



Güneş Atmosferinde Ekvator Düzlemi Civarında Bazı Fiziksel Parametrelerin Değişimi

Hüseyin ÇAVUŞ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Özet: Bu çalışmada; Güneş lekelerinin de baskın olduğu bölgenin üst kısmındaki yani ekvator düzlemi civarında bulunan enlemsel bölge içerisindeki bazı büyük ölçekli fiziksel parametreleri belirlemek için manyetohidrodinamik (MHD) denklemlerinin çözümleri aranacaktır. Radyal ve enlemsel değişimleri küresel koordinatlarda elde etmek için özel bir değişken ayrımı kullanılacaktır. Fiziksel parametrelerin enlemsel dağılımlarının çalışıldığı model analizleri sonucunda üç önemli parametre ortaya çıkmıştır. Bunlar sırasıyla küresellik, yoğunluk şekil ve radyal şekil parametreleridir. Yapılan inceleme sonucunda; Güneş lekeleri oluşan enlem bölgelerinin üst kısımlarına denk gelen atmosfer bölgelerinde oluşmayan bölgelerin üst kısımlarına kıyasla büyük değişimlerin olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş atmosferi, Güneş lekeleri, MHD

Abstract: The solutions of magnetohydrodynamic (MHD) equations will be sought to determine some large-scale physical parameters in the latitudinal region at the top of the region where the sunspots dominate, i.e. around the equatorial plane. A special variable separation will be used to obtain radial and latitudinal changes in spherical coordinates. Three important parameters have emerged as a result of model analyzes in which the latitudinal distributions of physical parameters are studied. These are sphericity, density shape and radial shape parameters, respectively. As a result of the investigation; it was found that there are large changes in the upper parts of sunspot latitudes compared to the upper parts of the latitudinal regions sunspot do not occur in the solar atmosphere.

Key Words: Solar atmosphere, Sunspots, MHD

1. Giriş

Güneş lekeleri ve Güneş rüzgarı veya gözlemlenen diğer tüm Güneş etkinliklerinin sürdürülebilmesi için sürekli bir dinamo mekanizması tarafından manyetik alan oluşturulması gerekmektedir (Parker, 1955). Bu tip dinamo süreçleri Güneş yüzeyinin altında, %29'luk çapsal bölgede, yer alan küresel kabuk içerisindeki konvektif bölgede meydana gelir (Brun ve ark., 2004). Rempel ve ark. (2000) gözlemlenen Güneş etkinliklerinin sürdürülebilmesi için konvektif bölge tabanında 10 T civarı bir manyetik alanın var olması gerektiğini bulmuşlardır. Ancak bu şiddette bir manyetik alan ilmeklerin Coriolis kuvveti etkisi ile kutuplara doğru kaymasına mani olabilir (Schüssler ve ark., 1994; Çavuş ve Karafistan, 2007; Çavuş, 2009a; Çavuş, 2009b.).

Güneş yüzeyinde oluşan lekeler doğrudan manyetik alanın topolojisi ile bağlantılıdır. Bu konu birçok makalede çalışılmış bir konudur (Gombosi, 1998; Priest,2000; Bauman ve ark., 2004; Aschwanden, 2006; Höppner ve Bittner, 2009). Şekil 1'de de verilen, Güneş lekelerinin zamana ve enleme bağlı değişimleri, şekilsel olarak tıpkı bir kelebeğe benzediğinden, bu değişimleri gösteren çizelgeye de kelebek diyagramı adı verilir (Priest,2000; Aschwanden, 2005). 22 nolu Güneş döngüsü (1986-1996) ve kelebek diyagramı Mouradian ve Soru-Escout (1993) tarafından çalışılmış ve bu döngü yardımıyla Hale-Babcock yasası yeniden formülize edilmiştir. 21-23 nolu döngüleri içine alan 1975-2003 yılları arasında büyük ölçekli fotosferik manyetik alanın zamansal evrimi ve dönmesi ile ilgili çalışma ise Knaack ve ark. (2005) tarafından yapılmıştır. Knaack ve arkadaşları bu çalışmalarında National Solar Observatory (NSO/Kitt Peak) verilerini kullanarak çok geniş bir zaman serisi analizi yapmış ve fotosferik manyetik alanın quazi periyodik salınım yaptığını dair kanıtlar sunmuşlardır. Hathaway (2010) 11-yıllık Güneş döngülerini incelediği çalışmasında Güneş lekeleri, Güneş parlamaları ve jeomanyetik etkinlikler gibi fiziksel süreçler ve döngüler arasındaki bağlantıyı çalışmıştır.

Güneş'e ait MHD denklemleri için analitik çözümler elde etmek oldukça zor olduğundan dikkatli bir biçimde inceleme yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada sunulan parametrik modelimizde özel bir değişken ayrımı kullanılmış ve Güneş leke



bandının üst kısmında ekvator düzlemi civarında bazı fiziksel parametrelerin dağılımları incelenmiştir. Modeli oluşturmak için kullanılan modele ait eşitlikler bir sonraki bölümde anlatılmıştır. Formülasyon 3. Bölümde verilirken sınır şartları ise 4. Bölümde sunulmuştur. Çalışmaya ait sonuçlar 5. Bölümde verilirken tartışmalar ise son bölüme bırakılmıştır.

2. Fiziksel ve Matematiksel Temeller

2.1. Temel varsayımlar

Bu çalışmada daha önce yazar tarafından oluşturulmuş bir algoritma yardımıyla Güneş atmosferi için parametrik bir inceleme gerçekleştirilecektir (Çavuş ve Karafistan, 2007). İnceleme için küresel koordinatlar tercih edilecektir. Bu noktada süreci sadeleştirmek ve nümerik anlamda zaman kazanmak adına aşağıdaki gibi bazı varsayımlar yapılmıştır.

- Denge durumu eksensel simetrik (axisymmetric) kabul edilmiştir.
- Güneş'in ortalama karakteristik olarak zamandan bağımsız kabul edilmiştir (steady state denge).

*Sorumlu Yazar E-Posta: h_cavus@comu.edu.tr

- Problemi daha anlaşılır ve kolay kılmak adına hız ve manyetik alanın θ -bileşenleri ihmal edilmiştir (Lima ve Priest, 1993; Lima ve ark., 2000; Çavuş ve Karafistan, 2010).
- Özellikle Güneş lekeleri içerisinde manyetik alan çok büyük olduğu için MHD denklemlerinde viskozite gibi rezistif etkiler dikkate alınmamıştır.
- İdeal MHD kullanıldığından türbülans etkileri göz önüne alınmamıştır.

Bu varsayımlardan sonra elde edilen parametrik model sonuçları yardımıyla Güneş leke bandının üst kısmında ekvator düzlemi civarında bazı fiziksel parametrelerin dağılımları sunulmuştur.

2.2. Temel Denklemler

Güneş atmosferi için kullanılacak olan temel formülasyon MHD denklemlerini temel almaktadır. Başka bir deyişle, yukarıdaki varsayımlarda da belirtildiği gibi manyetik alanın etkisini araştırmak için steady-state MHD eşitlikleri kullanılacaktır. Bunlar;

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} = -\vec{\nabla}(p + \frac{B^2}{2\mu_0}) - \rho \frac{GM_s}{r^2} \vec{e}_r + \frac{(\vec{B} \cdot \vec{\nabla})\vec{B}}{\mu_0} \quad (3)$$

sırasıyla kütle sürekliliği eşitliği (1), manyetik tek kutbun olmadığını gösteren eşitlik (2) ve steady state hareket denklemdir (3).

Bu denklem setinde kullanılan ρ , \vec{v} , p , \vec{B} , M_s , μ_0 ve G sırasıyla yoğunluk, hız, basınç, manyetik alan, Güneş kütlesi, manyetik geçirgenlik ve evrensel çekim sabitidir.

Güneş yüzeyindeki akışkan (plazma) hareketinde MHD süreçler baskındır. (3) numaralı eşitliğe ait steady state denge durumunda çözümlerin aranacağı bu çalışmada (1)-(3) eşitlikleri için eksensel simetrik durum beraber ele alınacaktır. Bu noktada hız ve manyetik alan bileşenleri aşağıda verilen eşitliklerdeki gibi yazılabilir (Weber ve Davis, 1967; Antia ve ark., 2000).

$$\vec{v}(r, \theta) = v_r(r, \theta)\vec{e}_r + v_\phi(r, \theta)\vec{e}_\phi = v_r(r, \theta)\vec{e}_r + r\Omega(r, \theta)\vec{e}_\phi. \quad (4)$$

$$\vec{B}(r, \theta) = B_r(r, \theta)\vec{e}_r + B_\phi(r, \theta)\vec{e}_\phi. \quad (5)$$

Yoğunluk ve basınç ise

$$\rho = \rho(r, \theta) \quad (6)$$

$$p = p(r, \theta) \quad (7)$$

gibi ifade edilebilir.

3. Problemin Formülasyonu

Bu çalışmada amaçlanan hedefe varmak için (1)-(7) eşitliklerine ait çözümler aranacaktır (Lima ve Priest, 1993; Lima ve ark., 2000; Çavuş ve Karafistan, 2007). Bu amaçla yukarıda kullanılan tüm fiziksel parametreler boyutsuz halde yazılacaktır.

3.1. Boyutsuz parametreler

Problemi daha anlaşılır kılmak için tüm parametreler $z, v', \Omega', a, b, \rho'$ ve p' boyutsuz parametreleri yardımıyla yeniden aşağıdaki gibi yazılabilir (Miesch ve Gilman, 2004; Cavus ve Karafistan, 2007, 2009a, 2009b and 2010; Cavus ve Ilbikci, 2016).



$$r = R_s z, \nabla_r = V_s \nabla', \Omega = \frac{V_s}{R_s} \Omega', \rho = \rho_s \rho' \quad (8)$$

$$B_r^2 = \mu_0 \rho_s V_s^2 a^2, B_\phi^2 = \mu_0 \rho_s V_s^2 b^2, \quad p = \frac{\rho_s V_s^2}{2} p' \quad (9)$$

Boyutsuzlaştırma eşitliklerinde bulunan ρ_s , R_s ve $V_s = \sqrt{2GM_s/R_s}$ ifadeleri sırasıyla Güneş yüzeyi için yoğunluk, yarıçap ve Güneş yüzeyinden parçacıkların kaçış hızıdır. Sayısal değerleri ise sırasıyla $2.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ (Pandey ve ark., 2008), $6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ve 618 km/s (Gombosi, 1998; Priest, 2000) şeklindedir.

3.2. Enlemsel açıya bağımlılıklar

Radyal ve enlemsel açıya bağlı değişimlerin araştırılması amacıyla, her bir parametre için aşağıda sunulan değişken ayrımları kullanılmıştır. Öncelikle boyutsuz radyal hız bileşeni

$$\nabla' = V(z) \psi(\theta) \quad (10)$$

biçiminde yazılırken, yoğunluk ise

$$\rho' = \frac{j(\theta)}{z^2 V} \quad (11)$$

gibi yazılır. Yoğunluğa benzer şekilde manyetik alanın radyal bileşeni

$$a = \frac{f(\theta)}{z^2} \quad (12)$$

gibi değişkenlerine ayrılabilir. Açısal hız ve manyetik alanın azimutal bileşeni ise aşağıdaki gibi ayrılabilir.

$$\Omega' = N(z) \varphi(\theta), \quad b = B(z) g(\theta) \quad (13)$$

Gerekli işlemler yapıldıktan sonra \mathcal{E} , δ ve η gibi orantı parametreleri cinsinden tüm fiziksel parametrelerin enlemsel açı bağımlılıkları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \psi(\theta) &= \sqrt{\frac{1 + \eta \sin^{2\epsilon} \theta}{1 + \delta \sin^{2\epsilon} \theta}} \\ j(\theta) &= 1 + \delta \sin^{2\epsilon} \theta \\ f(\theta) &= \sqrt{1 + \eta \sin^{2\epsilon} \theta} \\ \varphi(\theta) &= \frac{\sin^\epsilon \theta}{\sqrt{1 + \delta \sin^{2\epsilon} \theta}} \\ g(\theta) &= \sin^\epsilon \theta \end{aligned} \quad (14)$$

Elde edilen \mathcal{E} , δ ve η parametreleri, sırasıyla küresellik, yoğunluğa ait şekil ve radyal bileşenlere ait şekil parametreleridir. İncelemenin tamamlanması için çapsal bağımlılıkların da bilinmesi gerekmektedir.

3.3. Radyal bağımlılıklar

Manyetik alanın radyal bileşeni

$$B_r \propto B_0 \quad (15)$$

biçiminde ifade edilir. B_0 değeri ise tipik fotosferik manyetik alan değeri olup sayısal olarak 5 G 'a eşittir (Wang ve Sheeley, 2003). Açısal hızın radyal bağımlılığı ise aşağıdaki gibi verilebilir (Parker, 1958; Foukal ve Jokiphi, 1975).

$$\Omega \propto \Omega_s \left(\frac{R_s}{r}\right)^2 \quad (16)$$

Son eşitlikte karşımıza çıkan Ω_s ekvatoradaki açısal hız değeri olup sayısal olarak $2.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ gibi bir değere sahiptir. Manyetik alanın azimutal bileşenine ait radyal bağımlılık (Parker, 1958; Gombosi, 1998; Priest, 2000)

$$B_\phi \propto \frac{B_0 R_s^2 \Omega_s}{V_s} \frac{1}{r} \quad (17)$$

olarak verilebilir. Çalışmamızda Weber ve Davis (1967) çözümüne benzer şekilde aktif bölgelerin üst kısımlarında akış ve manyetik alanı birbirine paralel olarak kabul ettik. Yüksek iletkenlik altında Ohm yasası (Aschwanden, 2006)

$$\vec{v} \times \vec{B} = 0. \quad (18)$$

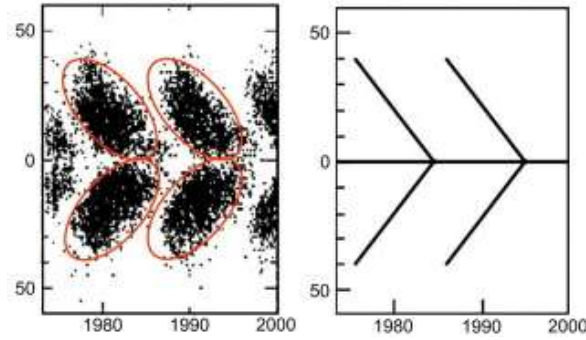
gibi yazılabilir. Bu eşitlikler yardımıyla radyal hızın radyal koordinat bağımlılığı

$$v_r \propto \frac{V_s}{r}. \quad (19)$$

olarak bulunur. Son olarak ise yoğunluğa ait radyal kısım

$$\rho \propto \frac{\rho_s}{r}. \quad (20)$$

şeklinde elde edilir. Modele ait çözümlerin elde edilebilmesi için sınır koşullarına ihtiyaç vardır.



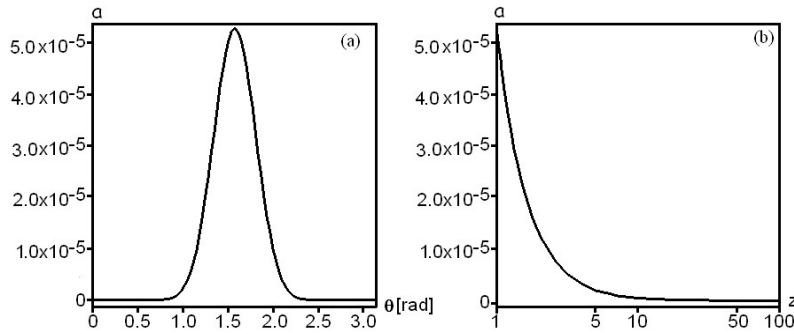
Şekil 1. Güneş lekelerinin heliographic koordinatlara dağılımı (Höppner ve Bittner, 2009).

4. Sınır Koşulları

Manyetik alanı içeren problemler gerek anlaşılması gerekse çözülmesi bakımından zorluklar içerirler. Problemin çözülebilmesi için doğru sınır koşullarına ihtiyaç vardır. Güneş lekelerinin heliographic koordinatlara göre yayılımı Höppner ve Bittner (2009) çalışmasında yıllar a göre verilmiştir. Buna göre Şekil 1 de gösterildiği gibi Güneş lekeleri $\pm 40^\circ$ enlem arasında görülebilmektedir. Şekil 1 ve (14) denklem setini karşılaştırdığımızda, $\pm 40^\circ$ enlem bölgesi için küresellik parametresinin değerinin $\epsilon=18$ olduğunu görebiliriz. Daha önce de söylendiği gibi Güneş yüzeyine ait manyetik alan, parçacık kaçış hızı, kütleli yoğunluk ve ekvatorial açısal hız değerleri sırasıyla $5 G$, $618 km/s$, $2.0 \times 10^{-4} kg/m^3$ ve $2.8 \times 10^{-6} s^{-1}$ olarak sıralanabilir (Priest, 1983; Christensen-Dalsgaard ve ark., 1996; Priest, 2000). Fiziksel parametrelere ait bu değerleri kullanarak modele ait diğer yoğunluk şekil parametresini $\delta=7 \times 10^8$ ve radyal şekil parametresini ise $\eta=25 \times 10^{34}$ olarak bulabiliriz.

5. Model Sonuçları

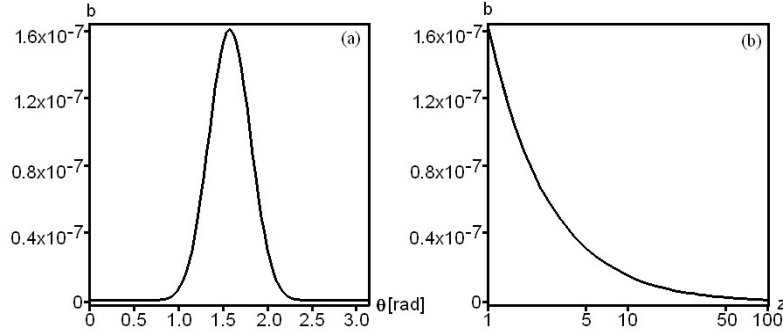
Önceki bölümlerde verilen formülasyon ve sınır koşullarını kullanarak hız ve manyetik alan bileşenleri ve yoğunluğa ait değişimleri enlemsel açı θ ve boyutsuz radyal uzunluk z' 'ye bağlı olarak elde edebiliriz. Bu amaçla Maple 14 paket programı kullanılmıştır. Radyal bağımlılıkları verilirken enlemsel açı θ 'nın değeri ekvator da $\theta=\pi/2$ olarak kabul edilirken, θ 'ya göre olan bağımlılıklar verilirken radyal konum olarak Güneş yüzeyi yani $z=1$ alınmıştır.



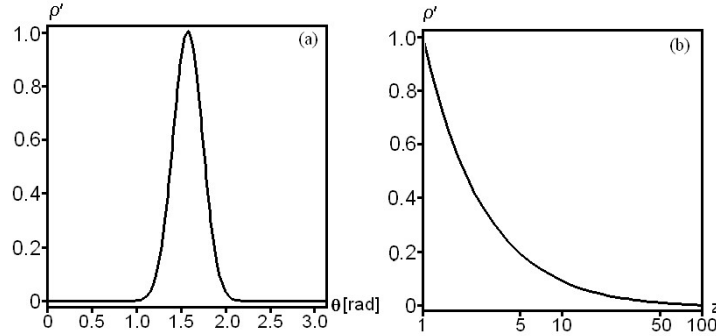
Şekil 2. Azimutal manyetik alan bileşeninin θ ve z' 'ye göre değişimi

Şekil 2a'da manyetik alanın azimutal bileşeninin $z=1$ 'deki enlemsel açı bağımlılıkları verilmiş olup $\pm 40^\circ$ enlemsel bölge içine dağıldığı görülebilmektedir. Çözümde de anlaşılacağı gibi manyetik alan ekvator ($\theta=\pi/2$) civarında yoğunlaşmıştır. Şekil 2b'de ise $\theta=\pi/2$ değeri için radyal değişimler sunulmuştur. Güneş yüzeyinde $5 G$ olan ve giderek azalan manyetik alan

değeri $z=100$ için boyutsuz olarak 5.26×10^{-9} boyutlu olarak ise 0.5 mG^2 'a kadar azalmaktadır.



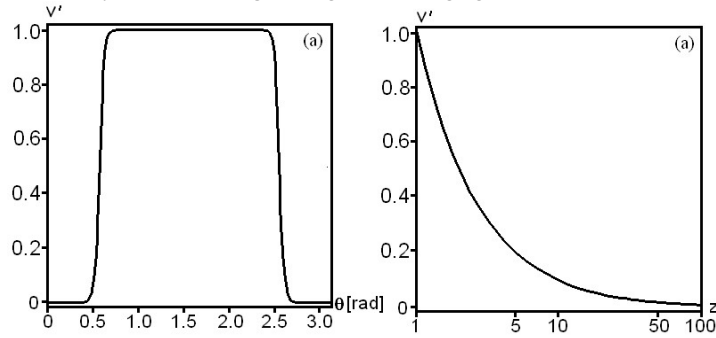
Şekil 3. Radyal manyetik alan bileşeninin θ ve z 'ye göre değişimi



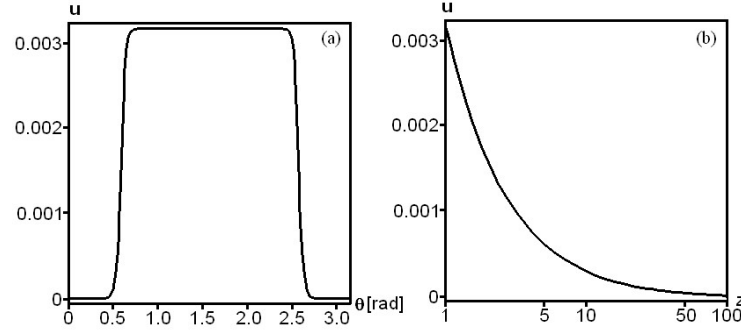
Şekil 4. Yoğunluğun θ ve z 'ye göre değişimi

Şekil 3a'da ise manyetik alanın radial bileşenine ait değişimler sunulmaktadır. Radyal bileşendeki değişimler şekilsel olarak azimutal bileşene çok benzemekte ve $\pm 40^\circ$ enlemsel bölge içinde yoğunlaşmaktadır. Radyal olarak ise (Şekil 3b); Güneş yüzeyinde 0.02 G olan değer $z=100$ noktasında 0.2 mG 'a kadar düşmüştür. Radyal bileşendeki azalma azimutal bileşene göre daha yavaştır.

Boyutsuz yoğunluğun değişimleri Şekil 4'te sunulmuştur. Enlemsel açıya bağlı değişimlerin sunulduğu Şekil 4a'da Güneş yüzeyinin ekvator civarındaki $\pm 32^\circ$ enlemsel bölgesi içinde yoğunluğun değerinin daha fazla olduğunu kutuplara gidildikçe azaldığı görülebilir. Çapsal bağımlılıkların (Şekil 4b) ise Güneş'ten uzaklaştıkça azaldığı ve $z=100$ noktasında boyutsuz değer olarak 0.01 civarına yani $2.0 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ değerine düştüğü görülebilir.



Şekil 5. Radyal hız değişimleri



Şekil 6. Azimuthal hız değişimleri

Hızın çapsal bileşenine ait değişimlerin verildiği Şekil 5’te sunulduğu gibi radyal hız değişimleri ekvator civarındaki $\pm 67^\circ$ lik enlem bölgesinde daha yoğunlaşmıştır. 618 km/s olan çapsal hız ise Güneş’ten uzaklaştıkça (Şekil 5b) azalmakta ve $z=100$ noktasında boyutsuz değer olarak 0.01 civarına yani boyutlu olarak 6 km/s değerine düşmektedir. Azimuthal hız bileşenin de Şekil 6’da görüldüğü gibi tıpkı radyal bileşene (Şekil 5) benzer bir davranış sergilemektedir. Sayısal değer olarak Güneş yüzeyinde 1.8 km/s olan azimuthal hız $z=100$ noktasında 0.02 km/s’ye kadar düşmektedir.

6. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada sunulan parametrik modelimizde özel bir değişken ayrımı kullanılarak Güneş leke bandının üst kısmında ekvator düzlemi civarındaki bölgede bazı fiziksel parametrelerin dağılımları MHD denklemleri çözülerek incelenmiştir. Bu tip çalışmalar için gerek teorik gerekse gözlemsel oldukça çaba sarf edilmektedir. Bu bölüm, bulduğumuz sonuçların literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmasına ayrılmıştır.

Şekil 2 ve 3’te gösterilen manyetik alan bileşenlerinin Güneş yüzeyindeki boyutlu değerleri 5 G ve 0.02 G’tur. Bu değerler Priest (1983 ve 2000) çalışmaları ile uyumludur. Parker’ın (1958) yaptığı ve literatürde büyük öneme sahip olan atmosfer-rüzgar modelinde manyetik alanın 1 AU’daki değeri 3×10^{-5} G - 6×10^{-5} G arasında verilmektedir. Bu aralık bizim $z=100$ için bulduğumuz 0.2 mG - 0.5 mG aralığı ile son derece uyumludur.

Şekil 4’te görüleceği gibi yoğunluk Güneş yüzeyinden uzaklaştıkça 2×10^{-4} kg/m³ değerinden başlayarak azalmaktadır. Holveg (1992) yaptığı çalışmada kromosfer bölgesindeki yoğunluğu 10^{-4} kg/m³ olarak bulmuştur. Bu sonuçta çalışmamızla oldukça uyum içerisindedir. Enlemsel olarak ise ekvator civarında ± 32 enlem bölgesinde bir yoğunlaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, Fan (2001 ve 2009) ve Hayashi (2006) çalışmalarında verilen Güneş atmosferi simülasyonları ile uyumludur.

Güneş yüzeyi için radyal ve azimuthal hız bileşenlerine ait boyutlu değerler sırasıyla 618 km/s ve 1.8 km/s’dir. Bu sonuçlarda diğer çalışmalar ile uyum içerisindedir. Radyal bileşen tipik Güneş rüzgarı olup bir çok çalışmada elde edilmiştir (Priest, 1983 and 2000; Gombosi, 1998; Çavuş ve Kazkapan 2013). Weber ve Davis (1967), yaptıkları çalışmada azimuthal hız bileşenini, bizim sonucumuzla son derece uyumlu biçimde 2 km/s olarak hesaplamışlardır.

Sonuç olarak tekrar söylemekte fayda var. Bu çalışma zamansal değişimleri vermek yerine steady state denge durumu için çözümler sunmaktadır. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçlar zamansal değişimlerin sunulduğu çalışmalar için başlangıç koşulu olma görevi görebilir.

Kaynaklar

- Antia H.M., Chitre S.M. ve Thompson M.J., 2000, A&A, 360, pp335–344.
Aschwanden M., 2006, Physics of the Solar Corona, Springer, pp1-36.
Baumann I., Schmitt D., Schüssler M. ve Solanki S.K., 2004, A&A, 426, pp1075–1091.
Brun, A.S., Miesch, M.S, Toomre, J., 2004, ApJ, 614, pp1073-1098.
Cavus H. ve Karafistan A.I., 2007, MNRAS, 380, pp142-148.
Cavus H. ve Karafistan A.I., 2010, Brazilian Journal of Physics, 40, pp160-165.
Cavus H. ve Kazkapan D., 2013, New Astronomy, 2013, 25, pp89–94.
Cavus H., 2009a, New Astronomy, 14, pp349-355.
Cavus H., 2009b, New Astronomy, 14, pp700-707.
Cavus H. ve Ilbiki N., 2016, Astrophysical Bulletin, 71, pp241-248.
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., Ulrich, R.K., 1996, Sci, 272, pp1286-1292.
Fan Y., 2001, ApJ, 554, ppL111-L114.
Fan Y., 2009, ApJ, 697, pp1529–1542