


Yıldız İç Yapı Modelleri için Yüzey Yama Modelleri

Nesibe Özel^{*} 

Erciyes Üniversitesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri, 38280 Talas, Türkiye

Accepted: May 13, 2022. Revised: May 12, 2022. Submitted: April 12, 2022.

Özet

In stellar evolution calculations, a well-known problem in comparing observed and model-calculated frequencies comes from the hard-to-model near-surface layers of stars. Models usually employ simplified model atmospheres, and mixing length theory is used to describe convection which leads to errors in the structure of the superadiabatic region. Moreover, model oscillation frequencies calculated in the usual adiabatic approximation neglect the effects of turbulent pressure. Convection in the superadiabatic region is commonly treated with the mixing length theory (MLT). However, as a result of non-local non-linear nature of surface convection, MLT cannot correctly model this complex region. The upper boundary conditions near the optical surface do not agree with asteroseismic observations. This is reflected in asteroseismology as so-called near-surface effects, when stellar structure models are compared with p-mode oscillation frequencies. Therefore, we want also to improve how the outer boundary conditions are determined in stellar structure calculations. We study realistic 3D stellar atmosphere models. We precisely match stellar models to the effective temperature, the gravity at the photosphere, and the temperature at the temporally and horizontally averaged pressure at deepest point of the 3D simulations. We then replace the near-surface structure with that of the averaged simulation and compute the change in the oscillation mode frequencies.

Abstract

Yıldız evrim hesaplamalarında, gözlem ile modelden hesaplanmış teorik frekansların karşılaştırılmasında en iyi bilinen problem yıldızların yüzey-yakın katmanlarının modelleme zorluğundan kaynaklanır. Modeller genelde basitleştirilmiş model atmosferlerini ve, süperadibatik bölge yapısında hatalara sebep olan konveksiyon tanımında, karışım uzunluğu teorisini kullanır. Dahası, genel adyabatik yaklaşımda hesaplanan model salınım frekansları türbülant basınç etkilerini ihmal eder. Süper adyabatik bölgede konveksiyon genelde karışım uzunluğu teorisi (MLT) ile ele alınır. Fakat, yüzey konveksiyonunun lokal-olmayan ve lineer-olmayan doğasının bir sonucu olarak, MLT bu karışık bölgeyi doğru bir şekilde modelleyemez. Optik yüzeye yakın üst sınır koşulları asteroseismik gözlemler ile uyumsuz. Yıldız yapı modelleri p-mod salınımları ile karşılaştırıldığı zaman, bu asteroseismolojiye sözde yüzey-yakın etkileri olarak yansır. Sonuç olarak, yıldız yapı hesaplamalarında üst sınır koşullarının nasıl belirlendiğini iyileştirmek istiyoruz. Biz gerçek 3D yıldız atmosfer modellerini çalışıyoruz. Bunun için hassas bir şekilde yıldız modellerini fotosferik etkin sıcaklık ve çekime ve 3D simülasyonlarının en derin noktasında zamansal ve yataysal olarak ortalanmış basınçtaki sıcaklık değerine eşleştiriyoruz. Daha sonra yakın-yüzey yapısını bu ortalanmış simülasyon ile yer değiştirip mod frekanslarındaki değişimi hesaplıyoruz.

Anahtar Kelimeler: Stars:oscillations – Stars:solar-type – Stars:atmospheres-convection

1 Giriş

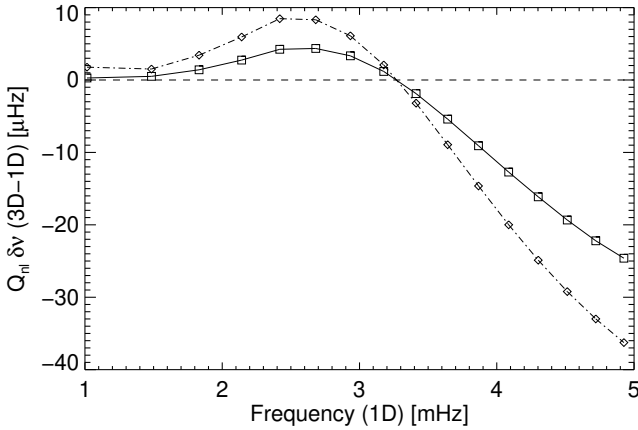
CoRoT (Michel et al. 2008) ve Kepler (Borucki et al. 2010) uzay misyonlarının gösterdiği gibi, güneş-benzeri salınımlar (güneş-benzeri titreşim frekansları) anakoldan kırmızı devlere kadar düşük kütleli konvektif zarfa sahip yıldızlarda bulunur. Bu frekanslar yıldız iç yapısını incelemeye yaygın olarak kullanılmıştır ve yıldız yapı ve evrimi üzerine güçlü belirleyiciler koymakla birlikte yıldız iç yapı fiziği hakkındaki bilgimizi geliştirmeye olanak sağlamıştır.

Diğer taraftan, yıldız evrim teorisinde SAR (super adyabatik region - süper adyabatik bölge) bölgesi temel belirsizlik kaynağıdır. Bu Astrosismoloji'de (Asteroseismoloji) yakın-yüzey etkileri olarak adlandırılır. Bu genel terim, güneş benzeri yıldızların en üst katmanlarına ilişkin yetersiz fiziksel tanımlamamız nedeniyle, gözlemlenen ve model frekansları arasındaki sistematik farklılıkları tanımlar. Bu yakın-yüzey

etkilerinin temel bileşenlerinden biri türbülanslı basınçtır. Bu parametre standart yıldız denge yapısı ve salınım modellerinde, modellenmesi zor olduğu için genellikle ihmal edilir. Yine de bu parametre, yıldız modellerinin doğru frekanslarını elde etmek ve özellikle yüzey katmanlarına çok duyarlı olan p modları için önemli bir faktördür.

Daha doğru yıldız yapı modelleri astrofiziğin bir çok alanı için önemlidir: örn. evrenin yaşının hesaplanması, yıldız kümelerinin kimyasal gradientlerinin belirlenmesi, ve dış gezegenlerin karakterize edilmesi. Dolayısıyla, çok hassas bir analiz teorik modellerdeki çıktı ile gözlemsel frekansların detaylı bir karşılaştırmasını kapsar. Böyle bir karşılaştırmadaki zorluk, belirtildiği gibi gözlemlenen ve hesaplanan salınım frekansları arasında sistematik farklılık olarak ortaya çıkan ve artan frekansla daha da büyüyen, diğer adıyla yüzey etkileridir (surface effects) (Christensen-Dalsgaard & Thompson 1997). Yüzey etkileri öncelikle yıldızda konveksiyonun önemli bir rol aldığı yüzeye yakın katmanların eksik modellenmesinden

* tjaa@tad.org.tr



Şekil 1. Standart ve yama güneş zarf modelleri arasındaki frekans farklılıkları -yama-standart anlamında. Gri eğri $\ell = 100$ modları için farklılıkları gösterir, siyah eğri mod eylesizliği yardımıyla $\ell = 0$ göre ölçeklendirilmiş farklılığı örneklerdir.

kaynaklanmaktadır, ve en iyi standart güneş modellerinde bile görülmektedir (bkz. Şekil 1).

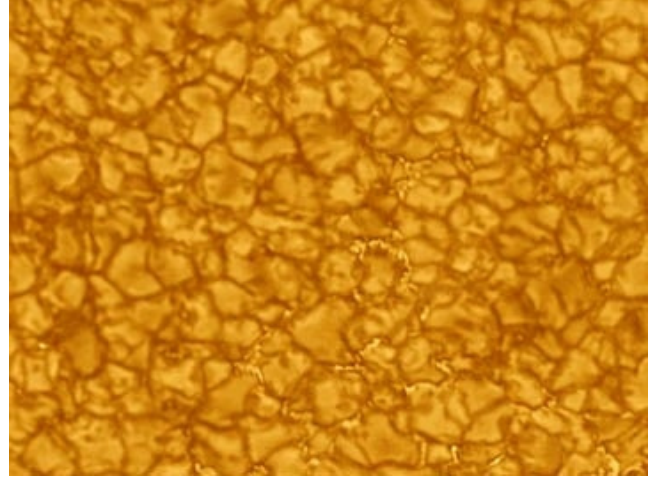
Dolayısıyla, yüzey konveksiyonunun lokal-olmayan ve lineer-olmayan modellemesinin sonucu olarak, karışım uzunluğu teorisiyle ele alınan (MLT, Böhm-Vitense 1958) yıldız yapısının üst kısmındaki konveksiyon (süperadyabatik bölge) yıldız evrim hesaplamalarında önemli bir belirsizlik kaynağıdır. Bu teori (MLT) yıldız yapısını, konveksiyonun etkisiz ve sıcaklık gradientinin güçlü bir şekilde süperadyabatik olduğu sadece aşağı yukarı yüzeye yakın kısmını tahmin eder.

Bizim tek-boyutlu (1D) modellerde bu eksikliğin ele alınması, konveksiyonun karışım uzunluğunun ele alımı için geniş üç-boyutlu (3D) sonuçları atmosfer modellerinde yerine koymamızı gerektirir. Bir çok grup (Magic 2016; Sono et al. 2015; Trampedach et al. 2013; Beeck et al. 2013; Ludwig et al. 2009), 3D simülasyonlarla yıldızların konvektif bölgelerinin dış kısımlarını modelledi. Bu çerçevede, biz güneş-benzeri parlak yıldızların modellerini iyileştirmek için, 3D simülasyonlarla (CIFIST, Ludwig et al. 2009) hesaplanan dış katmanları 1D yıldız iç yapı modellerine (CESTAM Marques et al. 2013) dahil etmek niyetindeyiz. Bu çalışma yıldız modellerinin gerçeğe daha yakın ve astrosismik çalışmalar için daha uygun hale gelmesini sağlayacaktır.

2 Method

Diğer herhangi bir yıldızda olmayan gözlemlerinin kalitesi ve çeşitliliğinden dolayı, Güneş doğal bir başlama noktasıdır. Teorik modeller üzerine sıkı belirleyiciler koyan bütün bu gözlemler konveksiyon simülasyonlarını doğrulamak yada çürütmek için paha biçilmezdir. Güneş yüzey bulgurlanması direkt olarak görülebilen ve zaman içinde takip edilebilen tek yıldızdır ve konveksiyonun Güneş yüzeyindeki manifestosu bulgurlanmadır (bkz. Şekil 2).

Bu çerçevede biz öncelikle Güneş'i referans olarak, yüzey konveksiyonunu 3D hidrodinamik simülasyonlar ve geleneksel 1D MLT tanımıyla ele alıyoruz. Her iki yaklaşımda bize Güneş ve güneş-benzeri yıldızların üst konveksiyon katmanının ortalama dikey yapısını sağlar. 3D simülasyonlarda, ortalama dağılım radyatif ve konvektif enerji taşınımını ve etkileşimini, türbülant basıncı ve magnetik alanı dahil eder. Bu etkiler konvektif



Şekil 2. Güneş bulgurlanması fotosferde gözlemlenen yapılardan birisidir, BBSO'da (Big Bear Solar Observatory) New Solar Telescope tarafından alınmıştır.

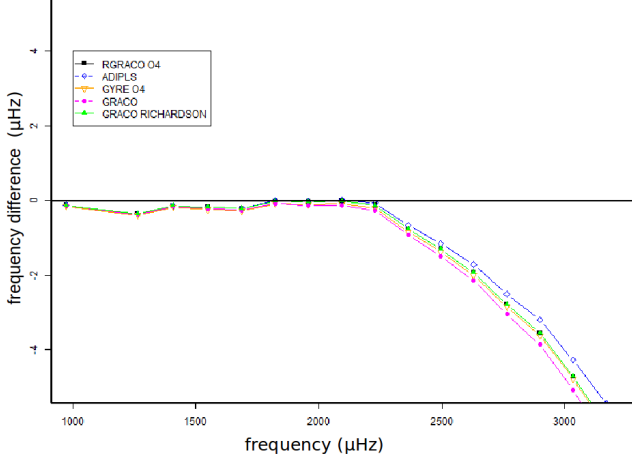
katmanın hemen üstü ve fotosferi diğer bir ifadeyle yıldız sınır değer-koşullarını etkiler. Konveksiyonun ele alınmasının yıldız yapısı ve özgül-frekanslar üzerindeki etkisini ele almak için, yüzey konveksiyonunun geleneksel MLT tanımı çerçevesinde ayrıca 1D güneş modelleri hesaplanır. MLT modellerini iyileştirmek için, ilk olarak 3D simülasyonları ve daha sonra 1D yıldız modellerini ve 3D hidrodinamik simülasyonların nasıl 1D hidrostatik modellere dahil edildiğini tanımlıyoruz.

2.1 3D RHD modelleri

Bir yıldız denge modelinin hesaplanmasında kullanılan yıldız evrim kodları (örn, CESTAM, MESA, ASTEC, vs.) bir-boyutludur. Bu yıldız denge modelinin özgül-frekanslarının hesaplanması için bir salınım koduna (pulsational code) ihtiyaç vardır. Dünya'da genelde bütün bu kodlar bir-boyutludur. MLT teorisi kullanılarak hesaplanan bir denge modeli hesaplandıktan sonra, bir salınım kodu ile bu model analiz edilmektedir. Salınım kodlarının çoğu, konveksiyonun özel ele alınmasına sahip bir yöntemle sahip değildir. Fakat, bazıları salınımlar için MLT'ye eşit metodlara sahiptir, örneğin, Zamana Bağlı Konveksiyon (Time Dependent Convection – TDC). TDC ise MLT'nin tedirgin edilmiş durumudur.

Uzun bir süredir Güneş ve diğer soğuk yıldızların yakın-yüzey konveksiyonu basit bir şekilde tanımlanarak 1D MLT teorisi ile ifade edilmiştir. Bu teori kompleks konvektif hareketleri, " ℓ " radyal uzaklığını gidip gelen gaz kabarcıkları ile tanımlar, öyleki bu " ℓ " den sonra çevresi etrafına çözünerek gaz kabarcığı kimliğini kaybeder ve kabarcık çözünürken fazla enerjisini etrafına yayar (yada aşağı doğru inerken, ısı açığını çevresinden soğurur). Bu karışım uzunluğu " ℓ " bilinmeyen serbest bir parametredir ve basınç yükseklik ölçeğinin (H_p) bir faktörü olduğu varsayılır, yani radyal uzaklık/yükseklik değitkçe basınç exponansiyel olarak azalır. ($H_p = |dr/d\ln P| = P/\rho g$ ve $\ell = \alpha H_p$ olarak ifade edilir. MLT teorisi içerisinde, gerçek sıcaklık gradienti karışım uzunluğu parametresi α değerine bağlıdır ve pratikte Güneş'in kalibrasyonundan elde edilir.

Diğer taraftan konveksiyon 3D bir fenomendir. Kütlelen hareketidir ve 1D tanım kaba bir yaklaşım sunmaktadır. Şuan,



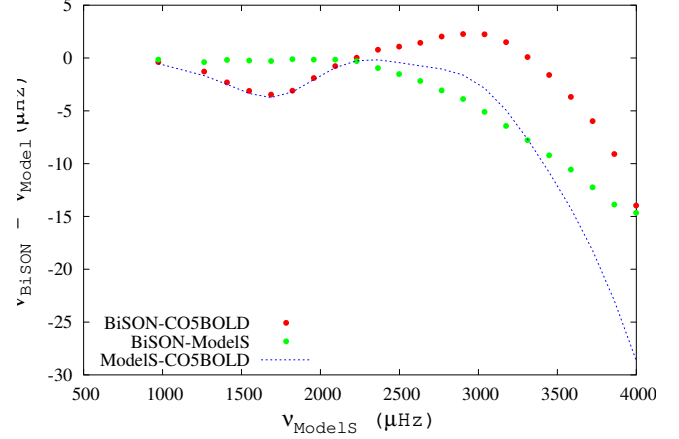
Şekil 3. Güneş'e ait BiSON (Broomhall et al. 2009) gözlemleri ve ModelS (Christensen-Dalsgaard et al. 1996) için farklı kodlardan hesaplanan frekanslar (açısal derece $\ell = 0$) arasındaki farkın mod frekansları ile karşılaştırılması. RGrCo GraCo kodunun yeni versiyonudur, GraCo Richardson Richardson extrapolasyonu kullanılarak düzeltilmiş standart GraCo sonuçlarıdır.

konveksiyonun 3D ele alınması çok daha uygun görülmektedir. Fakat, (bütün bir yıldız için) 3D bir salınım kodu yoktur. Dolayısıyla, biz MLT'ye alternatif olarak, konveksiyonun 3D bir modelini yaparak bu 3D modelin 1D projeksiyonunu ele alıyoruz. Bu 1D projeksiyon (optik derinlik üzerinden yataysal ve zamansal olarak ortalanan) standart yıldız denge modeline dahil edilir. Buna yama (patched) modelleri denir.

Sonuç olarak, 1D denge modeli elde edilir (burada konvektif katman 3D modelin 1D projeksiyonudur) ve örneğin ADIPLS (Christensen-Dalsgaard 2011), GraCo (Moya & Garrido 2008) gibi standart 1D salınım kodları ile analiz edilebilir. Bütün salınım kodları aşağı-yukarı aynı sonuçları sağlar (bkz. Şekil 3). Farklar, farklı çözünürlük seçenekleri kullanıldığında ortaya çıkar: örn. farklı dış sınır koşulları, integrasyon şeması, integrasyon değişkeni, Eulerian veya Lagrangian yaklaşımları, vd. GraCo'da tüm bu seçenekler uygulanmıştır ve değiştirilebilir. Ayrıca GraCo'nun avantajı adyabatik olmayan hesaplamalardan kaynaklanmaktadır. Ancak adyabatik olanlar için tüm kodlar aynıdır. Bununla birlikte, mevcut seçenekler açısından GraCo kodu en eksiksiz olanıdır. Bu çerçevede çalışmamızda, lineer ve non-lineer adyabatik yıldız salınımları Graco salınım kodu ile hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada, yakın-yüzey konveksiyonun simülasyonları Freytag et al. (2012) tarafından CO5BOLD kodu ile hesaplanmaktadır. CO5BOLD Güneş ve diğer radyatif soğuk yıldızların yakın-yüzey konveksiyonunun üç-boyutlu radyatif hidrodinamik simülasyonlarını sağlayan nümerik bir koddur. Bu simülasyonlar yıldızın dış katmanlarındaki makroskopik gaz akışının ve fiziksel dağılımının "gerçekçi" bir temsiliyi sağlamak için gray-olmayan (non-gray) ve lokal-olmayan radyatif transfer dahil 3D-boyutlu, zamana-bağlı, sıkıştırılabilir hidrodinamik, kısmi iyonizasyon ve molekül oluşum fiziklerini dahil eder. Adapte olunan kimyasal karışım (Asplund et al. 2009) tarafından belirlenen güneş bollukları ile aynıdır.

Burada standart güneş modeli olarak heliyosismik ve astrosismik çalışmalarda oldukça geniş bir şekilde kullanılan ve "MoleS" olarak bilinen güneş modelini referans model olarak



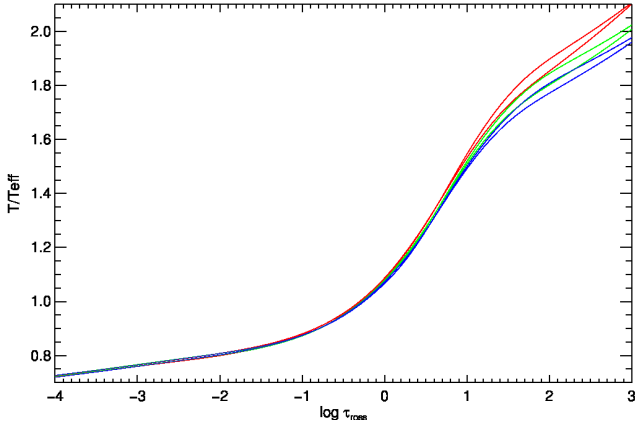
Şekil 4. Güneş'e ait radyal ($\ell = 0$) BiSON gözlemleri ve önce ModelS frekansları (yeşil noktalar) ile sonra CO5BOLD simülasyonu ile yataysal ve zamansal ortalaması alınmış yüzey katmanlarının yer değiştirilmesi sonucu elde edilmiş yama ModelS frekansları (kırmızı noktalar) farklılıkları.

ele aldık. Kısaca, "Standart" güneş modeli, bir dizi basitleştirici varsayıma ve Güneş'teki maddenin fiziksel özelliklerinin bilgisine dayanır. Model OPAL durum ve saydamsızlık (opaklık) denklemlerini kullanır, ve helyum ve ağır elementlerin çekimsel çökmesini (settling) içerir. Verilen fizikte, literatürdeki diğer standart güneş modellerine göre, Model S'deki ses hızı Güneş için %0.5'ten fazla farklı olmadığı ve modelin yoğunluğundaki hatanın %2'nin altında olduğu görülmüştür (Christensen-Dalsgaard et al. 1996). Dolayısıyla, §2.1'de geliştirdiğimiz bütün bilgisayar programlarımız ModelS üzerinde test edilmiştir (bkz. Şekil 4).

2.2 Eşleştirme metodu

Adyabatik 1D modeli eşleştirmek için, biz bir kaç adım gerçekleştirdik. 1D hidrostatik yıldız iç yapı modeline iyi bir şekilde en iyi 3D radyatif hidrodinamik yıldız atmosfer modelinin eşleştirilmesini ince bir şekilde bulmak için, Güneş'in yama olmamış modellerinin (non-patched models) kalibrasyonunu gerçekleştirdik. Biz CESTAM kodunu kullanarak yama olmamış modeller kümesini (grid) fotosferdeki etkin sıcaklık T_{eff} ve yüzey gravitesine $\log g$ fit ederek hesapladık. Herbir kalibrasyon için, 1.5 ve 2.0 aralığında ve 0.1 artırımlarla sabitlenmiş karışım uzunluğu parametresine (α) sahip modeller için, kütle ve yaşı optimize ettik. Dahası, Güneş'in 3D-1D yıldız yapısı için daha doğru model ve eşleşme noktası belirlenmesinde, α 'yı bu aralıkta 0.01 hassasiyetinde kalibre ettik. Daha sonraki detaylı model hesaplamalarımızı, fotosferdeki etkin sıcaklık, kütleçekim ivmesi (gravite) ve zamansal ve yataysal ortalanan 3D katmanların alt kısmındaki ($\log P = 9.0$ 'da) sıcaklığı da dahil edip üç belirleyici olarak bir kalibrasyon gerçekleştirdik ($T_{\text{eff}}, \log g, T$). $\log g$ 'deki belirsizlik 0.001 dex, ve sıcaklıklardaki belirsizlik 0.7 K (Beck et al. 2013) olarak alındı.

Şekil 5'te HR diyagramındaki pozisyonlarının etrafında altı 3D model için $T(\tau)$ ilişkisinin değişimini örneklerdir. Söz konusu modelin sıcaklık profilini etkin sıcaklık ile ölçeklendirdikten sonra, optik olarak kalın bölgelerde farkedilebilir bir değişim kalıyor ($\tau 1 - 3$). Bu, düşünülen etkin



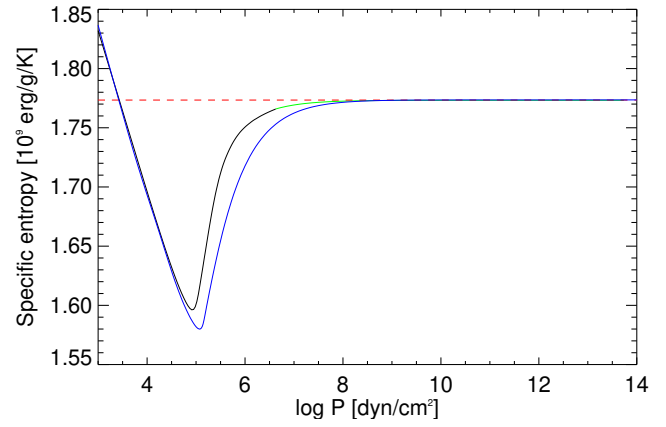
Şekil 5. Altı 3D model için $T(\tau)$ -ilişkisi. Güneş metal bolluğu altı 3D model için, $T/T_{\text{eff}} \approx 5000$ K, mavi ≈ 5900 K. Yüzey çekim ivmeleri $\log g=4.0$ and 4.5 . Modeller HR diagramında α Cen A ve B bulunduğu alanı kaplar.

sıcaklık ve yüzey çekim aralığı üzerinde model özelliklerinin önemsiz olmayan bir değişimi olduğunu önceden gösterir.

Frekans farklılıklarının hesabı genelde yüzeyi değiştirilmiş tam yıldız modelleri düşünülerek yapılır. Diğer bir açıyla yama olmamış, yani standart model, ve yüzey yapısı yataysal ve zamansal olarak ortalanmış 3D yapıyla yüzey yapısı yer değiştirilmiş yama model düşünülür. Ortaya çıkan tipik bir problem yapılanmada kullanılan iç ve dış modeller arasındaki fizik farklılıklarıdır. Durum eşitliği ve saydamsızlıklar (opasiteler) tutarlı değildir. Bu sebepten dolayı, **Rosenthal et al. (1999)** tarafından öne sürülen bir yaklaşımla başlamaya karar verdik. Konvektif katmanın zarf kısımlarını oluşturduk (bir merkezi sınır koşuluna bağlı olmayan), ve bu bölgeye sıkışmış olan yüksek dereceli salınım modlarını ($\ell = 100$) düşündük. Mikro-fiziği 3D model ile tamamen tutarlı mevcut zarf koduna sahip olmamız rasyoneldi. Kepler tarafından gözlemlenen modların düşük- ℓ modlu frekanslarını elde etmek için, $\ell = 100$ ve $\ell = 0$ modlarının mod eylemsizlik (mode inertia) oranıyla ölçeklendirdik.

Şekil 6 yama prosedürümüzü gösterir. Siyah çizgi yataysal ve zamansal olarak ortalanmış 3D profildir. Ortalama sabit geometrik derinliğin (z) yüzeyleri üzerinden yapıldı. Fakat, bu tip bir ortalamanın şu anda en uygun bir tip olup olmadığı bilinmiyorsa, biz burada yaygın uygulamayı takip ettik. Yüzey katmanlarının ortalama yapısının yanısıra, 3D modeller zarf yapısının diğer bir anahtar özelliğini sağlar: zarfın derin kısımlarının, zarfın neredeyse adyabatik olarak dağılmış/katmanlaşmış kısmın, adyabatik entropisi S_{ad} . Bunun mümkün olmasının sebebi **Steffen (1993)** tarafından bulundu, ve daha sonra **Ludwig et al. (1999)** tarafından karışım uzunluğunun kalibrasyonunda uygulandı. Eşleşme noktasındaki aynı termodinamik koşulların yanısıra, biz ayrıca yama olmuş ve olmamış modellerin aynı adyabatik entropiye S_{ad} sahip olmasını istedik. Bu, modelleri gerçek yıldızın entropisine S_{ad} ve dolayısıyla konvektif zarfın yarıçapa doğru katkısını getirmelidir.

Şekil 6'da gösterildiği gibi, ortalama 3D yapısı alt katmanlarında adyabatige yakın değildir. S_{ad} (şekilde kırmızı kesik çizgiyle gösterilir) için boşluğu köprülemek için, karışım uzunluğu teorisiyle (MLT, yeşil) 3D profilini extrapole ettik.



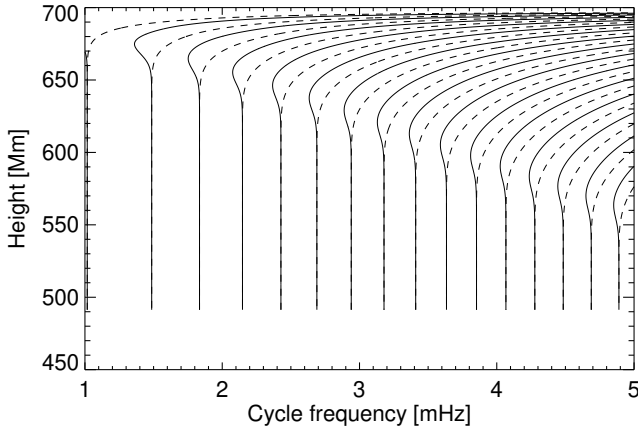
Şekil 6. Güneş test modelleri için basınca karşı entropi. Asimtotik entropi S_{ad} kırmızı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Siyah eğri 3D simülasyonunun profilini gösterir ve yeşil çizgi karışım uzunluğu teorisi yardımıyla extrapolasyonu temsil etmektedir. Mavi eğri bir standart zarf modelini temsil etmektedir.

Biz MLT profillerinin 3D yapısının altındaki termodinamik koşullara ve zarfın derin kısımlarındaki asimtotik entropiye karşılık gelmesini istedik. Bu şekilde, interpolasyondan daha ziyade extrapolasyondur. Bu eşleşmeyi elde etmek için, 3 ve 4 aralığında daha yüksek bir karışım uzunluğu parametresinin α_{MLT} gerekliliği önemlidir. Bu zarf modelinin (mavi eğri) S_{ad} ile eşleşmesi için gerekli ≈ 1.7 in değeri ile karşılaştırılmalıdır. Bu tüm entropi zıplamaları kalibre edildikten sonra bile 3D'da konveksiyon etkinliğinin MLT ile mükemmel bir şekilde yakalanmadığı gerçeğinin bir sonucudur.

İki zarf modelini oluşturduktan sonra, $\ell = 100$ modları için özgül-frekansları hesapladık. Bu konvektif zarfın derinliği üzerinden 2000 grid noktasıyla (katman sayısı) ince bir ağ üzerinden standart adyabatik salınım eşitlikleri Cowling yaklaşımı yapılarak çözüldü. 3D etkiler yüzünden mod fiziğindeki (frekansların adyabatik yaklaşımı üzerindeki) değişiklikler düşünülmedi. Özellikle, adyabatik index Γ_1 3D profilinin ortalama sıcaklık ve basıncından hesaplandı. Şekil 7 elde edilen mod yapısını göstermektedir. Zarf modelindeki aynı ruhla, salınım eşitliği bir iç sınır koşulu düşünülmeden, dolayısıyla özgül-frekansları sağlamadan, yüzeyden aşağı entegre edildi. Bu ikinci aşamada yapıldı. İç sınır koşulunun ihmal edilmesi şekildeki gibi düğüm noktalarının (nodes) konumlarını frekansın (ve derinliğin) sürekli fonksiyonu olarak grafiklendirmemize olanak sağladı. Burada daha derinlerdeki düğüm çizgilerinin dikey koşusu özgül-modların sönümlenme karakterini gösterir. Bir yan nokta olarak, Şekil 7 artan mod frekansıyla artan yansıma derinliğini (ve buna karşılık modun daha yüksek derecesini) örneklemektedir.

Şekil 1 bizim yama olmuş ve olmamış güneş zarf modelleri arasındaki frekans farklılıklarının ön sonuçlarını göstermektedir. Farklılıkların büyüklükleri literatürde (**Rosenthal et al. 1999**) in sonuçları ile uyumludur. Mevcut olmayan özellik 2.5 mHz etrafındaki küçük pozitif farklılık bölgesidir. Tüm yıldız modelleri düşünüldüğünde bunun kalıp kalmaması görülmeye ihtiyaç duyar. $\ell = 100$ modlarını $\ell = 0$ a ölçeklendirmek için kullanılan mod eylemsizliği, Q_{nl} , (mode inertia) **Christensen-Dalsgaard et al. (1996)**'ın mod S'inden alındı.

Tüm yıldız modelleri hesaba katılarak, adyabatik salınım frekansları GraCo kodu kullanılarak yama-olmuş ve olmamış

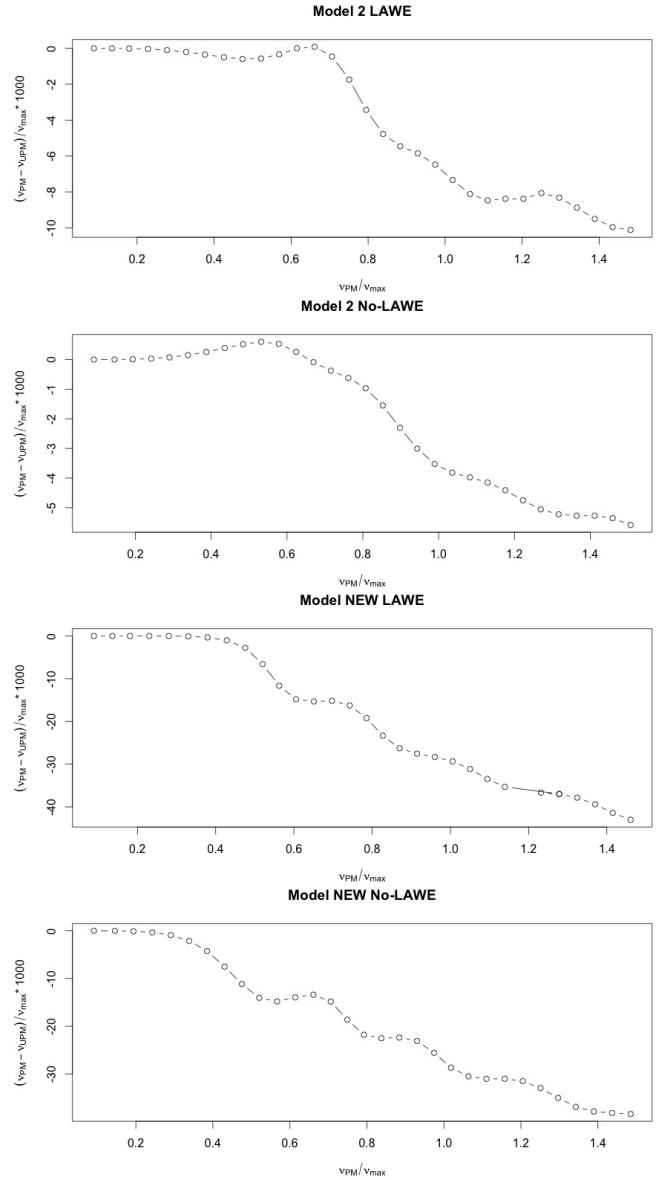


Şekil 7. Güneş zarf modelinde $\ell = 100$ için salınım eşitliklerinin çözümü için düğüm çizgileri. Düz çizgiler yerdeğıştirmenin ($\xi = 0$) düğümünü gösterir, kesikli çizgiler Eularian basınç tedirginliğinin ($p_1 = 0$) düğümünü gösterir. Konvektif zarfa sıkışmış özgül-modlar zarfın daha alt kısmındaki düz dikey düğüm çizgilerini sergilemektedir.

modellerin herikisi için hesaplanmış ve Şekil 8 üst iki panelde (Model2) ve alt iki panelde (Model-new) için gösterilmiştir. Diğer taraftan modellerden elde edilen sonuçlar şimdilik literatürde yapılan benzeri çalışmalara göre umut edilen sonuçları tam olarak sağlamamıştır. Bununla birlikte bazı nümerik problemlerle karşılaşmıştır. Şuan ki çalışmalar olası problemleri araştırmaya ve çözüme yöneliktir. Çalışmalarımız yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmalarımızı bir sonraki makalemizde ele alacağız.

Kaynaklar

- Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Scott P., 2009, *ARA&A*, 47, 481
- Beecq B., Cameron R. H., Reiners A., Schüssler M., 2013, *A&A*, 558, A48
- Böhm-Vitense E., 1958, *Z. Astrophys.*, 46, 108, *ADS*
- Borucki W. J., et al., 2010, *Science*, 327, 977
- Broomhall A.-M., Chaplin W. J., Davies G. R., Elsworth Y., Fletcher S. T., Hale S. J., Miller B., New R., 2009, *MNRAS*, 396, L100
- Christensen-Dalsgaard J., 2011, ADIPLS: Aarhus Adiabatic Oscillation Package (ADIPACK), Astrophysics Source Code Library (ascl:1109.002)
- Christensen-Dalsgaard J., Thompson M. J., 1997, *MNRAS*, 284, 527
- Christensen-Dalsgaard J., et al., 1996, *Science*, 272, 1286
- Freytag B., Steffen M., Ludwig H.-G., Wedemeyer-Böhm S., Schaffenberger W., Steiner O., 2012, *Journal of Computational Physics*, 231, 919
- Ludwig H.-G., Freytag B., Steffen M., 1999, *A&A*, 346, 111, *ADS*
- Ludwig H.-G., Caffau E., Steffen M., Freytag B., Bonifacio P., Kučinskas A., 2009, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 80, 711, *ADS*
- Magic Z., 2016, *A&A*, 586, A88
- Marques J. P., et al., 2013, *A&A*, 549, A74
- Michel E., et al., 2008, *Science*, 322, 558
- Moya A., Garrido R., 2008, *Ap&SS*, 316, 129
- Rosenthal C. S., Christensen-Dalsgaard J., Nordlund Å., Stein R. F., Trampedach R., 1999, *A&A*, 351, 689, *ADS*
- Sonoi T., Samadi R., Belkacem K., Ludwig H.-G., Caffau E., Mosser B., 2015, *A&A*, 583, A112
- Steffen M., 1993, in Weiss W. W., Baglin A., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 40, IAU Colloq. 137: Inside the Stars*. p. 300



Şekil 8. (Üst iki panel) Model 2 için linear adyabatik dalga eşitliklerine (Linear Adiabatic Wave Equations-LAWE) ve tüm salınım eşitliklerine (No-LAWE) göre hesaplanmış Yama (patched) ve yama-olmamış (unpatched) modeller arasındaki radyal ($\ell = 0$) modlarının v_{max} 'a göre ölçeklendirilmiş frekans farklılıklarının v_{PM}/v_{max} 'in fonksiyonu. (Alt iki panel) Model-new için hesaplanmış frekans farklılıkları.

Trampedach R., Asplund M., Collet R., Nordlund Å., Stein R. F., 2013, *ApJ*, 769, 18

Access:

M22-0321: *Turkish J.A&A* — Vol.3, Issue 3.