

Ötegezegen Keşfindeki Zorluklar Soğuk Yıldızlarda Gözlenen Farklı Hız Alanları

Özgür Bastürk^{1*}, Selim O. Selam² ve Thomas H. Dall³

¹ Ankara Üniversitesi Gözlemevi, 06832 Ahlatlıbel-Ankara

² Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 06100
Tandoğan-Ankara

³ European Southern Observatory, ESO, Garching

Özet Bu çalışmada, seçilmiş bazı soğuk yıldızlar için Avrupa Güney Gözlemevi'nin (European Southern Observatory, ESO) La Silla/Şili'deki 3.6 metre birincil ayna çaplı teleskobuna bağlı, 1 m/s düzeyinde duyarlılıkla dikine hız gözlemleri yapılabilen HARPS tayfölçeri (bkz. Mayor vd. 2003) ile elde edilen yüksek çözünürlüklü tayflar üzerinde çizgi ortay (bisektör) analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu yıldızlarda gözlenen olguların yarattığı dikine hız değişimleri ile bu olguların çizgi ortayları üzerinde neden olduğu değişimler arasındaki ilişkiler incelenmiş ve bu olguların, çizgi ortayları kullanılarak olası ötegezegenlerin neden olacağı dikine hız değişimlerinden nasıl ayrılacağı tartışılmıştır.

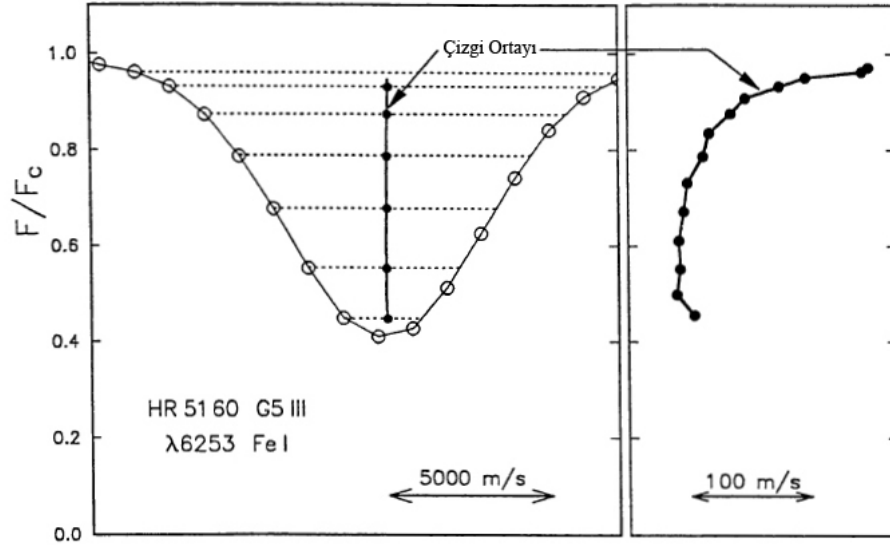
1 Giriş

Soğuk yıldızların tayflarında dikine hız değişimlerine neden olan pek çok olgu bulunmaktadır (Gray 2005). Bu olgulardan en önemlileri dönme, bulgurlanma (granülasyon), zonklama (pulsasyon), kaotik madde hareketleri, manyetik etkinlik kaynaklı lekeler gibi yıldızın doğasından kaynaklanan olgular ya da yıldıza fiziksel olarak bağlı bileşen ya da bileşenlerin var olmasıdır. Soğuk yıldızların dikine hız gözlemlerinde bu olguları birbirinden ayırt etmek, ele alınan yıldızı ya da ona bağlı bileşenleri çalışmak açısından büyük önem taşımaktadır.

Soğuk yıldızlardaki hız alanlarını çalışabilmek için radyal hız ve çizgi profil değişimlerinin iyi anlaşılması gereklidir. Çizgi profillerindeki değişimleri çalışmanın ve bu değişimleri ölçülebilir birer nicelik haline dönüştürebilmenin en iyi yollarından biri çizgi ortaylarını (bisektörlerini) çalışmaktır (Gray 1990). Bir çizginin ortayı, onun kırmızı kanadı ile mavi kanadını birleştiren ve dalgaboyu eksenine paralel doğruların orta noktalarını birleştiren eğridir (Şekil 1).

Çizgi profili asimetrisini çalışmak için yüksek çözünürlüklü ve yüksek sinyal/gürültü oranına sahip tayflara ihtiyaç duyulur. Günümüzde kullanılan yüksek teknoloji ürünü teleskop - tayfölçer sistemleri ile yüksek çözünürlüklü tayflar elde edilebiliyor olsa da soğuk yıldızlar gibi sönük cisimlerin tayfsal gözlemlerinde istenilen sinyal/gürültü oranlarına ulaşabilmek için ya çok uzun poz süreleri vermek ya da kısa poz süresi ile alınan pek çok tayfi birleştirmek

* obasturk@ankara.edu.tr



Şekil 1. Çizgi Ortayı (Bisektör) (Gray 1992)

gereklidir. Ancak, her iki seçenekte de kısa dönemli profil değişimlerinin gözlenememesi durumu ortaya çıkar. Yıldız tayflarının, tayf türüne uygun sentetik ya da parametreleri iyi bilinen gözlemsel tayflar, delta fonksiyonları ya da ikili (binary) fonksiyonlarla çapraz korelasyonu sonucu elde edilen çapraz korelasyon fonksiyonları (Cross Correlation Functions, CCF), korelasyonda dikkate alınan tüm çizgilerin ortalaması olan birer tayfsal çizgi olarak düşünülebilir (Dall vd. 2006). Bu özellikleri nedeniyle CCF, yüksek sinyal/gürültü oranına sahiptirler ve birleştirilmiş bir tayf yerine kısa poz süreli tek bir tayfı temsil edebilmeleri nedeni ile oldukça kullanışlıdır. Bir CCF profilinin ortayı, tekil çizgi ortayı ile aynı şekilde tanımlanır ve çapraz korelasyonda kullanılan çizgilerdeki profil değişimlerine duyarlıdır (Queloz vd. 2001).

Bu çalışmada, seçilmiş bazı soğuk yıldızların Avrupa Güney Gözlemevi'nin (European Southern Observatory, ESO) La Silla/Şili'deki 3.6 metre birincil ayna çaplı teleskobuna bağlı HARPS tayfölçeri ile elde edilen yüksek çözünürlüklü tayfları üzerinde çizgi ortay analizlerinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, ilk etapta HARPS arşivinde yüksek çözünürlüklü tayfsal verisi bulunan α Hor, μ Ara, ve τ Cet yıldızlarının çizgi ortay analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizgi ortay analizlerini gerçekleştirmek üzere tarafımızdan Python programlama dili ile yazılmakta olan bilgisayar kodu söz konusu yıldızların analizleri için kullanılmış, elde edilen sonuçlar literatürde çizgi ortay analizi için kullanılmakta olan başka bir bilgisayar kodu ile karşılaştırılmıştır.

2 Gözlemsel Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, α Hor, μ Ara ve τ Cet yıldızlarının HARPS arşivinde yer alan yüksek çözünürlüklü tayfları kullanılmıştır. Gözlemsel yıldız tayfları ile HARPS uzmanları ile birlikte geliştirilen bir grup şablon tayf (template) kullanılarak elde edilen ve "ortalama birer tayfsal çizgi" olarak tanımlanabilecek (Dall vd. 2006) çapraz korelasyon fonksiyonlarının (CCF) ortayları, tayfsal çizgilerde yıldızla ait mekanizmalardan kaynaklanan profil bozulmalarını belirlemek ve modellemek üzere irdelenmiştir. Bu amaçla ortay şeklini niceliksel olarak ifade etmek üzere geliştirilen çizgi ortayı ölçütlerinden yararlanılmıştır (Dall vd. 2006).

HARPS tayföçerleri ile elde edilen tayfların, tayf türüne uygun olarak seçilen ve amaca uygun tayf çizgilerini içeren delta fonksiyonu yapısındaki şablon tayflarla çapraz korelasyona tabi tutulmasıyla elde edilen çapraz korelasyon fonksiyonları her tayfın 73. basamağında yer alır. Bu fonksiyonlar, şablon tayfta yer alan çizgilerin gözlemsel tayftaki karşılıklarının bir ortalaması olarak düşünülebilen birer tayfsal çizgi yapısındadır. Bu profillerin de ortaylarını almak ve ele alınan çizgilerdeki asimetriklerin bu ortaylarda da kendini göstereceğini düşünerek bu ortayları analiz etmek mümkündür.

Bu amaçla, HARPS tayföçerleri ile elde edilen daha geniş bir grup yıldızın tayflarını çalışmak üzere bu çalışmanın da bir parçası olduğu doktora projesi kapsamında Python bilgisayar programlama dili ile geliştirilmekte olan bilgisayar kodu kullanılarak ilk etapta HARPS arşivinde bulunan üç yıldızın (α Hor, μ Ara, τ Cet) gözlemleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, Dr. Thomas Dall tarafından yine HARPS çapraz korelasyon fonksiyonlarının ortaylarını çalışmak üzere Perl programlama dili ile geliştirilen bilgisayar kodu kullanılarak elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, Python programlama dili ile geliştirilmekte olan programın ilk sonuçlarının, daha önce geliştirilmiş ve bilimsel çalışmalarda kullanılmış bulunan (Dall vd. 2006) bilgisayar kodu kullanılarak elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğunu göstermiştir.

3 Soğuk Yıldızların Tayflarında Dikine Hız Değişimine Neden Olan Etkiler

3.1 Bulgurlanma (Granülasyon)

Güneş benzeri yıldızlarda oldukça etkin olarak gözlenen bu olgu, yükselen sıcak granül hücrelerinin, alt katmanlara inen soğuk materyalle yer değiştirmesinin bir sonucudur. Yükselen sıcak hücreler gözlemcinin bakış doğrultusunda ona doğru yaklaşırken, içerdikleri maddenin soğurma sürecine katkıda bulunduğu çizgiler de maviye kayar. Bu madde daha sonra granül hücrelerinin arasından, alt katmanlara iner ve gözlemcinin bakış doğrultusunda ondan uzaklaşır ve soğurma sürecine katkıda buldukları çizgilerin kırmızıya kaymasına neden olur. Yükselen granül hücreleri daha sıcak ve parlak olduğundan katkısı (maviye kayma) daha fazladır. Her iki materyalin de soğurmada katkıda bulunduğu bir çizgi bu nedenle asimetrik olur. Asimetrik bir çizginin çizgi merkezini belirlemek, özellikle

çözünürlük düştükçe güçleşir ve bulgurlanma hareketindeki değişimlerin neden olduğu asimetri değişimleri bir dikine hız değişimi olarak algılanır. Söz konusu asimetrileri çalışmanın en iyi yolu, çizgi ortaylarını çalışmaktır. (Gray 1986).

3.2 Zonklama (Pulsasyon)

Yıldızın türüne bağlı olarak zonklama ya da zayıf salınımlar (osilasyonlar) dikine hız değişimine neden olurlar. Soğuk yıldızlarda etken mekanizma, Güneş'teki 5 dakikalık salınımlara benzer zayıf salınımlardır. Bu salınımlar çapsal ve simetrik olmadığı için gerçekleştikleri katmanda oluşan soğurma çizgilerinde asimetrilere neden olurlar.

3.3 Manyetik Etkinlik Kaynaklı Lekeler

Soğuk yıldızların manyetik etkinlik kökenli lekeleri onları çevreleyen fotosfere nazaran daha soğuktur ve fotosferde oluşan bazı soğurma çizgilerini soğurma sürecine katkıda bulunmazlar. Yıldızın dönmesi sonucu gözlemcinin bakış doğrultusuna göre konum değiştiren bu lekeler, soğurma sürecine katkıda bulunmadıkları bu çizgilerde, genellikle hatalı olarak "salma" şeklinde nitelenen hörgüç benzeri yapıların ortaya çıkmasına neden olurlar. Bu hörgüç yapısı, dönme sonucu çizgi üzerinde göç eder. Bir lekenin gözlemcinin bakış doğrultusuna dik doğrultudaki izdüşümü ne kadar büyük ya da leke fotosferden ne kadar farklı bir sıcaklıktaysa, lekenin soğurmada katkıda bulunmadığı çizgi üzerindeki asimetri (hörgüç) de o kadar büyük olur. Bu asimetriler de tıpkı bulgurlanmanın yarattığı asimetriler gibi dikine hız değişimleri olarak algılanır.

3.4 Olası Ötegezegenlerin Varlığı

Gözlenen yıldızla bağlı olası bir başka cismin varlığında, yıldızın ortak kütle merkezi etrafındaki hareketi nedeniyle tüm çizgileri periyodik olarak mavi ve kırmızıya kayar. Söz konusu cisim, yıldızın tayf çizgilerinde bir asimetriye yol açmaz. Ötegezegenler gibi cisimlerin neden olduğu dikine hız değişimleri bu nedenle çizgi asimetrileri ile birlikte gerçekleşmez. Bu noktada soğuk yıldızlarda dikine hız değişimine neden olan diğer etkilerden ayrışır. Bu nedenle, soğuk yıldızlarda dikine hız değişimi ile birlikte gerçekleşen çizgi asimetrilerini çalışmak dikine hız değişiminin kaynağını ortaya koymak ve varsa olası ötegezegenlerin keşfinin ve parametrelerinin doğru bir şekilde saptanmasını sağlamak açısından da gereklidir.

4 Çizgi Ortaylarını Kullanarak Asimetrileri Çalışmak

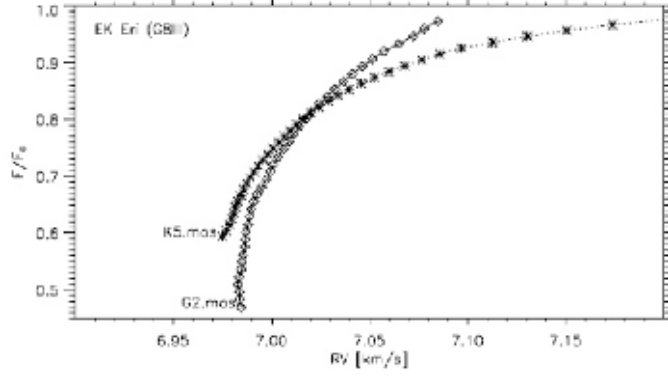
Profil asimetrilerini çalışmak için çizgi ortayları uzun süredir kullanılmaktadır (Gray 1990). Bu amaçla ortayın üzerinde farklı derinliklerdeki hızların ortalamalarını alarak oluşturulan ortay ölçütleri literatürde en sık kullanılan asimetri belirteçleridir. Bu ölçütlerden en yaygın olarak kullanılanı; çizgi ortayı

üzerinde iki akı düzeyi arasında kalan hızların ortalamaları arasındaki fark olarak tanımlanan "ortayın kapladığı hız alanı" (bisector velocity span) parametresidir (Queloz vd. 2001). Ayrıca ortay üzerinde farklı bölgeleri esas alan Ortayın Ters Eğimi (Bisector Inverse Slope, BIS), ortay eğikliği (curvature), ortayın taban hızı (bisector bottom velocity) gibi başka ölçütler de bulunmaktadır (Dall vd. 2006). Bu ölçütler ortay üzerinde farklı bölgelerdeki hızlara dayandırıldıkları için yıldız atmosferinin farklı katmanlarındaki hareketlere duyarlıdır.

Bir CCF profilinin ortayı da tıpkı tekil bir çizginin ortayı gibi tanımlanır ve çapraz korelasyonda kullanılan çizgilerdeki profil değişimlerine duyarlıdır. Profil değişimini nicel hale getirebilmek amacıyla oluşturulan ortay ölçütleri de CCF ortaylarını analiz etmek için kullanılabilirler. CCF ortayı ölçütlerinin, profil değişimlerini iyi temsil edip etmediğini anlamak üzere profil değişimlerine neden olan olgularla ilişkilerini ortaya koymak önem taşımaktadır. Dall vd. 2006 bu amaçla, CCF ortayları ile çizgi profili değişimlerine neden olan olguların başka gözlemsel sonuçları arasındaki ilişkileri sorguladılar. Çizgi profili asimetrikleri ile birlikte dikine hız değişimlerine neden olan yıldızın kendi doğasından kaynaklanan özdeğişimlerin, ortay ölçütleri üzerinde de değişime yol açtığını gördüler.

CCF ortaylarındaki değişimin dikine hız değişimleri ile korelasyonunun ötegezegen keşiflerinde, dikine hız değişiminin ötegezegen kaynaklı olup olmadığını denetlenmesinde kullanılması yaygın hale gelmiştir (Queloz vd. 2001). Daha önce çevresinde gezegen olduğu düşünülen bazı yıldızlarda dikine hız değişimlerinin yıldızların özdeğişimlerinden kaynaklanabildiği belirlenirken (Huélamo vd. 2008), bazı durumlarda da yıldıza ait etkiler ayıklandıktan sonra geriye kalan dikine hız değişimlerinin ötegezegen kaynaklı olabildiği de görülmüştür (Melo vd. 2007). Yıldızlardaki özdeğişimlerin yarattığı dikine hız değişimlerini, bu özdeğişimlerin fotometrik gözlemlerle elde edilen ışık şiddeti, renk değişimleri gibi gözlemsel karşılıklarıyla ilişkilendirmek; yıldızın tayfında özdeğişim belirteci olabilecek salma çizgilerinin varlığını sorgulamak, bulguları polarizasyon gözlemleri ve/veya yıldızın farklı dalgaboylarında yapılan dikine hız gözlemleri ile desteklemek de dikine hız değişimi yaratan etkileri birbirinden ayırt edebilmek açısından önemlidir.

CCF ortaylarının yapısı ve buna bağlı olarak ortay ölçütleri, çapraz korelasyon için kullanılan sentetik ya da gözlemsel tayflara veya seçilmiş bazı çizgilerin dalgaboyları kullanılarak üretilen ikili (binary) ya da delta fonksiyonlarının yapısına bağlılık gösterir (Şekil 2). Ayrıca çapraz korelasyon için seçilen çizgilerin olduğu atmosfer derinliği, çizginin yakınında onunla karışabilecek (blend) başka bir çizginin var olup olmadığı da CCF profilini dolayısı ile ortay ve ölçütlerini de etkiler (Dall vd. 2006). Bu nedenle çapraz korelasyon için kullanılan şablon tayfların oluşturulması ve her tayf türü için en uygun şablon tayfların seçilmesi büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2. EK Eri yıldızına ilişkin gözlemsel tayfın iki farklı tayf türüne uygun olarak hazırlanmış delta fonksiyonları ile çapraz korelasyonu sonucu elde edilmiş CCF ortayları (Dall vd. 2006).

5 HARPS Tayflarında Ortay (Bisektör) Analizi

Bu çalışmayı da içeren bir doktora projesi kapsamında HARPS tayföçerleriyle alınmış 33 soğuk yıldızın tayflarına ait CCF ortayların analizlerinin yapılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, HARPS uzmanlarıyla iletişimde ve Python programlama dili ile bir bilgisayar kodu geliştirilmektedir. Bunun için daha önceden ortay analizlerini yapabilmek üzere Güney Avrupa Gözlemevi (European Southern Observatory, ESO) çalışanlarından Dr. Thomas Dall tarafından Perl programlama dili ile geliştirilen bir bilgisayar kodu temel alınmıştır. Bu kodun önemli eksikleri bulunmaktadır. Bu çalışma dahilinde bu eksikliklerin giderilmesi ve modüler, kullanıcı dostu, güvenilir bir bilgisayar kodunun da hazırlanması amaçlanmıştır.

Geliştirilen kod, kullanılmakta olan Perl kodu gibi HARPS tayflarından CCF ortaylarının çıkarılmasını ve ortaylar üzerinde istenen ölçümlerin yapılabilmesini sağlamasının yanı sıra çeşitli yöntemler kullanılarak dikine hız ve eşdeğer genişlik ölçümlerinin de yapılabilmesini sağlayacak düzeye gelmiştir. Elde edilen sonuçların güvenilirliğini araştırmak üzere HARPS arşivinde yer alan, analiz edilecek 33 soğuk yıldızın verisine benzer nitelikteki α Hor, μ Ara, ve τ Cet yıldızlarının birer gecede alınmış tayflarının CCF ortayları, geliştirilmekte olan Python kodu ve analizlerde daha önceden kullanılan Perl kodu kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1 Ortay Analiz Kodu ile Elde Edilen İlk Sonuçlar

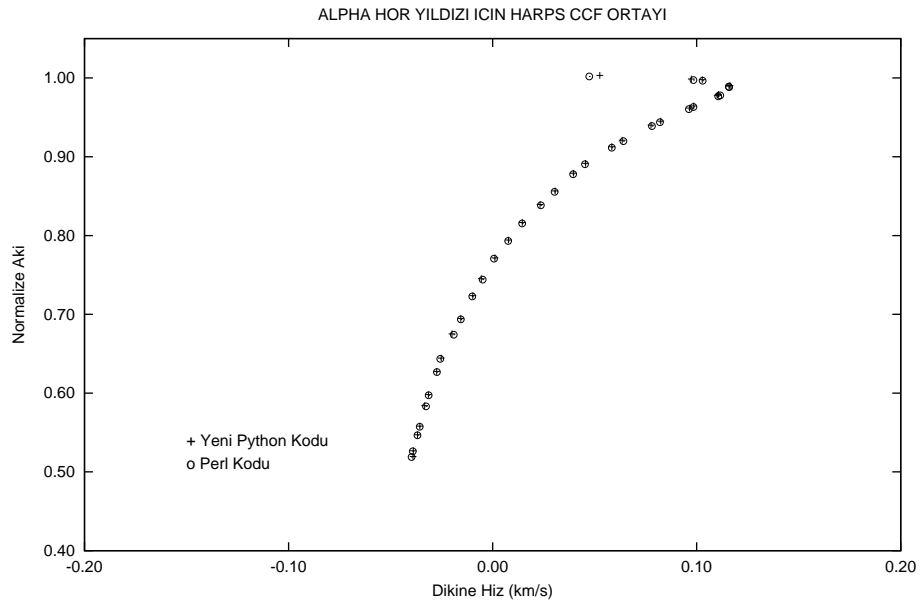
Ortayın, ölçütler elde etmek üzere analiz edilebilmesi için öncelikle CCF profilinin bir HARPS echelle tayfının 73. basamağından çıkarılması gereklidir. Bu profilde sürekliliğe normalizasyon ve profil için kullanılacak alan, Python kodu ile

kullanıcı tarafından interaktif olarak ya da komut satırından belirlenir. Ardından kod, profilin kırmızı ve mavi kanatlarındaki her bir fiziksel nokta için diğer kanatta onunla aynı akı seviyesinde bir nokta elde etmek üzere interpolasyon işlemi gerçekleştirir. Bunun için üçüncü dereceden bir spline fonksiyonu kullanır. Daha sonra her fiziksel nokta ile ona karşılık gelen interpolate noktaya karşılık dikine hızlar toplanıp ikiye bölünerek ortay noktaları hesaplanır.

Şekil 3'te HARPS tayföçeri ile 29 Ekim 2004 tarihinde alınmış α Hor yıldızının CCF profilinin tarafımızdan geliştirilen Python bilgisayar kodu ve ortay analizlerinde kullanılan ve Dr. Thomas Dall tarafından geliştirilen Perl bilgisayar kodu ile çıkarılmış ortayının bir karşılaştırması yer almaktadır. Kullanılan interpolasyon fonksiyonları ve süreklilik için seçilen bölgeler arasında küçük farklılıklar olmasına karşın ortaylar arasında uyum görülmektedir. Özellikle interpolasyon fonksiyonları arasında, veri setini temsil açısından yapılan değişiklikler kendini ortayın en üst ve en alt noktalarında göstermektedir. Ancak, her iki bölgedeki farklar büyük değildir ve farkın daha büyük olduğu sürekliliğe yakın üst bölge, ortay ölçüt hesaplarında sinyal/gürültü oranının düşük olması sebebiyle kullanılmamaktadır. Her iki bilgisayar kodu kullanılarak elde edilen CCF ortayları üzerinde yapılan ölçümler de uyum göstermekte, tarafımızdan geliştirilen kodla elde edilen ortay ölçütlerinin analiz için güvenle kullanılabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

6 Sonuç ve Değerlendirme

Çalışma bir doktora çalışması olarak sürdürülmektedir. Geliştirilen bilgisayar kodunun sonuçları literatürde ortay analizlerinde daha önce kullanılmış (Dall vd. 2006) bilgisayar kodunun sonuçları ile uyumaktadır. Kodun, başka özelliklerin de eklenmesiyle geliştirilmesi yönündeki çalışma sürmektedir. 33 soğuk yıldız için literatürde sık kullanılan tüm ortay ölçütleri elde edilecek, değerlendirilmek istenen astrofizik probleme uygun olarak yeni ölçütler araştırılacak ve bu ölçütler ile dikine hız değişimleri arasındaki ilişki sorgulanacaktır. Bu çalışma ile amaçlanan yüksek dikine hız hassasiyetine sahip bir tayföçerle elde edilen tayfların, uygun şablon tayflarla çapraz korelasyonu ile elde edilecek CCF profillerinin ortaylarının, tayfsal çizgilerde asimetri çalışmaları yapmak üzere kullanılabilirliğini belirleyerek, bu ortaylar üzerinde tanımlanan ya da tanımlanacak nicel ölçütlerden hangilerinin soğuk yıldızlarda dikine hız değişimi yaratan hangi olgulara daha duyarlı olduğunu saptamaktır. Bu amaçla, en uygun şablonları belirleyebilmek üzere HARPS uzmanları ile birlikte bir çalışma da yürütülecek ve bu şablonlar için ele alınmak istenen astrofizik probleme uygun çizgi listeleri oluşturulacaktır. Ayrıca çalışılacak soğuk yıldızlarda dikine hız değişimine neden olan olguların tayfsal ve fotometrik gözlemlerdeki diğer karşılıklarının da aranması ve bu olguların düzeylerinin saptanması da hedefler arasındadır.



Şekil 3. Farklı iki bilgisayar kodu ile elde edilen CCF ortayları

7 Teşekkür

Yazarlardan Özgür Baştürk kendisini 2211-Yurt İçi Doktora Burs Programı ile desteklemekte olan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB)'na teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- Dall, T.H., Santos, N.C., vd.: Bisectors of the Cross Correlation Function Applied to Stellar Spectra *A&A* **454** (2006) 341–348
- Gray, D.F.: The Rotation Effect - A Mechanism for Measuring Granulation Velocities in Stars *PASP* **98** (1986) 319–324
- Gray, D.F.: High Resolution Spectroscopy Why How and What For *MmSAI* **61** (1990) 503–511
- Gray, D.F.: Stellar Convection: The Observations *ASPC* **26** (1992) 127–138
- Gray, D.F.: The Observation and Analysis of Stellar Photospheres Cambridge University Press (2005) 3rd edition
- Huélamo, N., Figueira, P.: TW Hydrae: evidence of stellar spots instead of a Hot Jupiter *A&A* **489** (2008) L9–L13
- Mayor, M., Pepe, F., vd.: Setting New Standards with HARPS *Messenger* **114** (2003) 20–24
- Melo, C., Santos, N.C., vd.: A New Neptune Mass Planet Orbiting HD219828 *A&A* **467** (2007) Issue:2 721–727
- Queloz, D., Henry, G.W., vd.: No Planet for HD 166435 *A&A* **379** (2001) 279–287
- Queloz, D., Mayor, M.: A Jupiter-mass companion to a solar-type star *Nature* **378** (1995) 355–359