgasının şiddetini ve oluşan bölgenin açılma açısını etkiler. Büyük adyabatik indeksli gaz daha az sıkıştırılabilir olduğundan, şok dalgası daha zayıf oluşur.

Burada modellenen disk, Bondi-Hoyle tipi yığılma disk olarak adlandırılır. Bondi-Hoyle tipi disk içeren Sgr A\*'nin merkezinde büyük kütleli karadeliklerin olduğu bilinmektedir. Bu disklerin özelliklerinin ortaya çıkarılması ve diskler üzerinde şok dalgaların oluşması fiziksel olarak önemlidir. Çünkü bu şok dalgaları QPO salınım modlarını yakalayıp sürekli bir X-ışınımı mekanizması oluşturacağından, modellemeye elde edilen sonuçlar büyük kütleli karadeliginin spinini ve kütlelerini tahmin etmede kullanılabilir. Aynı zamanda bulunan sonuçlar gözlem sonuçları ile karşılaştırılabilir. Gözlemsel verilerden elde edilen ve fiziksel doğası açıklanamayan iki frekansın oranı 3:2'nin oluşumunun fiziksel nedenleri ortaya çıkarılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, İTÜ'nün 10022007 no'lu projesi olan Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezindeki paralel bilgisayarlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## Kaynaklar

- Dönmez, O. 2004. *Ap&SS*, 293-323.
- Dönmez, O., Yıldırım, D. 2010. *A&A*, (sunuldu).
- Font, J. A., Ibanez, J. M. 1998. *MNRAS*, 298, 835.
- Font, J. A., Ibanez, J. M. A., Papadopoulos, P. 1998. *ApJ*, 507L, 67.
- Genzel, R., Schodel, R., Ott, T., Eckart, A., Alexander, T., Lacombe, F., Rouan, D., Aschenbach, B. 2003. *Nature*, 425, 934.
- Lu, J. F., Yu, K. N., Young, E. C. M. 1995. *A&A*, 304, 662.