

GÜNEŞ KABUĞUNUN MANYETO-HİDRODİNAMİK MODELLENMESİ

Hüseyin ÇAVUŞ¹, Aysel KARAFİSTAN², YEŞİM BÜYÜKATEŞ³

Özet

Bu çalışmada doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (non-linear) durumlarda sıkıştırılmaz akışkan tanımını kullanarak Güneş kabuğunun % 30'luk kısmını oluşturan konvektif bölgesindeki fiziksel değişimler manyeto-hidrodinamik (MHD) denklemleri kullanarak incelenmiştir. Fiziksel çokluklardan *yoğunluk*, *basınç*, *sıcaklık* ve *manyetik alanın* zamana ve yarıçapa bağlı değişimleri Maple 8 paket programı kullanılarak incelenmiştir. Doğrusal çözümler aranırken MHD denklemlerinde birinci mertbe perturbasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Doğrusal olmayan çözümlerde ise küresel simetrik bir Güneş Modeli için bu denklemlerin analitik çözümleri irdelenmiştir. Çözümlerde Standart Güneş Modeli (SGM) olarak dönme ve manyetik alan içermeyen hidrostatik denge durumu dikkate alınmıştır.

Abstract

In this study, considering the Sun as an incompressible fluid, our objective was to investigate the variation of the physical changes in the 30 % outermost convective solar layer with the use equations of magneto-hydrodynamics (MHD) for both linear and non-linear cases. Maple 8 was used for studying the changes in density, pressure, temperature and magnetic field with respect to time and radius. The first order perturbation approximation was used in MHD equations while we examine the linear case. For non linear case, the Sun was accepted as a spherically symmetric star and the analytical solutions of these equations were obtained. Hydrostatics equilibrium state was taken as a Standard Solar Model (SSM) excluding both rotation and magnetic field.

1. Giriş

Güneşin manyetik alanı, yaklaşık elli yıldır Güneş fiziğinin en çok ilgi çeken konularından biri olmuştur. (örneğin [1] ve[2]). Son yıllarda bulunan sonuçlara göre konvektif bölgenin tabanında depolanmış manyetik alan, Güneş'te meydana gelen etkinliklerin sebebi olarak gösterilmektedir [3]. Bu amaçla çalışmamızda, manyetik alanı da hesaba katan bir Güneş modeli yapılmıştır. Sıkıştırılmaz ideal bir akışkan olarak kabul edilen Güneş modelindeki manyeto-hidrodinamik (MHD) etkileşimler küresel koordinatlarda yazılmıştır. İkinci bölümde MHD denklemleri lineerleştirildikten sonra çözümler aranmıştır. Standart Güneş Modelindeki (SGM) [4] fiziksel parametrelerden yoğunluk, basınç, sıcaklık yanında manyetik alanda bir zonklama sürecinde oluşan perturbasyonların analitik ifadeleri de elde edilmiştir. Küresel harmoniklerin düşük l değerindeki akustik p -kipleri için perturbasyon grafikleri çizilmiştir. Fiziksel parametrelerdeki değişimlerin non-linear incelenmesi ise üçüncü bölümde verilmiştir. Dördüncü bölüm tartışma-sonuç için ayrılmıştır.

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü,
17020 Çanakkale, Tel: +90-286-218-0018 / 1952, Fax: +90-286-218-0533, e-posta: h_cavus@comu.edu.tr

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü,
17020 Çanakkale, Tel: +90-286-218-0018 / 1568, Fax: +90-286-218-0543, e-posta: akarafistan@comu.edu.tr

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Su Ürünleri Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü,
17020 Çanakkale, Tel: +90-286-218-0018 / 1540, Fax: +90-286-218-0543, e-posta: ybuyukates@yahoo.com

2. Lineerleştirilmiş Çözümler

2.1. Mhd Denklemleri

İdeal MHD denklemleri ele alınarak çözümler aranmıştır. Bunlar sırasıyla süreklilik (1), hareket (2), manyetik indüksiyon denklemleri (3), manyetik tek kutup olmadığını belirten denklem (4), ve enerji transfer denklemdir (5). Bu denklemler non-lineer denklemlerdir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}\mathbf{u}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{B} - \mathbf{B}\mathbf{v}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} - (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{B} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (4)$$

$$\rho \frac{dq}{dt} = (\rho \varepsilon - \nabla \cdot \mathbf{F}) = \frac{1}{\gamma - 1} \left(\frac{dp}{dt} + \gamma \frac{p}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \right). \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde bulunan ρ , g , p , v , \mathbf{B} , γ , ε ve \mathbf{F} sırasıyla yoğunluk, çekimsel ivme, basınç, hız, manyetik alan, iç enerji ve enerji akısını göstermektedir. Eğer Euler tipi perturbasyonları dikkate alırsak, fiziksel çokluklar aşağıdaki gibi denge değeri ile perturbasyon değerinin toplamı şeklinde yazılabilir:

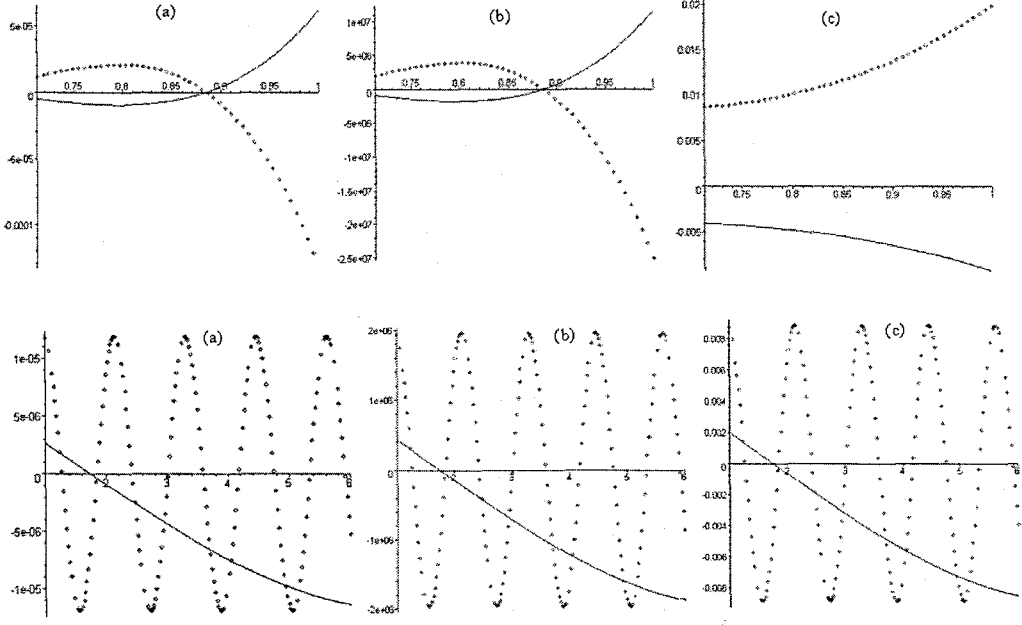
$$\rho = \rho^0 + \rho^1, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}^0 + \mathbf{v}^1, \quad p = p^0 + p^1, \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}^0 + \mathbf{B}^1 \quad (5)$$

Üst indis "0" ve "1" sırasıyla perturbe olmamış denge durumunu ve manyetik alan tarafından perturbe edilmiş durumu göstermektedir. Perturbe olmamış manyetik alan konfigürasyonu olarak Antia ve arkadaşlarının [5] makalesinde verilen manyetik alan profili kullanılmıştır. Bu bilgiler ışığında, (6) numaralı denklem seti (1)-(5) denklemlerinde yerine konularak adiyabatik durum için lineerleştirme işlemi yapılırsa perturbasyonlar bulunabilir.

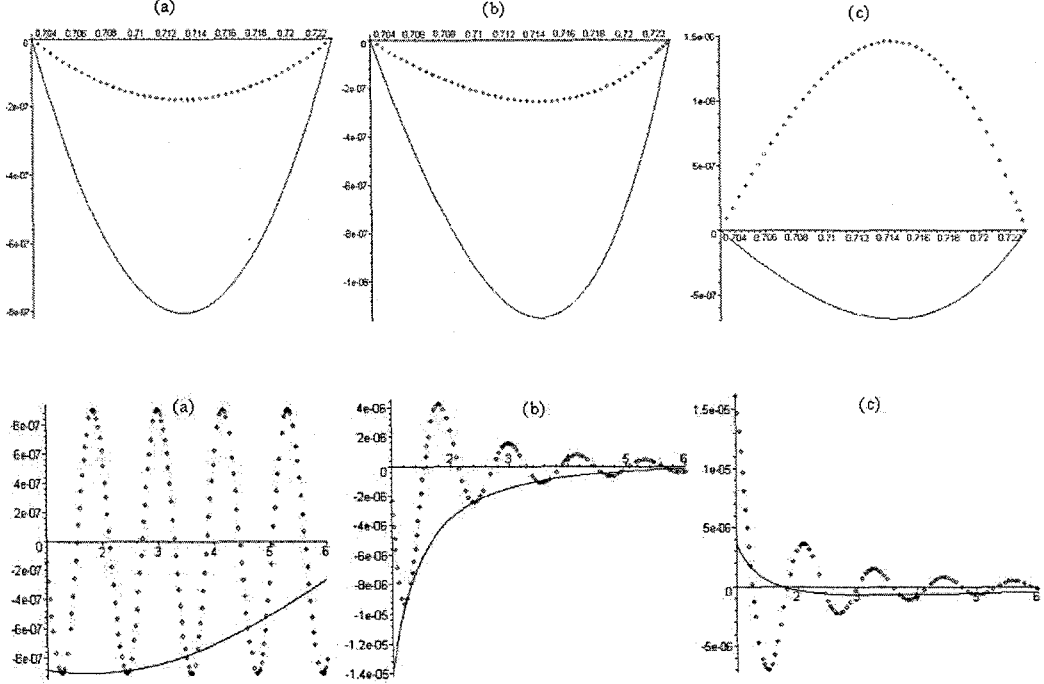
2.2. Sonuçlar

Bu alt bölümde fiziksel parametrelerde meydana gelen perturbasyonlar, birinci derece yaklaşımı (lineerleştirme) ile incelenmiştir. Güneş yüzeyinde gözlenen 5-dakika periyotlu p-kiplerinin çapsal olduğu bilindiğine göre, hesaplamalarda düşük l değerleri dikkate alınarak ($l=m=2$), $\theta=\pi/6$ ve $\phi=\pi/3$ için özel çözümler verilmiştir.

Konvektif bölgenin tabanı $0.713 R_{\odot}$ olarak alınmıştır.[6]. Hesaplamalarda Waterloo Maple 8.00 paket programı kullanılmıştır. Şekil 1 ve 2 de konvektif bölgedeki fiziksel çoklukların üst kısımda görelî yarıçapa ($X=r/R_{\odot}$) ve altta frekansa bağlı değişimleri gösterilmektedir [7].



Şekil 1: Yoğunluk (a), basınç (b) ve sıcaklıkta (c) meydana gelen peturbasyonların $f=3$ mHz için görelî yarıçapa ve $r=0.713 R_{\odot}$ için frekansa göre değişimi (düz çizgi $t=5$ dak., diamond $t=90$ dak.).

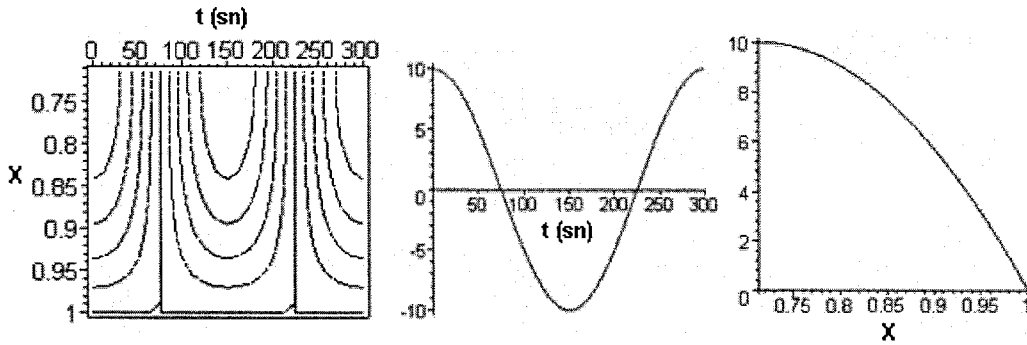


Şekil 2: Manyetik alanın çapsal (a), kutupsal (b) ve azimutal (c) bileşenlerinde meydana gelen peturbasyonların $f=3$ mHz için görelî yarıçapa ve $r=0.713 R_{\odot}$ için frekansa göre değişimi (düz çizgi $t=5$ dak., diamond $t=90$ dak.).

3. Non-Linear Çözümler

Bilindiği gibi MHD denklemleri oldukça non-linear denklemlerdir. Bu bölümde, küresel simetrik bir Güneş için 2. bölümdeki (1)-(5) eşitlikleriyle verilen MHD denklemlerinin non-linear ve analitik çözümleri aranmıştır. Çözümlerde (7) numaralı eşitlikle verilen azimuthal manyetik alan profili kullanılmıştır. Bu manyetik alan profilinin seçilmesinde, dinamo teorisi konusunda güncel bir makale olan [8] kullanılmıştır. Bu çalışmadaki β (gaz basıncının manyetik basınca oranı) değerlerinin sağlanmasına dikkat edilmiştir. Ossendrijver, β değerinin konvektif bölgenin tabanı ile yüzeyi arasında 10^5 ile 1 arasında değiştiğini belirtmektedir. Şekil 3. te seçilen manyetik alanın zamansal ve yerel değişimleri gösterilmiştir.

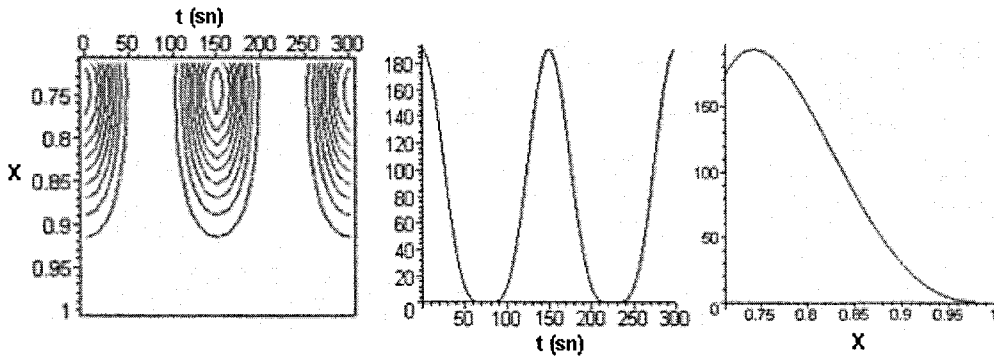
$$\mathbf{B}(r, t) = B_0 \left(1 - \left(\frac{r-r_0}{d}\right)^2\right) \cos(\omega t) e_\phi \quad (7)$$



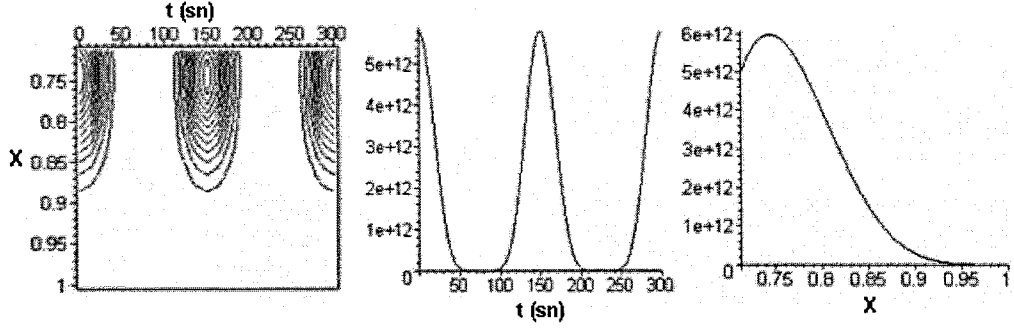
Şekil 3: Manyetik alanın zaman ve görel yarıçapa bağlı konturları (sol), konvektif bölgenin tabanında zamansal değişim (orta) ve 5 dak sonunda görel yarıçapa göre değişim (sağ).

3.1. Sonuçlar

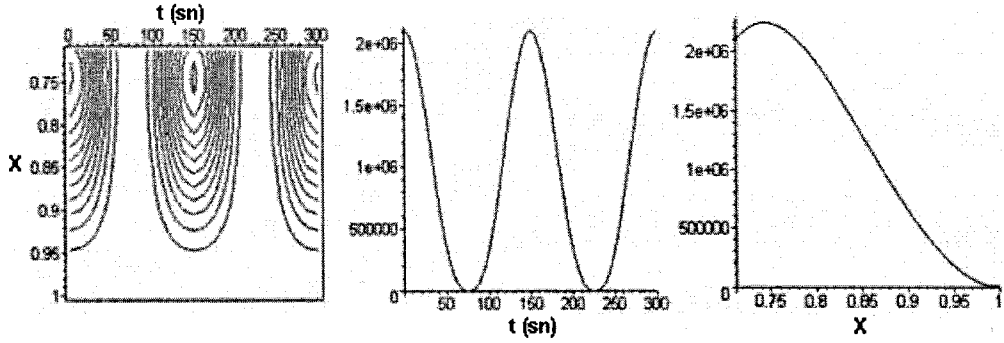
Bu alt bölümde fiziksel parametrelerin değişimleri incelenmiştir.



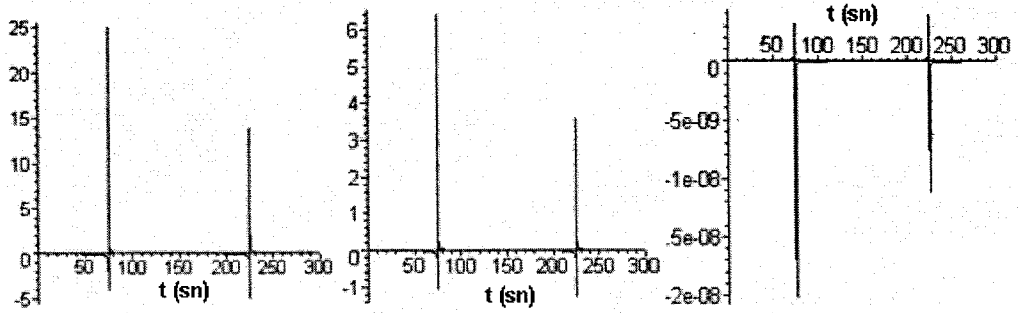
Şekil 4: Yoğunluğun zaman ve görel yarıçapa göre konturları (sol), konvektif bölgenin tabanında zamansal değişim (orta) ve 5 dak sonunda görel yarıçapa göre değişim (sağ).



Şekil 5: Basıncın zaman ve görel yarıçapa göre konturları (sol), konvektif bölgenin tabanında zamansal değişim (orta) ve 5 dak sonunda görel yarıçapa göre değişim (sağ).



Şekil 6: Sıcaklığın zaman ve görel yarıçapa göre konturları (sol), konvektif bölgenin tabanında zamansal değişim (orta) ve 5 dak sonunda görel yarıçapa göre değişim (sağ).



Şekil 7: Hızın zaman içinde; konvektif bölgenin tabanında (sol), ortasında (orta) ve Güneş yüzeyinde değişimi (sağ).

4. Tartışma-Sonuç

Bu çalışmada, Güneşin konvektif bölgesinin dinamiği araştırılmıştır. Önce 2. Bölümde, MHD denklemleri lineerleştirilmiş ve fiziksel parametrelerdeki değişimler incelenmiştir. Parametrelerde oluşan perturbasyonların, perturbe olmamış denge değerlerine oranı yaklaşık olarak 10^{-6} olarak bulunmuştur. Buradan hareketle sıkıştırılamaz akışkan yaklaşımının kaba bir yaklaşım olmasına rağmen kullanılabilceği ortaya çıkmıştır. 3. bölümde ise küresel simetrik bir güneş için non-linear MHD denklemlerinin çözümleri elde edilmiştir. Fiziksel parametrelere ait bu çözümler $t=0$ için Christensen-Dalgaard ve arkadaşlarının modeliyle

[4] uyumlu sonuçlar vermiştir. Çapsal hıza ait çözüm incelendiğinde (Şekil 7), $t=75$ ve $t=225$ saniye civarlarında asimptotik bir davranış sergilediği görülmüştür. Bu asimptotik davranış ilerisi için üzerinde çalışılması planlanan konunun temelini oluşturmaktadır (konveksiyon akımlarında kaotik durumlar). Güneş yüzeyindeki harekete bakıldığında (Şekil 7-sağ) hız işaret değiştirmektedir.

Kaynaklar

- [1] Chitre, S.M., Ezer, D., Stothers, R. (1973), "Solar neutrinos and a central magnetic field in the Sun", *Astrophys. Lett.*, 14, 37.
- [2] Parker, E.N. (1955), "Hydromagnetic dynamo models", *Astrophys. J.*, 122, 293.
- [3] Schüssler, M., Caligari, P., Ferriz-Mas, A., Moreno-Inertis, F. (1994), "Instability and eruption of magnetic flux tubes in the solar convection zone", *Astron. & Astrophys.*, 281, 69.
- [4] Christensen-Dalsgaard, J., Däppen, W., Ajukov, S.V., Anderson, E.R., Antia, H.M., Basu, S., Baturin, V.A., Berthomieu, G., Chaboyer, B., Chitre, S.M., Cox, A.N., Demarque, P., Donatowicz, J., Dziembowski, W.A., Gabriel, M., Gough, D.O., Guenther, D.B., Guzik, J.A., Harvey, J.W., Hill, F., Houdek, G., Iglesias, C.A., Kosovichev, A.G., Leibacher, J.W., Morel, P., Proffitt, C.R., Provost, J., Reiter, J., Rhodes Jr., E.J., Rogers, F.J., Roxburgh, I.W., Thompson, M.J. and Ulrich, R.K., 1996, *Science*, 272, 1286.
- [5] Antia, H.M., Chitre S.M., Thompson, M.J. (2000), "The Sun's acoustic asphericity and magnetic fields in solar convection zone", *Astron. & Astrophys.*, 360, 335.
- [6] Brun, A.S., Turck-Chieze, S., Zahn, J.P. (1999), "Standard solar models in the light of new helioseismic constraints. II. Mixing below the Convective Zone", *Astrophys. J.*, 525, 1032.
- [7] Cavus, H., Karafistan, A.İ. (2004), "The effect of magnetic field on the solar p-mode oscillations", *Astrophys. and Space Sci.* (under review).
- [8] Ossendrijver, M. (2003), "The solar dynamo", *The Astron. Astrophys. Rev.* 11, 287