



Evaluation of Kidney Functions in Chronic Renal Disease with Diffusion Weighted Magnetic Resonance Imaging

Kronik Böbrek Hastalığında Böbrek Fonksiyonlarının Difüzyon Ağırlıklı Manyetik Rezonans Görüntüleme ile Değerlendirilmesi

Eda Albayrak¹, Ayşegül Altunkaş¹

¹ Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyoloji Anabilim Dalı Tokat/Türkiye.

ÖZ

Amaç: Çalışmamızın amacı kronik böbrek hastalığında (KBH), böbrek fonksiyonlarının tespitinde difüzyon ağırlıklı manyetik rezonans görüntülemenin (DAG) tanısal etkinliğini araştırmaktır.

Gereç ve Yöntem: 74 kronik böbrek hastası ve 50 sağlıklı birey olmak üzere toplam 124 kişi çalışmaya dahil edildi. Hasta ve kontrol grubunda her iki böbrekten, DAG kullanılarak görünürdeki difüzyon katsayısı değerleri (GDK) ölçüldü. Ortalama GDK değerleri hasta ve sağlıklı grup arasında karşılaştırıldı. Ayrıca KBH'nın evrelerine göre GDK değerlerinde meydana gelebilecek değişiklikler ve glomerüler filtrasyon hızı (GFH) ile GDK değerleri arasındaki ilişki değerlendirildi. KBH'ni belirlemede, farklı eşik GDK değerlerinin tanısal etkinliğini araştırmak için ROC eğrisi düzenlendi.

Bulgular: GDK değerleri KBH'lı grupta, sağlıklı gruba göre belirgin oranda düşük bulundu ve KBH'nın evresi ilerledikçe GDK değerlerinde anlamlı bir düşüş tespit edildi. Ayrıca GDK ve GFH değerleri arasında kuvvetli pozitif korelasyon saptandı ($r = 0.746$, $p < 0.001$). ROC analizine göre, KBH'ni belirlemek için ortalama eşik GDK değeri <1.88 ($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{sn}$) olarak belirlendi (Eğri Altı Alan (EAA): 0,766, %95 Güven Aralığı: 0.685-0.848, Duyarlılık: 0.500, Seçicilik: 0.960, $p < 0.001$).

Sonuç: Sonuç olarak DAG ile elde edilmiş olan GDK değerleri böbrek fonksiyonlarının belirlenmesinde etkilidir ve noninvaziv bir görüntüleme yöntemi olması sebebiyle KBH'da böbrek fonksiyonlarının takibinde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Kronik Böbrek Hastalığı, Difüzyon Ağırlıklı Manyetik Rezonans Görüntüleme, Görünürdeki Difüzyon Katsayısı

ABSTRACT

Objective: To investigate the diagnostic efficiency of diffusion weighted-magnetic resonance imaging (DWI) for evaluation of functional changes that can occur in kidneys in patients with chronic kidney disease (CKD).

Materials and Methods: A total of 124 patients, 74 chronic kidney patients and 50 healthy individuals were included in the study. Measurement of apparent diffusion coefficient (ADC) was performed using DWI sections obtained from each kidneys both in patient and control groups. Mean ADC values were compared between patient and control groups. In addition, the relationship between the glomerular filtration rate (GFR) and ADC values and the changes that could occur in the ADC values according to the stages of CKD were evaluated. A receiver operating characteristic (ROC) curve was constructed to investigate the diagnostic efficacy of different cut-off ADC values in determining CKD.

Results: ADC values were significantly lower in the CKD group than in the healthy group, and ADC values showed decrease with more severe stages of the disease ($p < 0.001$). There was a strong positive correlation between GFR and ADC values ($r = 0.746$, $p < 0.001$). According to the ROC analysis, the mean cutoff ADC value was determined to be <1.88 ($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{sec}$) to determine the CKD (Area Under Curve (AUC): 0,766, 95% Confidence Interval: 0.685-0.848, Sensitivity: 0.500, Specificity: 0.960, $p < 0.001$).

Conclusion: ADC values obtained with DWI are effective in determining renal function and can be used as a non-invasive and useful method to follow-up renal functions in CKD.

Keywords: chronic kidney disease, diffusion weighted-magnetic resonance imaging, apparent diffusion coefficient

Corresponding Author: Yrd Doç Dr Eda ALBAYRAK

Address: Gaziosmanpaşa Üniversitesi Tıp Fakültesi Radyoloji Anabilim Dalı Tokat/Türkiye.

E-mail: edalbayrak1@hotmail.com

Başvuru Tarihi/Received: 15-08-2017

Kabul Tarihi/Accepted: 23-10-2017





Giriş

Kronik Böbrek Hastalığı (KBH), tübüler atrofi, interstisyel fibrozis ve azalmış kan akımı sebebiyle meydana gelen, insidansı her geçen yıl giderek artan, böbrek fonksiyonlarının ilerleyici kaybı ile karakterize kronik bir hastalıktır. KBH kontrol altına alınmadığı takdirde, böbrek doku kaybı ve böbrek fonksiyonlarının dereceli düşüşü sonucunda son dönem böbrek yetmezliği ve fibrozis ile sonuçlanabilmektedir (1). KBH'da tedavinin planlanması için hastalığın tanı ve tiplendirmesi gerekmektedir ve bu amaçla kullanılan en geçerli yöntem renal biyopsidir (2). Ancak biyopsi hematüri, perirenal hematoma, arteriovenöz fistül, enfeksiyon ve hatta ölüm riski taşımaktadır ve hastalığın takibi amacıyla tekrarlayıcı biyopsilerden kaçınılmalıdır (3).

Fonksiyonel manyetik rezonans görüntüleme (MRG) teknikleri erken renal doku hasarının noninvaziv ve sayısal yolla değerlendirilmesine imkan tanımaktadır. Difüzyon ağırlıklı görüntüleme (DAG) fonksiyonel MRG yöntemlerinden biridir ve kan mikrosirkülasyonunun ve doku içindeki su protonlarının Brownian hareketinin kombine etkilerini tespit etmeye duyarlı bir görüntüleme yöntemidir. DAG, Görünürdeki Difüzyon Katsayısı (GDK) adı verilen bir yöntem ile sayısal olarak ifade edilir (4-6). Literatürde böbrek fonksiyonlarının DAG ile değerlendirilmesine yönelik birtakım çalışmalar yer almakta olup (6-15), bu çalışmaların az bir kısmında KBH'nı belirlemek için uygun bir eşik GDK değeri belirlenmiştir (12, 13).

Çalışmamızın amacı DAG ile ölçülen GDK değerleri ile KBH'nın evreleri ve böbrek fonksiyonlarını gösteren temel parametre olan glomerüler filtrasyon hızı (GFH) arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve KBH'nı belirlemede uygun bir eşik GDK değeri saptamaktır.

GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışma protokolü etik kurul tarafından onaylandı. Kliniğimizde Mayıs 2012- Ağustos 2014 yılları arasında çeşitli sebeplerle üst abdominal MRG tetkiki uygulanan ve aynı dönemde serum kreatinin değerleri elde olunan hastalar retrospektif olarak değerlendirildi. Hastaların, yaş cinsiyet ve serum kreatinin düzeyleri hastanenin veri tabanından elde edildi. GFH değerleri MDRD (The Modification of Diet in Renal Disease) formülüne ($GFH = 186 \times ([Serum\ kreatinin]^{-1.154}) \times ([Yaş]^{-0.203}) \times (0.742\text{ kadın ise})$) göre hesaplandı ve National Kidney Foundation kılavuzuna göre sınıflandırıldı. $GFH \geq 90$ ml/dk evre 1, $GFH = 60-89$ ml/dk evre 2, $GFH = 30-59$ ml/dk evre 3, $GFH = 15-29$ ml/dk evre 4 ve $GFH < 15$ ml/dk evre 5 KBH olarak tanımlandı (16). Böbrekte solid veya kistik lezyon saptanan ve ölçüm için yeterli parankimin bulunmadığı hastalar, ciddi derecede parankimal skarı bulunan veya artefakt sebebiyle ölçüm yapılamayan hastalar, ayrıca kreatinin değerleri hastane otomasyon sisteminde bulunmayanlar çalışmaya dahil edilmedi.

Çalışma, 1.5T GE Signa Hispeed Excite MR sistemi (General Electric, Signa EXCITE 14.0 Waukesha, WI) kullanılarak yapıldı. DAG kesitleri aksiyal planda, difüzyon ağırlıklı eko planar görüntüleme (DW-EPI) sekansı kullanılarak, $b=500$, and $b=1000$ s/mm² ile nefes tutmasız olarak elde edildi. Bu sekansı elde etmek için kullanılan parametreler sırasıyla; TR 3000 ms, TE 90,4 ms, matriks boyutu 128x128 mm, FOV 230 mm, görüntüleme süresi 32 sn, kesit kalınlığı 7 mm kesit aralığı 1.5 mm idi. GDK haritası cihaz tarafından eş zamanlı ve otomatik olarak hesaplandı.

DAG kesitleri bir iş istasyonuna (Advantage Windows, software version 2.0, General Electric Medical Systems, Milwaukee, WI, USA) aktarıldı. Ölçümler tek radyolog tarafından gerçekleştirildi. Böbrek parankimine kortikomedüller alanı içerecek şekilde sirküler



bir ilgi bölgesi (region of interest-ROI) yerleştirildi. ROI'ler yerleştirilmeden önce her iki böbrek T2 ağırlıklı MRG kesitleri üzerinden morfolojik olarak değerlendirildi ve bu sayede ölçüm yapılan alanın artefakt, kist, kitle yabancı cisim ve damar içermemesi sağlandı. ROI'lerin yerleştirilmesinin ardından GDK değerleri cihaz tarafından otomatik olarak mm²/s cinsinden hesaplandı. Böbrek medial kesimde, ön, arka ve orta bölüme ROI'ler yerleştirilmek suretiyle b=500 ve b=1000 s/mm² değerleri için ayrı ayrı üçer ölçüm olmak üzere her bir böbrekten toplam 6 ölçüm yapıldı. Bu 6 değerlerin ortalaması ilgili böbrek için ortalama GDK değeri olarak kabul edildi.

İstatistiksel Analiz:

Çalışmada nicel değişkenler aritmetik ortalama ± standart sapma ve nitel değişkenler sayı ve yüzde biçiminde gösterildi. Sürekli değişkenler yönünden iki grup arasında farklılık arandığında, İki Ortalama Arasındaki Farkın Önemlilik testi kullanıldı. Sürekli değişkenler yönünden ikiden fazla grup arasında farklılık arandığında, Tek Yönlü Varyans Analizi kullanıldı. Anlamlı Tek Yönlü Varyans Analizi sonrası ikili karşılaştırma için

Tukey HSD testi kullanıldı. Nitel değişkenler arasındaki ilişki olup olmadığı Ki-Kare testleri ile incelendi. GDK ve GFH arasındaki doğrusal ilişkinin kuvveti ve yönü için pearson korelasyon katsayısı kullanıldı. KBH'nı belirlemede, farklı eşik GDK değerlerinin tanısal etkinliğini araştırmak için receiver operating characteristic (ROC) eğrisi düzenlendi. p değerleri 0.05'den küçük olarak hesaplandığında istatistiksel olarak anlamlı kabul edildi. Hesaplamalar hazır istatistik yazılımı ile yapıldı (IBM SPSS Statistics 19, SPSS inc., an IBM Co., Somers, NY).

BULGULAR:

Çalışmaya 74 KBH ve 50 sağlıklı birey olmak üzere toplam 124 kişi (60 erkek, 64 kadın; yaş ortalaması 55.3±11.8, yaş aralığı: 18-67) dahil edildi. Sağ ve sol böbreğin GDK değerleri arasında istatistiksel açıdan anlamlı farklılık saptanmadı (p=0.139). Tablo 1'de demografik veriler ve laboratuvar bulgularının hasta ve sağlıklı gruba göre dağılımı gösterilmektedir. Buna göre ortalama GDK değerleri KBH'li grupta, sağlıklı gruba göre belirgin oranda düşük bulundu (p < 0.001).

Tablo 1. Sayısal Değişkenlerin Gruplara Göre Dağılımı

	Grup		p
	Kontrol (n=50)	KBH (n=74)	
Yaş	54.94±14.14	55.54±10.02	0.782
GFH	102.15±10.7	44.78±31.71	<0.001
GDK _{sağ böbrek}	2.24±0.29	1.79±0.5	<0.001
GDK _{sol böbrek}	2.27±0.28	1.81±0.53	<0.001
GDK _{ortalama}	2.25±0.27	1.8±0.5	<0.001

GFH: glomerüler filtrasyon hızı, GDK: Görünürdeki Difüzyon Katsayısı(x10-3mm²/s) (İki Ortalama Arasındaki Farkın Önemlilik Testi kullanıldı)

Tablo 2 ve Çubuk Grafiğinde (Şekil 1) değişkenlerin kontrol grubu ve hasta grubun alt grupları arasındaki dağılımı gösterilmiştir. Buna göre GDK KBH'nın evresi ilerledikçe

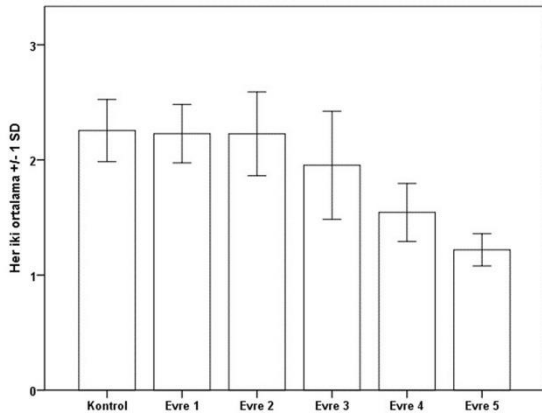
istatistiksel açıdan anlamlı bir düşüş göstermektedir ve kontrol grubu ile KBH'nın alt grupları arasındaki farklılıklar istatistiksel açıdan anlamlıdır (p < 0.001).

Tablo 2. Sayısal Değişkenlerin Kontrol Grubu ve KBH'nın Alt Grupları Arasındaki Dağılımı

	Stage						p
	Kontrol	Evre1	Evre2	Evre3	Evre4	Evre5	
Yaş	54.94±14.14	56±7.14	53.46±14.47	59.07±7.35	52.88±11.65	56.35±8.12	0.761
GFH	102.15±10.7 ^a	93.49±3.16 ^b	69.93±6.62 ^c	41.64±9.87 ^d	21.84±4.45 ^e	9.61±3.31 ^f	<0.001
GDK _{sağ} böbrek	2.24±0.29 ^a	2.24±0.2 ^a	2.2±0.38 ^{ab}	1.92±0.44 ^b	1.54±0.26 ^c	1.22±0.14 ^d	<0.001
GDK _{sol} böbrek	2.27±0.28 ^a	2.21±0.39 ^{ab}	2.25±0.37 ^{ab}	1.99±0.51 ^b	1.55±0.25 ^c	1.22±0.14 ^d	<0.001
GDK _{ortalama}	2.25±0.27 ^a	2.23±0.25 ^{ab}	2.23±0.36 ^{ab}	1.95±0.47 ^b	1.54±0.25 ^c	1.22±0.14 ^d	<0.001

Satır olarak farklı üst indisler istatistiksel anlamlı farklılığı göstermektedir (Tek Yönlü ANOVA kullanıldı). GFH: glomerüler filtrasyon hızı, GDK: Görünürdeki Difüzyon Katsayısı($\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$)

Pearson Korelasyon Katsayısına göre GDK ve GFH arasında kuvvetli pozitif korelasyon saptandı ($r= 0.746$, $p < 0.001$).

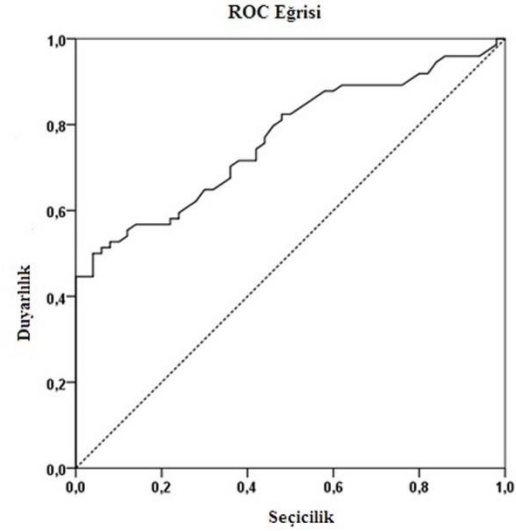


Şekil 1. Ortalama GDK Değerinin Kontrol Grubu ve KBH'nın Evrelerine Göre Dağılımını Gösteren Çubuk Grafiği

ROC analizine göre, ortalama KBH'nı belirlemek için ortalama eşik GDK değeri $<1.88 (\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{sn})$ olarak belirlendi (Şekil 2) (Eğri Altı Alan (EAA): 0,766, %95 Güven Aralığı: 0.685-0.848, Duyarlılık: 0.500, Seçicilik: 0.960, $p: <0.001$).

TARTIŞMA:

Mevcut çalışmada GDK değerlerinin KBH'lı grupta, sağlıklı gruba göre belirgin oranda düşük olduğu ve KBH'nın evresi ilerledikçe GDK değerlerinde anlamlı bir düşüş saptandığı gösterilmektedir. Ayrıca GDK ve GFH değerleri arasında kuvvetli pozitif korelasyon saptanmıştır. Bu sonuçlar böbrek fonksiyonlarının saptanması ve takibinde DAG'nin kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 2: Ortalama GDK Değerini Gösteren ROC Eğrisi

DAG erken serebral iskemi, serebral tümör ve enfeksiyonların karakterizasyonu için çoğunlukla nöroradyoloji alanında kullanılmaktadır (17). Son yıllarda, teknolojik ilerlemeler ve MRG tekniğinde özel yüzey bobinleri ve yüksek amplitüd gradientleri gelişimi gibi uygulamalar, ekstrakraniyal organların noninvaziv değerlendirmesinde DAG'nin etkinliğini ve kullanım alanını giderek arttırmıştır (18). Böbrekler yüksek kan akımı ve yoğun su filtrasyonu içerdikleri için ve DAG dokulardaki su moleküllerinin difüzyon özelliklerindeki değişikliklerin tespitine dayalı bir görüntüleme yöntemi olduğundan böbrek parankiminin değerlendirilmesi için uygun bir görüntüleme yöntemidir (12, 15, 19). Dahası DAG, noninvaziv bir görüntüleme yöntemi olması sebebiyle, KBH'da böbrek fonksiyonlarının tespiti ve takibine tekrarlayıcı ölçümlere olanak sağlar. Son yıllarda böbrek fonksiyonlarının değerlendirilmesinde



GDK'nın rolü ile ilgili birtakım çalışmalar yapılmıştır (6-15). Li ve ark. (7) 12 sağlıklı ve 71 hasta bireyi dahil ettikleri çalışmalarında renal GDK değerleri, renal biyopsi ve GFH sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve daha yoğun histolojik değişiklikler ile GDK arasında korelasyon saptamışlardır. Ancak GDK değerleri ile GFH arasında anlamlı bir ilişki saptamamışlardır. Bu çalışmanın aksine, bizim çalışmamızda olduğu gibi, daha birçok güncel çalışmada da GFH ve GDK değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı bir ilişki saptanmıştır (8-14). Bu çalışmaların bir kısmında, KBH'nın evresi ile GDK arasındaki ilişki incelenmiştir (10-13). Xu ve ark. (10) 0 ila 500 s / mm² arasında değişen b değerlerini kullanarak elde ettikleri renal GDK değerleri ile KBH evreleri arasında (r = -0.492, P = 0.000) negatif yönlü korelasyon bulmuşlardır. Yazarlar böbreklerin GDK değerlerinin, KBH evre 1 dışındaki çoğu evresinde normalden anlamlı derecede düşük olduğunu belirtmişlerdir. Toya ve ark. (11), 50 ve 1000 s/mm² b-değerlerini uyguladıkları çalışmalarında, evre 4 ve evre 5 KBH arasında anlamlı bir fark bulmuşlardır. Goyal ve ark. (12), KBH'nın farklı evrelerinin ortalama GDK değerlerinin birbirinden belirgin olarak farklı olduğunu ve GDK değerlerinin, artan evre ile azalma eğilimi gösterdiğini bildirdiler. Ortalama GDK değerlerini evre 3, evre 4 ve evre 5 için sırasıyla, $2.2964 \pm 0.1243 (\times 10^{-3} \text{mm}^2 / \text{s})$, $1.8413 \pm 0.2117 (\times 10^{-3} \text{mm}^2 / \text{s})$ ve $1.5218 \pm 0.1853 (\times 10^{-3} \text{mm}^2 / \text{s})$ buldular. Şafak ve ark (13) ise yukarıda bahsedilen çalışmaların büyük kısmından farklı olarak, evre 1 ve evre 2 KBH'nı çalışmalarına dahil etmişlerdir. Biz de evre 1 ve evre 2 KBH'nı çalışmamıza dahil ettik ve bu çalışmada da (13), bizim çalışmamızla benzer şekilde KBH'nın evresi ilerledikçe GDK değerlerinde kademeli bir azalma ve GDK değerleri ile GFH arasında pozitif yönlü bir korelasyon saptanmıştır.

Böbrek fonksiyonlarının DAG ile değerlendirildiği yukarıda bahsedilen çalışmaların çok azında KBH'nı belirlemede ROC analizi ile elde edilmiş, eşik GDK

kestirim değeri ifade edilmiştir (12, 13). Goyal ve ark (12) 0 ile 500 s/mm² arasında değişen b değerlerini kullandıkları çalışmalarında, KBH'nı belirlemek için eşik GDK değerini $<2.0354 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ olarak belirlemişlerdir. Şafak ve ark (13) ise 0 ve 400 s / mm² b değerleri kullanılarak yapılan çalışmalarında, kontrol grubu, evre 1 ve evre 2 KBH'nı evre 3, evre 4, ve evre 5 KBH'dan ayırt etmek için $<1.151 \times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s}$ eşik GDK değeri bildirmişlerdir. Biz çalışmamızda 500 ve 1000 s/mm² olmak üzere 2 farklı b değeri kullandık ve KBH'nı belirlemede ortalama eşik renal GDK değerini $<1.88 (\times 10^{-3} \text{mm}^2/\text{s})$ olarak belirledik. Bu çalışmalarda birbirinden farklı eşik değerler elde edilmiştir. Bunun sebebi, kullanılan b değerine bağlı olarak elde edilen GDK değerlerinin değişmesi olabilir. Çeşitli çalışmalarda değişik b değerleri kullanılmakta olup bu konuda ortak bir uygulama bulunmamaktadır (12). Buna bağlı olarak da hastalığın belirlenmesinde ortak ve standart bir GDK değeri elde edilememektedir. Gelecekte efektif b değerlerinin kullanıldığı, ortak bir fikir mutabakatının uygulandığı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmamızın bazı kısıtlılıkları vardır. Birincisi; GDK değerleri tek araştırmacı tarafından ölçülmüş olup, bu sebeple araştırmacılar arası farklılık değerlendirilmesi yapılamamıştır. Ancak çalışmamızda tek bir ölçüm ile yetinilmemiş olup, her bir böbrekten en az 6 GDK değeri elde edilmiştir. İkincisi; çalışmamızda GDK değerleri biyopsi sonuçları ile karşılaştırılmadığından, fibrozis derecesi ve KBH'na sebep olan histopatolojik bulgular ile GDK arasındaki ilişki karşılaştırılamamıştır.

SONUÇ

DAG ile elde edilmiş olan GDK değerleri böbrek fonksiyonlarının belirlenmesinde etkilidir ve noninvaziv bir görüntüleme yöntemi olması sebebiyle KBH'da böbrek fonksiyonlarının takibinde laboratuvar



testlerini destekleyici, alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Nangaku M Chronic hypoxia and tubulointerstitial injury: A final common pathway to end-stage renal failure. *J Am Soc Nephrol* 2006;17(1): 17-25

2. Cagnoli L Instructions and implementations for percutaneous renal biopsy. Guidelines for the therapy of glomerular nephropaties. *G Ital Nefrol* 2003;20(Suppl. 24):3-47.

3. Parrish AE Complications of percutaneous renal biopsy: a review of 37 years' experience. *Clin Nephrol* 1992;38(3):135-41.

4. Chandarana H, Lee VS Renal functional MRI: are we ready for clinical application? *AJR Am J Roentgenol* 2009;192(6):1550-7.

5. Kim S, Naik M, Sigmund E, Taouli B Diffusion-weighted MR imaging of the kidneys and the urinary tract. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 2008;16(4):585-96.

6. Thoeny HC, De Keyzer F, Oyen RH, Peeters RR Diffusion-weighted MR imaging of kidneys in healthy volunteers and patients with parenchymal diseases: initial experience. *Radiology* 2005;235(3):911-7.

7. Li QH, Li JN, Zhang L, Chen Y, Zhang M, Yan F Diffusion-weighted imaging in assessing renal pathology of chronic kidney disease: a preliminary clinical study. *Eur J Radiol* 2014; 83(5):756-62.

8. Zhao J, Wang ZJ, Liu M, et al. Assessment of renal fibrosis in chronic kidney disease using diffusion-weighted MRI. *Clin Radiol* 2014; 69(11):1117-22.

9. Y. Xu, X. Wang, X. Jiang X Relationship between the renal apparent diffusion coefficient and glomerular filtration rate: preliminary experience, *J. Magn. Reson. Imaging* 2007 Sep;26(3):678-81

10. X. Xu, W. Fang, H. Ling, W. Chai, K. Chen K Diffusion-weighted MR imaging of kidneys in patients with chronic kidney disease: initial study, *Eur. Radiol* 20(4):978-83.

11. Toya R, Naganawa S, Kawai H, Ikeda M Correlation between estimated glomerular filtration rate (eGFR) and apparent diffusion coefficient (ADC) values of the kidneys, *Magn. Reson. Med. Sci* 2010;9(2):59-64.

12. Goyal A, Sharma R, Bhalla AS, Gamanagatti S, Seth A Diffusion-weighted MRI in assessment of renal dysfunction, *Indian J. Radiol. Imaging* 2012;22(3):155-9.

13. Yalçın-Şafak K, Ayyıldız M, Ünel SY, Umarusman-Tanju N, Akça A, Baysal T The relationship of ADC values of renal parenchyma with CKD stage and serum creatinine levels. *Eur J Radiol Open* 2015;3:8-11.

14. Carbone SF, Gaggioli E, Ricci V, Mazzei F, Mazzei MA, Volterrani L Diffusion-weighted magnetic resonance imaging in the evaluation of renal function: a preliminary study. *Radiol Med* 2007;112(8):1201-10.

15. Namimoto T, Yamashita Y, Mitsuzaki K, Nakayama Y, Tang Y, Takahashi M Measurement of the apparent diffusion coefficient in diffuse renal disease by diffusion-weighted echo-planar MR imaging, *J. Magn. Reson. Imaging* 1999;9(6):832-7.

16. National Kidney Foundation. K/DOQI clinical practice guidelines for chronic kidney disease: Evaluation, classification and stratification. *Am J Kidney Dis* 2002;39 (2 Suppl 1):1-266.

17. Bammer R Basic principles of diffusion-weighted imaging, *Eur. J. Radiol.* 2003;45(3):169-84.

18. Koh DM, Collins DJ Diffusion-weighted MRI in the body: applications and challenges in oncology, *Am. J. Roentgenol* 2007;188(6):1622-35.

19. Mahmoud H, Buchanan C, Francis ST, Selby NM Imaging the kidney using magnetic resonance techniques: structure to function. *Curr Opin Nephrol Hypertens* 2016;25(6):487-93.