



Kırmızı Yatay Kol Alan Yıldızlarının Kimyasal Bolluk Analizi

Melike Afşar^{1,2}, Zeynep Bozkurt^{1*}, Gamze Böcek Topcu¹, Gizem Şehitoğlu¹, Christopher Sneden²

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir, Türkiye.

²Department of Astronomy and McDonald Observatory, University of Texas, USA

Özet: Bu çalışmada farklı Gökada bileşenlerindeki (ince diskten-haloya) Kırmızı Yatay Kol (RHB) yıldızlarının kimyasal bolluk analizi yapılarak Gökadamızın kimyasal yapısı ve evrimi anlaşılmasına çalışılmıştır. Çalışma kapsamında 300'den fazla RHB aday yıldızın yüksek çözünürlüklü tayfları elde edilerek MOOG kimyasal bolluk analizi programı yardımı ile başlıca C, N, O ve bazı alfa elementlerinin bollukları ile 8000 Å bölgesindeki CN bantlarının ¹²C/¹³C izotop oranları belirlenmiştir. Ayrıca eldeki tayf verisinden bolluğu belirlenebilecek diğer bazı elementlerin bollukları da incelenmiştir. Uzaklık verisi mevcut olan yıldızların kinematik özellikleri irdelenerek Gökada'nın hangi bileşenlerinin üyesi oldukları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: kimyasal bolluklar, yıldız atmosferleri, yıldız evrimi, yatay kol

Abstract: In this study, the chemical structure and evolution of the Galaxy have been investigated through chemical abundance analysis of Red Horizontal Branch (RHB) stars found in different Galactic components (thin disk to halo). Through this study, high-resolution spectra of more than 300 RHB candidates has been obtained and abundances of mainly C, N, O and some alpha elements have been determined together with the ¹²C/¹³C isotopic ratios of CN bands in 8000 Å region using MOOG chemical abundance analysis program. Furthermore, the abundances of some other elements have been also investigated using the available spectral data. For the stars with distance information, we also studied the kinematics of the stars and their membership to the Galactic components.

Key Words: chemical abundances, stellar atmosphere, stellar evolution, horizontal branch

1. Giriş

Kırmızı Yatay Kol (Red Horizontal Branch-RHB) yıldızları HR diyagramında kararsızlık kuşağı ile kırmızı yığın (Red Clumb-RC) yıldızları arasında konumlanmaktadır. Bu yıldızlar RC'lar gibi çekirdeğinde He-yakan ancak RC yıldızlarına göre daha sıcak, küçük kütleli ve düşük metal bolluklu yıldızlardır (Straizys vd. 1981, Ramírez ve Meléndez 2005, Gray ve Corbally 2009). RHB'lerin düşük çözünürlüklü tayf ve ışıkölçüm verilerini inceleyen Rose (1985) onların Gökadamızın kalın-diskinin üyeleri olduklarını ileri sürmüştür. Kinematik özellikleri ve kimyasal bollukları değerlendirilerek kalın-disk ve ince-disk yıldızları ayırt edilebilmektedir. Kalın-disk yıldızları α -elementlerince zenginler ([Mg, Si, Ca/Fe] >0). Tautvaišienė vd. (2001) 13 adet RHB yıldızını incelemiş, O ve Mg gibi elementlerce zengin olduklarını bulmuşlardır. Tautvaišienė vd.'nin (2001) çalışmasındaki en çarpıcı sonuç, bu çalışmadaki RHB yıldızlarının ¹²C/¹³C \approx 3-6 gibi çok düşük izotop oranlarına sahip olmasıdır (CN-çevrimi ile H yanması belirteci. \sim 3.4 olan CN-denge değerine yakın, Sneden vd., 1986). Metalce fakir küresel kümelerde He-yakma evresine gelmiş bu yıldızların Gökadamızda alan yıldızları olarak HR-diyagramında aynı bölgede yer alması nasıl mümkün olmuştur? Bu soruya yanıt aramak için Afşar vd. (2012) alan yıldızları arasından seçilmiş RHB adaylarının yüksek çözünürlüklü tayf verilerini incelemiş ve detaylı kimyasal bolluk analizleri yapılan 76 RHB aday yıldızdan 18 tanesinin gerçek RHB yıldızı olduğunu önermişlerdir. Bu yıldızların ¹²C/¹³C oranlarının 6-20 arasında değişmekte olduğunu ve kesinlikle evrimleşmiş yıldızlar olduklarını tespit etmişlerdir.

RHB yıldızları günümüze kadar Gökadamızın kalın-diskinin birer üyesi olarak anılmışlardır. Bununla birlikte, Afşar vd. (2012) çalışmalarında 18 RHB yıldızından 13 tanesinin ince-disk üyesi olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, ender bulunan ve varlığı standart evrim modelleri ile kolaylıkla açıklanamayan bir ince-disk RHB yıldız topluluğunun varlığına işaret etmektedir. Girardi (1999) bu yıldızların başlangıç kütleleri $2.2 M_{\odot}$ dolayında olan yıldızlardan evrimleşmiş ve çekirdeklerinde He-yakma aşamasına gelmiş yıldızlar olabileceklerini önermiştir. Ancak, bu varsayım çok küçük rakamlı bir istatistiğe dayanmaktadır. Gökadamızda bulunan ve merkezinde He-yakan yıldızlar üzerine daha kesin değerlendirmeler yapılabilmemesinin, çok büyük ölçekte gözlemsel verinin elde edilmesi ve incelenmesiyle mümkün olabileceği açıkça görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, büyük ölçekli bir araştırma için literatürde ilk kez, 300'den fazla RHB aday yıldızının yüksek çözünürlüklü tayfları elde edilmiştir. Bu tayf verilerinin analizi ile yaklaşık 320 kadar RHB yıldız adayının atmosfer parametreleri (etkin sıcaklık: T_{eff} , yüzey çekimi: $\log g$, metalilik: [M/H] ve mikrotürbülans hızı: v_t) belirlenmiş, kinematik (uzaklık bilgisi mevcut olanlar için) ve bolluk özellikleri incelenmiştir.

*Sorumlu Yazar E-Posta: zeynep.bozkurt@ege.edu.tr



2. Gereç ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında yaklaşık 340 RHB aday yıldız gözlenmiştir. RHB aday olarak başlıca, tayf türleri yaklaşık G5-K2 aralığında, ışıma sınıfı III, görsel parlaklığı kullanılan teleskopların sınırına uygun ($V \leq 14^m$), uzaklığı bilinen adaylar için salt parlaklığı $M_v \sim 0$ ile -1 aralığında olan ve olası kalın-disk veya halo üyesi adaylar için ise Gökada enlemi yüksek olan yıldızlar seçilmiştir. Tayf türü aralığının yanı sıra, metal bolluğundan neredeyse bağımsız olan V-K renk sıcaklığı da aday belirleme kriteri olarak kullanılmıştır. Gözlemler, Amerika'nın Teksas eyaletindeki McDonald Gözlemevi'nde bulunan 2.7m HJT (Harlan J. Smith) teleskobuna bağlı COUDE tayfçekeri ($R=60,000$) ve 9.2m HET (Hobby-Eberly Telescope) teleskobuna bağlı "High-Resolution Fiber-Coupled (HRS)" tayfçekeri ($R=60,000$) ile elde edilmiştir. Bu teleskopların kullanılan tayfçeker türlerine göre aletsel parlaklık sınırları HET teleskobu için $V \square 14^m$, HJT teleskobu için ise $V \square 11^m$ dir.

RHB aday yıldızların tayf gözlemleri 2011-2014 yılları arasında elde edilmiştir. Her iki tayfçekerle yapılan gözlemler sırasında dalgaboyu kalibrasyonunda kullanılmak üzere ThAr lamba tayfları da alınmıştır. Yüksek sinyal/gürültü ($S/G \geq 100$) oranına sahip veriler IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) paket programı ile indirgenmiştir. Her iki teleskoptan alınan gözlemler sırasında tayfın kırmızı bölgesine doğru etkisini gösteren atmosfer kaynaklı soğurma çizgilerini tayf verisinden arındırmak için sıcak (B-A tayf türleri aralığında) ve hızlı dönen ($V_{rot} > 100$ km/s) standart yıldızlar gözlenmiştir. Tayfların kalibrasyonu, normalizasyon ve tellürik düzeltme işlemlerinin tamamlanmasıyla veriler kimyasal bolluk analizine hazır duruma getirilmiştir. Yıldızların dikine hızları da ölçülmüştür. Dikine hız ölçümleri sırasında IRAF alt programı olan fxcor kullanılmıştır. Dikine hız ölçümleri için gözlenen yıldızların atmosfer özelliklerini yaklaşık olarak temsil eden sentetik tayflar oluşturulmuştur. Daha sonra bu sentetik tayflar yıldız tayflarıyla çabraz-bağıntı (cross-correlation) yöntemiyle karşılaştırılarak dikine hızlar ölçülmüştür.

3. Kimyasal Bolluk Analizi

İndirgeme sürecinin tamamlanmasından sonra elde edilen tayflardan kimyasal bolluklarının belirlenmesi sürecine geçilmiştir. Kimyasal bolluk analizi, Prof. Dr. Christopher Sneden tarafından geliştirilmiş olan ve bu çalışma sırasında Prof. Dr. Melike Afşar'ın da gelişimine katkıda bulunduğu "MOOG" (Sneden 1973) adlı bilgisayar kodu kullanılarak yapılmıştır. Analizde ayrıca, ATLAS9 (Castelli ve Kurucz 2003) model atmosferleri kullanılmıştır. Bu çalışma sırasında geliştirilen MOOG "yarı-otomatik modu" kullanılarak atmosfer parametreleri ve sentetik tayf analizleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında gözlenen yaklaşık 340 RHB aday yıldızın model atmosferleri belirlenmiştir. Aday yıldızların element bollukları eşdeğer genişlik (EG) ölçme ve gerektiğinde sentetik tayf karşılaştırma yöntemleriyle belirlenmiştir. Öncelikle Fe I, Fe II, Ti I ve Ti II elementlerinin bollukları EG ölçüm yöntemiyle bulunmuş ve bu bolluklar temel yıldız atmosfer parametrelerinin (etkin sıcaklık: T_{eff} , yüzey çekimi: $\log g$, metalilik: $[M/H]$ ve mikrotürbülans hızı: v_t) elde edilmesinde kullanılmıştır. Çizelge 1'de örnek olarak seçilen 5 yıldızın atmosfer parametreleri verilmektedir. Yıldızların model atmosfer parametreleri, MOOG analiz kodunun Abfind alt programı ile belirlenmiştir (Şekil 1). Analiz başlangıcında gereken giriş sıcaklık değerleri için renk (Ramirez ve Melendez 2005) ve LDR (Line Depth Ratio, Gray ve Brown 2001) sıcaklıklarının ortalaması alınmıştır. Başlangıç yüzey çekimleri uzaklık bilgisi bulunan yıldızlar için aşağıdaki eşitlik

$$\log g_* = 0.4 (M_{V*} + BC - M_{B_{ol\odot}}) + \log g_{\odot} + 4 \log (T_{eff}*/T_{eff\odot}) + \log (m*/m_{\odot})$$

kullanılarak (yıldız kütleleri $1 M_{\odot}$ varsayılmıştır) hesaplanmıştır. Burada kabul edilen Güneş parametreleri; $M_{bol} = 4.75$, $\log g = 4.44$ ve $T_{eff} = 5777$ K. Uzaklık bilgisi olmayan yıldızların bir dev yıldız ($\log g \sim 2.5$) olduğu kabul edilmiştir. Metalilik değeri Güneş bolluğunda varsayılmış, mikrotürbülans değeri ise dev yıldızlar için ortalama bir değer olan 1.2 km/s olarak kabul edilmiştir. Model atmosfer parametrelerinin belirsizlikleri; $\Delta T_{eff} \pm 150$ K, $\Delta \log g \pm 0.25$ dex, ve $\Delta v_t \pm 0.2$ km/s olarak hesaplanmıştır. $[M/H]$ değerlerindeki belirsizlikler yıldızdan yıldıza değişmekle birlikte genellikle ± 0.06 dex mertebesinde olduğu gözlenmiştir.

İterasyon sonucunda elde edilen yıldız model atmosferleri Ca, Si, Ni, Cr, C, N, O gibi diğer elementlerin bolluklarını belirlemek için kullanılmıştır. Yapısında çok ince-yapı (hyperfine structure) gösterdiği ya da başka bir atomik veya moleküler çizgi ile karışmış (blended) olduğu için EG ölçümü yapılamayan elementlere (C, N, O gibi) sentetik tayf analizi (MOOG analiz kodunun Synth alt programı) uygulanarak bolluk belirlenmiştir. Yıldızların bollukları Güneş bollukları ile karşılaştırılarak fark bollukları incelenmiştir. Güneş bollukları Kurucz vd. (1984) tarafından elde edilmiş Güneş atlası kullanılarak, bu çalışmada incelenen yıldızlara uygulanan aynı yöntemlerle hesaplanmıştır.

4. Sonuçlar

-Bu projede, Gökada bileşenleri; ince-disk, kalın-disk ve halo'dan seçilmiş 340 kadar RHB yıldız adayının yüksek-çözünürlüklü tayfları elde edilmiş ve bu yıldızların model atmosferleri (T_{eff} , $\log g$, $[Fe/H]$, v_t) ve seçilmiş bazı elementlerin (Fe, Ti, Ca, Si, Ni, Cr, C, N, O, P, S, K gibi) bollukları belirlenmiştir. Bollukları ölçülen elementlerden bazıları için yıldızların fark bollukları ($[X/Fe]$) üyesi oldukları Gökada bileşenine göre Çizelge 2'de özet olarak listelenmektedir. Yıldızlardan pek çoğu için literatürde ilk kez dikine hız hesabı yapılmıştır



XX. ULUSAL ASTRONOMİ KONGRESİ
IX. ULUSAL ASTRONOMİ ÖĞRENCİ KONGRESİ



Çizelge 2: RHB adayı yıldızlardan 5 tanesinin fark bollukları ve üyesi oldukları Gökada bileşenleri.

Sayı	Yıldız adı	[Fe I/H]	[Fe II/H]	[Ti I/Fe]	[Ti II/Fe]	[Si I/Fe]	[Ca I/Fe]	[Cr I/Fe]	[Cr II/Fe]	[Ni I/Fe]
İnce Disk										
1	HIP 19349	-0.16	-0.19	0.03	-0.05	0.15	0.12	0.00	0.37	-0.05
2	HIP 23949	-0.18	-0.23	0.00	-0.05	0.13	0.16	0.01	0.39	-0.08
3	HIP 43559	-0.26	-0.31	0.07	-0.02	0.15	0.16	0.03	0.59	-0.06
4	HIP 44087	-0.31	-0.33	0.07	0.05	0.09	0.13	0.01	0.71	-0.16
Halo										
5	HIP 44716	-0.94	-0.95	0.19	0.20	0.18	0.33	-0.06	1.88	-0.14

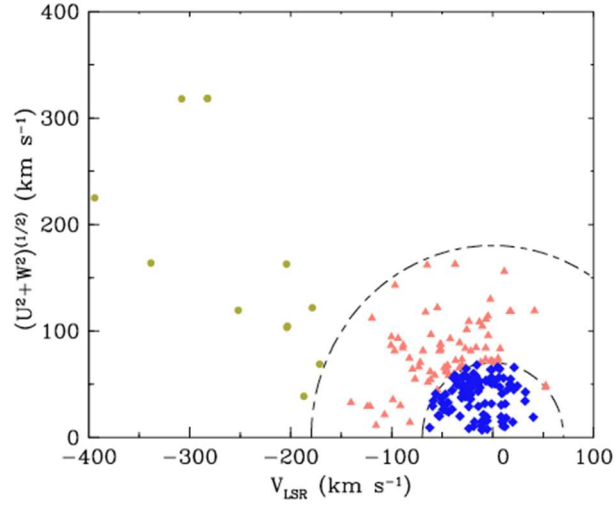
Yıldız evriminin en önemli belirteçlerinden birisi α -elementlerinin (Ti, Si ve Ca gibi) zenginliğidir. Şekil 3’de tüm proje yıldızlarından elde edilen Ti, Si ve Ca bollukları literatürden derlenen bolluklar ile karşılaştırılmaktadır. Metal bolluğuna ([Fe/H]) karşı fark bolluklarının çizildiği bu grafiklerde yıldızlarımızın çoğunun dev yıldızlar olduğu gösterdikleri α -element zenginliğinden ([α /Fe] > 0) anlaşılmaktadır. Listemizdeki bazı yıldızlar metal bollukları Güneş bolluğuna ([Fe/H]=0) yakın olsa da Si zengini oldukları dikkat çekmektedir. Bu yıldızlara ilişkin incelemelerimiz devam etmektedir.

Yıldız evriminin önemli belirteçlerinden bir diğeri de gözlenen CNO bolluklarıdır. C ve N bollukları, yıldızın dev kolunu tırmanmaya başladığı sırada yıldızın konvektif zarfının iç katmanlara doğru genişlemesiyle ve ilk tırmıklama evresinin başlamasıyla birlikte değişmeye başlar. ^{12}C , ^{13}C ve ^{14}N bolluklarının değişimi atmosfer katmanında ortaya çıkan ^{12}CN ve ^{13}CN çizgileri (8000-8040 Å bölgesi) kullanılarak karbon izotop ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) değişiminden bulunabilir. Karbon bolluğunun belirlenebilmesi için özellikle 4300 Å bölgesinde ortaya çıkan G-bandından (CH bandı) yararlanılmıştır. Oksijen bolluğu yıldızdan yıldızda küçük farklılıklar gösterse de genellikle güneş bolluğu dolayındadır. Evrimlerinin ilk başlarından kalan oksijen zenginliğine metalce fakir halo yıldızları ile kalın disk yıldızlarının bir kısmında rastlanmaktadır. Oksijen bolluğu [O I] 6300 Å’deki yasaklanmış oksijen çizgisinden belirlenmiştir. Şekil 4’de, RHB adayı yıldızlarımız içinde en düşük karbon izotop oranına ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 4$, Şekil 5) sahip HIP 33578 ($T_{\text{eff}}=5208$ K, $\log g=3.1$, [M/H]=-0.32, $v_t=1.13$ km/s) yıldızının CNO bolluklarının belirlendiği tayf bölgeleri görülmektedir.

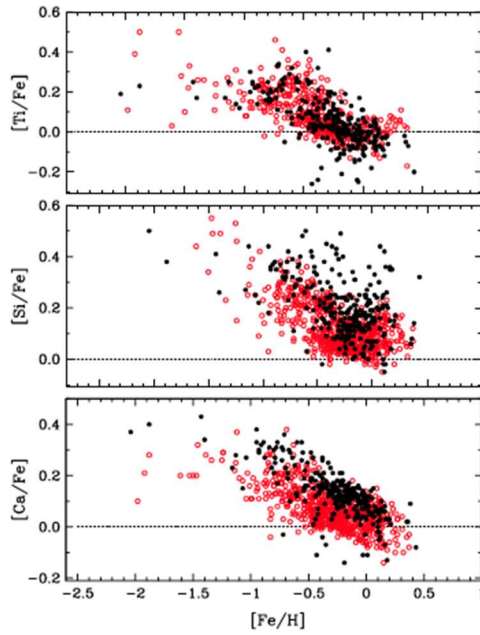
Çizelge 3: RHB adayı yıldızlardan 5 tanesinin kinematik incelemesi.

Sayı	Yıldız adı	U_{LRS}	$\sigma(U_{\text{LRS}})$	V_{LRS}	$\sigma(V_{\text{LRS}})$	W_{LRS}	$\sigma(W_{\text{LRS}})$	Üyelik
1	HIP 19349	34.5	19.1	-58.8	32.5	1.6	3.4	İnce disk
2	HIP 23949	5.8	0.2	-5.3	0.9	5.2	0.4	İnce disk
3	HIP 43559	-58.0	30.8	-1.9	19.0	26.3	3.9	İnce disk
4	HIP 44087	-52.8	26.2	17.7	12.2	-15.0	27.2	İnce disk
5	HIP 44716	-119.3	8.0	-501.0	297.5	-157.3	180.7	Halo

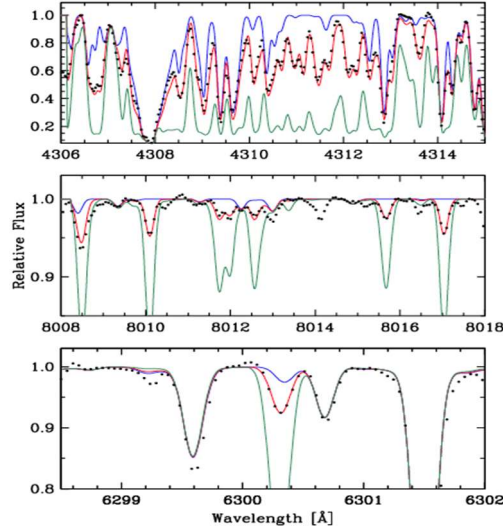
HIP 33578 yıldızı için [C/Fe]=-0.95 ve [N/Fe]=0.24 olarak bulunmuştur. Karbon bolluğundaki bu derece düşük olması yıldızın yüzeyinde gözlenen ^{12}C miktarının CN-denge değerine yakın değerlere düştüğünü göstermektedir. Literatürde bir ilk olarak etkin sıcaklığı 5200 K olan bir alan yıldızının bu kadar düşük bir izotop oranına ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 4$) sahip olduğu bulunmuştur. Bu oldukça çarpıcı bir sonuçtur. Yüzey çekimi ($\log g = 3.1$) bu yıldızın kesinlikle bir RHB yıldızı olduğunu göstermektedir. Bu konumdaki bir yıldızın bu derecede düşük bir karbon izotop oranına sahip olması standart yıldız evrim modelleri ile açıklanamamaktadır. Ekstra-karışım (örn. Charbonnel 1994) süreçlerinin etkinliği tartışılmalıdır. Şekil 5’de üç RHB adayı yıldızın karbon izotop oranları noktalanmıştır: HIP 33578, HIP 101209 ($T_{\text{eff}}=5084$ K, $\log g=2.46$, [M/H]=-0.58, $v_t=1.54$ km/s), HIP 66044 ($T_{\text{eff}}=5070$ K, $\log g=3.05$, [M/H]=-0.52, $v_t=1.08$ km/s). Bu RHB adaylarının da düşük karbon izotop oranlarının olması oldukça dikkat çekicidir.



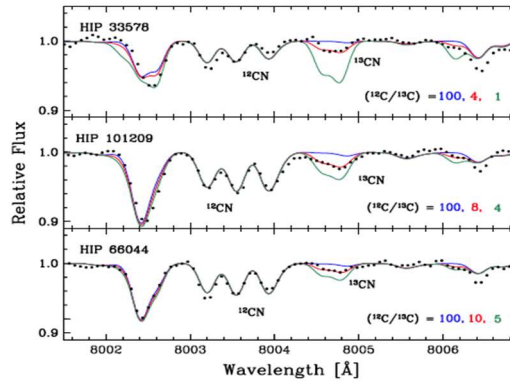
Şekil 2: Çalışmadaki uzaklığı bilinen yıldızlar için Toomre diyagramı. Kesikli çizgiler sırasıyla $V_{\text{tot}}=70$ km/s ve $V_{\text{tot}}=180$ km/s hızlarına karşılık gelmektedir. $V_{\text{tot}} < 70$ km/s ince disk (kareler), 70 km/s $< V_{\text{tot}} < 180$ km/s kalın disk (üçgenler), $V_{\text{tot}} > 180$ km/s ise halo (dolu daireler) bileşeni olan yıldızlar için uzay hızı sınır değerleridir.



Şekil 3: $[\alpha/\text{Fe}] - [\text{Fe}/\text{H}]$ grafikleri. Gözlem verileri (siyah noktalar) literatürden toplanan veriler (kırmızı içi boş daireler) ile karşılaştırılmaktadır. Literatürden toplanan veriler aynen alınmış ve hiçbir ayarlama yapılmamıştır (Tautvaišienė vd. 2001, Bensby vd. 2003, Reddy vd. 2003, 2006 ve Mishenina vd. 2006).



Şekil 4: HIP 33578 için C bolluğunun belirlendiği CH (en üst panel), N bolluğunun belirlendiği CN bölgelerinin bir kısmı (orta panel) ile O bolluğunun belirlendiği [O I] 6300 Å bölgesi (alt panel). En iyi bolluk temsili kırmızı düz çizgi ile verilen sentetik tayfır: $\log\epsilon(C)=7.31$, $\log\epsilon(N)=8.19$ ve $\log\epsilon(O)=8.37$.



Şekil 5: Üç RHB adayı yıldızın $^{12}C/^{13}C$ oranları ve bu oranların belirlendikleri ^{12}CN ve ^{13}CN bölgeleri. Gözlem noktalarını en iyi temsil eden sentetik tayf her üç panelde de ortada kırmızı düz çizgi ile gösterilmiştir.

5. Kaynaklar

- Afşar, M., Sneden, C., For, B-Q. 2012, AJ, 144, 20
Bensby, T., Feltzing, S., 2010, IAUS, 265, 300
Bensby, T., Feltzing, S., Lundström, I. 2003, A&A, 410, 527
Castelli F., Kurucz R. L., in N. Piskunov, W.W. Weiss, D.F. Gray, eds, 2003, IAU Symposium, Vol. 210, p. 20P
Charbonnel, C. 1994, A&A, 282, 811
Dehnen, W., Binney, J. J. 1998, MNRAS, 298, 387
Gray, R.O., Corbally, C. J., 2009. "Stellar Spectral Classification" by Richard O. Gray and Christopher J. Corbally. Princeton University Press, p.249
Gray, D. F., Brown, K. 2001, PASP, 113, 723
Johnson, D. R. H., Soderblom, D. R. 1987, AJ, 93, 864
Kurucz, R. L., Furenlid, I., Brault, J., & Testerman, L., 1984, Solar flux atlas from 296 to 1300 nm
Mishenina, T. V., Gorbaneva, T. I., Bienayme, O., vd. 2007, Astron. Rep., 51, 382
Ramírez, I., Meléndez, J., 2005, ApJ, 626, 465
Rose, J. A., 1985, AJ, 90, 787
Reddy, B. E., Tomkin, J., Lambert, D. L., Allende Prieto, C., 2003, MNRAS, 340, 304
Reddy, B. E., Lambert, D. L., Allende Prieto, C., 2006, MNRAS, 367, 1329
Sneden C., 1973, PhD (doktora tezi), 180S
Sneden, C., Pilachowski, C. A., Vandenberg, D. A., 1986, ApJ, 311, 826
Straizys, V., Bartkevičius, A., Sperauskas, J., 1981, A&A, 99, 152
Tautvaišienė, G., Edvardsson, B., Tuominen, I., Ilyin, I., 2001, A&Ap, 380, 578