

Kardiyak bilgisayarlı tomografi ve radyasyon

Cardiac computed tomography and radiation

Burak Sezenöz, Asife Şahinarslan

Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi, Kardiyoloji Anabilim Dalı, Ankara-Türkiye

ÖZET

Son yıllardaki teknik gelişmeler nedeniyle kardiyovasküler hastalıkların tanısında bilgisayarlı tomografinin yeri gün geçtikçe artmaktadır. Ancak bu işlem sırasında kullanılan radyasyon dozu, buna bağlı oluşabilecek potansiyel sonuçlar konusunda tartışma yaratmaktadır. Elimizde henüz bilgisayarlı tomografide kullanılan radyasyon dozunun yol açabileceği istenmeyen etkiler konusunda net veriler bulunmamaktadır. Bu derlemede bilgisayarlı tomografi ve radyasyon riski ile ilgili literatürdeki veriler gözden geçirilmiştir. Bilgisayarlı tomografide kullanılan radyasyon dozunu azaltmak için alınabilecek önlemlerin başında testin doğru endikasyonla, uygun hastada yapılması gelmektedir. Bunun yanında son yıllarda geliştirilen radyasyon azaltıcı teknolojiler ve kişiye özgü çekim teknikleri sayesinde kullanılan radyasyon dozu belirgin ölçüde azaltılabilmektedir. Klinisyenlerin radyasyon riskinin azaltılması açısından kullanılması gereken teknikler konusunda bilgi sahibi olmaları ve çalıştıkları merkezdeki teknik olanakların farkında olmaları önem taşımaktadır. (*Anadolu Kardiyol Derg 2013; 13: 374-8*)

Anahtar kelimeler: Bilgisayarlı tomografi, radyasyon, kardiyovasküler hastalık

ABSTRACT

With the recent technological developments, computed tomography is becoming more important in the diagnosis of cardiovascular diseases. However, potential complications of the radiation dose used during the test have led debates. In the current situation, the data about undesirable effects of radiation dose used in cardiac computed tomography is not clear. In this paper, we reviewed the data about computed tomography and the risk of radiation. In order to reduce the risk of radiation due to computed tomography, the test should be performed with proper indication and in suitable patients. Besides, recently developed radiation dose reduction technologies and patient specific protocols have significantly reduced the radiation exposure. The clinicians should be well informed about the radiation reduction techniques and aware of the technical capabilities in their hospital. (*Anadolu Kardiyol Derg 2013; 13: 374-8*)

Key words: Computed tomography, radiation, cardiovascular diseases

Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayarlı tomografi (BT), uzaysal ve zamansal çözünürlüğündeki iyileşmeye bağlı olarak kalp hastalıklarının değerlendirilmesinde, özellikle de koroner arter anatomisinin görüntülenmesinde kullanılabilir duruma gelmiştir. Yapılan çalışmalarda gösterilen yüksek duyarlılık ve negatif tahmin edici değer, düşük-orta riskli hastalarda koroner arter hastalığı varlığını

dışlamak için bu testin kullanılabilirliğini göstermektedir (1-3). Bilgisayarlı tomografi ile yapılan anjiyografi gereksiz kalp kateterizasyonlarını azaltmada faydalı bir görüntüleme yöntemi olarak da yarar sağlayabilir. Ayrıca BT kardiyovasküler yapı ve fonksiyonların değerlendirilmesinde de giderek daha sık yer almaktadır (4).

Son dönemde bilgisayarlı tomografinin kardiyoloji pratiğine hızlı girişi ile tomografide kullanılan radyasyon dozunun etkileri de tartışılmaya başlanmıştır. Bilgisayarlı tomografide kullanılan

Yazışma Adresi/Address for Correspondence: Dr. Asife Şahinarslan, Gazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Hastanesi, Kardiyoloji Anabilim Dalı, Kat: 6 Beşevler 06500 Ankara-Türkiye Tel: +90 312 202 56 24 Faks: +90 312 212 90 12 E-posta: asifesah@yahoo.com

Kabul Tarihi/Accepted Date: 09.11.2012 **Çevrimiçi Yayın Tarihi/Available Online Date:** 11.04.2013

© Telif Hakkı 2013 AVES Yayıncılık Ltd. Şti. - Makale metnine www.anakarder.com web sayfasından ulaşılabilir.

© Copyright 2013 by AVES Yayıncılık Ltd. - Available online at www.anakarder.com

doi:10.5152/akd.2013.108



radyasyon dozunun konvansiyonel tekniklere göre çok daha yüksek olması ve bu yöntemlerin yaygın ve kontrolsüz kullanımı, tomografinin kanser riskinde artışa yol açabileceği ile ilgili endişeler doğurmaktadır (5-7).

Bu derlemenin amacı, kardiyak BT incelemelerindeki radyasyon dozu ve bunun olası sonuçları ile radyasyon dozunu azaltmak amacıyla yapılabilecek uygulamaları irdelemektir.

Radyasyon

Maddenin yapı taşı olan atom, proton ve nötronlardan oluşan bir çekirdek ve çekirdeğin etrafında dönen elektronlardan meydana gelir. Eğer herhangi bir maddenin atom çekirdeğindeki nötronların sayısı proton sayısından fazla ise çekirdekte kararsızlık ortaya çıkar. Fazla nötronlar kararlı duruma geçmek için parçalanır. Bu parçalanma sırasında ortama yayılan enerjiye "radyasyon" denir. Tıbbi görüntüleme için kullanılan X ışınları iyonlaştırıcı radyasyon grubundan, yüksek frekanslı, yüksek enerjili ışınlardır.

Radyasyonun dokular üzerindeki etkileri somatik ve genetik etkiler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir (8, 9). Somatik etkiler, kendi içinde saptanabilen (deterministic) ve tahmini (stochastic) etkiler olarak da ayrılır. Saptanabilen etkiler geniş vücut bölgelerinin yüksek doz radyasyona maruz kalması ile ortaya çıkar. Belirli bir eşik değerinin üzerinde radyasyon dozu gerekir ve etki doz ile doğru orantılı olarak artar. Yanıklar, cilt lezyonları, saç dökülmesi, katarakt ve prenatal etkiler bu grupta yer alır. Tahmini etkiler ise düşük dozlarda radyasyona uzun süre maruz kalınma ile ortaya çıkar. Belirli bir eşik dozu yoktur. Risk doz ile artar ama etkinin şiddeti dozdan bağımsızdır. Etkinin ortaya çıkması için genellikle uzun bir bekleme süresi gerekir. Radyasyona bağlı kanser bu gruptadır. Risk kümülatiftir ve etkinin derecesi yaş, dokunun tipi ve radyasyonun cinsi ile yakından ilişkilidir. Genetik etkiler ise üreme hücrelerindedir ve radyasyona maruz kalan kişinin kendinde değil, daha sonraki nesillerde görülür. Genetik etkinin ortaya çıkabilmesi için, radyasyona maruz kalan hücre fertilize olmalıdır.

Hastanın maruz kaldığı radyasyon dozunu ölçmek için farklı parametreler önerilmekle birlikte, farklı yöntemlerde kullanılan radyasyon dozunu karşılaştırmaya izin vermesi nedeni ile günlük pratikte bu amaç için en sık kullanılan parametre, birimi milisievert (mSv) olan, efektif dozdur (ED) (10, 11). Efeitoif doz belirli bir organda lokalize radyasyon ile aynı zarara yol açacak toplam vücut radyasyonunun miktarı olarak tanımlanmaktadır ve atom bombası patlamalarından kurtulan kişilerin uzun süreli takiplerinden elde edilen verilere dayanarak hesaplanmaktadır. Ancak bu parametrenin, varsayımlara dayanan bir takım formüller ile hesaplanan izafi bir değer olduğu, fiziksel bir standardının olmadığı unutulmamalıdır. Tıbbi işlemlerde karşı karşıya kalınan düşük dozda kısmi radyasyona bağlı zararı, tüm vücutları yüksek dozda radyasyona maruz kalmış kişilerdeki sonuçlara göre tahmin etmesi de önemli bir kısıtlılıktır (11). Ayrıca ED hastaya özgü mutlak riski göstermekten çok genel popülasyondaki riski göstermeye göre geliştirilmiştir (10). Doz-length product (DLP) ise tek bir BT çekimi sırasında hastanın karşı karşıya kaldığı radyasyon miktarını gösterir ve BT cihazları üzerinde çekim sonrası mGy x cm olarak verilir (10).

Kardiyak BT ve kanser riski

Bilgisayarlı tomografide kullanılan radyasyon dozu, X-ışını kullanılan diğer konvansiyonel görüntüleme yöntemlerine göre daha fazladır (konvansiyonel koroner anjiyografide ortalama 6 mSv iken, BT anjiyografi için ortalama 11 mSv) (12, 13). Tıbbi görüntülemede kullanılan radyasyon ve kanser arasındaki ilişkiyi araştıran büyük epidemiyolojik çalışmalar henüz yapılmamıştır. Bu nedenle BT'ye bağlı radyasyonun oluşturduğu kanser riskinin kantitatif değerlendirmesinde atom bombası patlamalarından sonra sağ kalan kişilerdeki gözlemsel verilere dayanılarak risk tahmin edilmeye çalışılmaktadır (5, 6). Bu çalışmalarda, atom bombası patlamaları sırasında kardiyak BT incelemelerinde kullanılan doza benzer bir doza maruz kaldığı düşünülenler incelendiğinde normal popülasyona göre kanser oranının daha fazla olduğu görülmüştür (14-17). Atom bombasından sağ kalanlardaki veriler popülasyonun çok geniş olması, tüm yaşları ve her iki cinsi de içermesi nedeniyle değerlidir. Öte yandan bu çalışmaların önemli dezavantajları da vardır. Her şeyden önce maruz kalınan gerçek radyasyon dozu bilinmemektedir. Tüm hastalar Japon olduğu için etnik sınıfın sonuçlarda rolü olabilir. Ayrıca atom bombası patlamalarında radyasyon çok geniş bir ortamda kontrolsüz verilmiştir. Radyasyonun çevrede ve ekolojik dengede yol açtığı hasar ve buna bağlı ortaya çıkan tepkimeler de kanser oranını etkilemiş olabilir. En önemlisi atom bombası patlamalarında ortaya çıkan radyasyon tipi oldukça çeşitlidir. Oysa medikal görüntülemede hasta, kontrollü bir ortamda çok kısa süre için sadece X-ışınına maruz kalır. Bu faktörler nedeni ile bu çalışmalardan yapılan çıkarımlar da net değildir. Bunun yanı sıra genel olarak Hiroshima ve Nagasaki'de atom bombası patlaması sonrası gelişen kanser ilişkili ölümlerin büyük çoğunluğunun radyasyon ile ilişkili olduğu inanılmasına rağmen, bunlar arasında saptanan 3.350 kanser hastasının sadece %10'u radyasyona bağlanmıştır (18). Zaten uluslararası kuruluşların da bu verilere dayanarak yaptığı yorumlar birbirinden farklıdır. Uluslararası Radyasyondan Korunma Komisyonu (International Commission on Radiologic Protection) 1 mSv medikal radyasyonun 1.000.000 bireyde 50 ek ölümcül kansere yol açacağını tahmin etmektedir. Bu toplum bazında düşünüldüğünde büyük bir sayıyı oluşturmaktadır (19). Fransız Bilim Akademisi (Académie des Sciences) ise 20 mSv'in altındaki radyasyon dozu için kanser riskinde artışı destekleyen yeterli veri olmadığını savunmaktadır (20). Ayrıca doku kültüründe yapılan çalışmalarda çelişkiyi daha fazla arttırmaktadır. Bu çalışmalarda düşük doz radyasyonun, serbest radikalleri detoksifiye eden mekanizmaları uyarıcı etki gösterdiği saptanmıştır (21). "Radyasyon hormesis" denen bu hipotez bugüne kadar laboratuvar ortamı dışında gösterilemese de düşük doz radyasyonun faydalı etkilerinin olabileceğini düşündürülebilir.

Eldeki kontrollü çalışmalar ise daha çok radyasyon ortamında çalışan sağlıklı kişilerde yapılan çalışmalardır. Bunlardan 1897-1979 arasında radyoloji derneklerine kayıtlı İngiliz radyologları 1997'ye kadar takip eden çalışmada, kanser veya radyasyonla ilişkili hastalıklardan ölüm oranında bir artışa rastlanmamıştır (22). On beş farklı ülkeden, 407.391 nükleer endüstri işçisinin 20

yıla kadar takibini içeren başka bir çalışmada ise radyasyon dozu, tüm nedenlere bağlı ölüm ve kansere bağlı mortalite ile ilişkili bulunmuştur. Ayrıca nükleer endüstride çalışma süresinin de sonuçlar üzerine belirgin olarak etkisi olduğu saptanmıştır. Bu çalışma dozimetre ölçümlerinin net olması, farklı etnik grupları içermesi ve ortalama dozun BT 'de alınan doza çok yakın olması nedeniyle değerli bir veri sunmaktadır. Öte yandan, mortalitenin sadece Kanada'daki işçilerde görülmesi ve farklılığın akciğer kanserindeki artıştan kaynaklanıyor olması, sigara gibi çevresel faktörlerin etkisi hesaba katılmadığı için verilerin değerini azaltmaktadır (23).

Bizim kliniğimizde yapılan, BT anjiyografi ve konvansiyonel anjiyografide kullanılan radyasyon dozunun DNA üzerine etkisinin karşılaştırıldığı çalışmada da; BT anjiyografide kullanılan radyasyon dozunun, konvansiyonel anjiyografide kullanılan radyasyon dozuna göre belirgin olarak daha fazla olduğu saptanmıştır. Her iki yöntemde de radyasyona bağlı belirgin, ölçülebilir bir DNA hasarı ortaya çıksa da hasarın boyutu her iki yöntem arasında anlamlı bir farklılık göstermemektedir (24).

Bütün bu veriler, kanser ile radyasyon arasındaki ilişkinin değerlendirmesinde belirsizliklere yol açmaktadır. Bu nedenle daha net veriler elde edilinceye kadar sadece gerçekten gerekli olduğunda ve mümkün olduğunca düşük dozda radyasyon kullanmaya özen gösterilmelidir. Bununla birlikte tıbbi görüntüleme-deki radyasyon-kanser ilişkisi açısından daha yüksek riskli kabul edilen hasta grupları konusunda ise bir görüş birliği olduğu söylenebilir. Büyüme evresinde oldukları için çocuklar, radyasyon etkilerinin çıkmasına yetecek kadar uzun yaşam beklentisi olduğu için genç hastalar, görüntüleme alanına giren dokuların daha duyarlı olması nedeni ile genç kadınlar ve radyasyon emilimi daha yüksek olacağından vücut yapıları küçük olan hastalarda radyasyonun getirdiği risk daha yüksektir (25).

Kardiyak BT'de radyasyon dozu

Bilgisayarlı tomografide alınan radyasyon miktarı birçok faktöre bağlıdır. Hasta ile ilişkili faktörler arasında hastanın vücut-kütle indeksi, kalp hızı ve ritmi ve nefesini tutma konusundaki uyumu sayılabilir. Ayrıca kullanılan cihaz, tarama alanı, kesit kalınlığı, kesit sayısı, pitch değeri, tüp voltaj ve akım değeri, ile iteratife rekonstrüksiyon gibi gürültü azaltıcı algoritmalarının kullanılıp kullanılmaması radyasyon miktarını belirlemede önemlidir (8, 26). Bütün bu faktörleri gözetim önlemler alınarak, çift-X-ışın tüplü BT cihazları gibi yeni teknolojiler ile uygun hasta gruplarında, BT anjiyografide kullanılan radyasyon dozu 1 mSv 'in altına çekilebilmektedir (27). Günlük uygulamaya henüz girmemekle birlikte prospektif gating, düşük tüp voltaj ve akım değeri ile birlikte iteratife rekonstrüksiyon kullanarak, görüntü kalitesinden ödün vermeden, radyasyon dozunun 0.1 mSv'in altına çekmenin de mümkün olabileceği sınırlı hasta sayısına sahip çalışmalarda gösterilmiştir (28).

Radyasyon açısından önemli olan çekim parametrelerinin çoğu tetkik sırasında değiştirilebilir. İdeal olanı her birey ve inceleme için uygun ayrı bir çekim protokolünün planlanmasıdır. Ancak yoğun iş akışı içinde bu uygulama çoğu kez mümkün

olamamaktadır. Yeni cihazlar ile radyasyon dozunu azaltma konusunda elde edilen ilerlemelere rağmen; BT anjiyografiye karar verirken, ülkemizde BT anjiyografi uygulamalarının büyük çoğunlukla 64-kesitli BT cihazları ile yapıldığı ve radyasyon dozunun daha düşük olduğu yeni teknolojilerin çok az sayıda merkezde bulunduğu göz önüne alınmalıdır. Ayrıca merkezlerin büyük çoğunluğunda, kardiyak BT uygulamalarının yapıldığı ayrı bir cihaz yoktur ve radyasyon dozunu azaltmaya yönelik yöntemler rutin kullanımda değildir. Aslında radyasyon azaltıcı yöntemlerin kullanımı konusundaki standardizasyon eksikliği sadece ülkemiz için değil, tüm dünya için geçerlidir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki dört büyük merkezi içeren bir çalışmada BT incelemelerinde kullanılan radyasyon dozları ve buna bağlı kanser riski araştırılmıştır. Bu çalışmada BT anjiyografide kullanılan radyasyon dozunun, diğer anatomik bölgeler için yapılan BT uygulamaların birçoğunda kullanılan radyasyon dozundan daha fazla olduğu görülmüştür (5). Ayrıca standart protokoller henüz tam olarak belirlenmediği ve belirlenen protokollerin de tüm merkezlerde uygulanmaması nedeni ile dağılım aralığının oldukça geniş olduğu saptanmıştır. Bu dozlarla 40 yaşındaki hastalardan 1 hastada koroner anjiyografiye bağlı kanser gelişme riskinin ortaya çıkması için kadınlarda 270, erkeklerde 595 hastaya BT anjiyografi yapılmasının yeterli olduğu görülmektedir (5). Tek bir hasta açısından bakıldığında risk düşük gibi görülsede; artan sayıdaki kardiyak BT anjiyografi uygulamaları ile birlikte bu durum gelecekte toplumsal bir sağlık problemi oluşturabilecek boyuttadır. Merkezler arasında BT anjiyografi için radyasyon dozunu azaltmaya yönelik uygulamaların standart olmadığı, farklı ülkelerden 50 merkezde yapılan kardiyak BT incelemelerindeki doz uygulamalarını ve sonuçlarını araştıran PROTECTION çalışmasında da net olarak gösterilmiştir. Bu çalışmaya sadece kardiyak BT uygulamaları konusunda belirli bir düzeyin üzerinde deneyime sahip merkezlerin dahil edilmesine rağmen, merkezler arasında ortalama radyasyon dozunda 6 kata varan farklılık saptanmıştır (29).

Radyasyon dozunu azaltmaya yönelik uygulamalar

Kardiyak BT'de kullanılan radyasyona bağlı riski azaltmak için endikasyonu doğru koymak en önemli adımlardan biridir. Bu konuda uygunluk kılavuzlarına bağlı kalmak, gereksiz BT incelemelerini belirgin ölçüde azaltabilir (30). Bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme kararı verirken bunun radyasyon ve kontrast madde kullanılan bir test olduğu akılda tutularak, elde edilecek bilginin daha güvenli yollarla elde edilip edilemeyeceği, göze alınan riskin elde edilen bilgiye değer olup olmadığı iyi düşünülmelidir. Test öncesi tanı olasılığı (pretest probability) göz önüne alınarak ve pozitif/negatif test sonucunun klinik yaklaşımı nasıl etkileyeceği düşünülerek karar verilmelidir. Bu yöntemin tarama testi olarak kullanılmayacağı ve subklinik aterosklerozu takip etmek için tekrarlayıcı çekimler yapmaya uygun bir yöntem olmadığı da unutmamalıdır (31). Bununla birlikte gerçekten yarar elde edilebilecek hastada sadece radyasyon riski yüzünden BT'den vazgeçmek de doğru değildir. Üstelik radyasyon dozunu azaltmaya yönelik stratejiler ve hastaya özgül protokoller ile BT anjiyografi-

deki radyasyon dozu makul sınırlara çekilebilir (8, 25). Bu önlemlerin rutin kullanımı konusunda daha fazla özen gösterilmelidir.

Kardiyak BT anjiyografiye karar verildikten sonraki aşamada iyi bir hasta hazırlığı ön plana çıkmaktadır. Daha düşük radyasyon dozu kullanarak yeterli görüntü kalitesi elde edebilmek için mümkün olduğunca yavaş ve sabit bir kalp hızı sağlanması çok önemlidir (8). İşlem sırasında da yeterli görüntü kalitesinin elde edilebileceği en düşük radyasyon dozunu kullanma prensibine de bağlı kalınmalıdır (32). Kardiyak BT anjiyografi için kullanılan asgari teknoloji 64-kesitli BT cihazı olmalıdır (30). Çekim sırasındaki tarama uzunluğu hastaya göre belirlenmelidir. Mümkün olduğunca radyasyonun sadece R-R aralığının belirli fazında verildiği prospektif aksiyal gating yöntemi kullanılmalıdır. Prospektif gating yöntemi kullanıldığında ortalama efektif dozun 64 kesitli BT için 4.1 ± 1.7 mSv, 125 kesitli BT için 3.6 ± 0.4 mSv, 256 kesitli BT için 3.0 ± 1.9 mSv ve 320 kesitli BT sistemleri için 7.6 ± 1.6 mSv olduğu saptanmıştır (33). Retrospektif gating kullanılacaksa R-R aralığında farklı fazlarda farklı akım değerlerinin kullanılmasını sağlayan tüp akım modülasyonu mutlaka kullanılmalıdır. Kesit kalınlığı ve tüp akım değerlerinin klinik endikasyona göre belirlenmesi gerekir. Koroner görüntüleme için daha yüksek tüp akımı ve daha ince kesit kalınlığı gerekebilir. Ancak pulmoner ven anatomisi veya kardiyak yapının değerlendirilmesi gibi endikasyonlar için yapılan incelemelerde daha düşük tüp akımı ve daha yüksek kesit kalınlığı kullanılarak da yeterli görüntü kalitesi elde edilebilir ve radyasyon dozu %50'ye varan oranda azaltılabilir (25). Tüp voltajı vücut kütle indeksine göre değiştirilmeli ve mümkünse sinyal/gürültü oranını iyileştirerek daha düşük radyasyon dozunda daha iyi görüntü kalitesi sağlayan iterativ rekonstrüksiyon yöntemi kullanılmalıdır.

Sonuç

Kardiyak BT anjiyografi son dönemde gelişen teknolojiler sayesinde pratik hayatımızda her geçen gün daha fazla yer bulmaktadır. Henüz BT'de kullanılan radyasyon dozu ve potansiyel etkileri arasında net bir ilişki ortaya konulmasa da; özellikle kanser konusundaki endişeler nedeniyle radyasyon dozunu olabildiğince azaltmak [ALARA (As Low As Reasonably Achievable) prensibi] konusunda dikkatli olunması gerekmektedir. Bu konuda kardiyologlara düşen önemli görev, uygun hastayı doğru endikasyon ile kardiyak BT anjiyografiye yönlendirmektir. Ayrıca kardiyologların kardiyak BT uygulamalarında kullanılması gereken minimum teknik donanım konusunda bilgi sahibi olmaları ve çalıştıkları merkezde bu teknolojinin ve radyasyon dozunu azaltmaya yönelik uygulamaların mümkün olup olmadığının farkında olmaları, hastalarının güvenliği ve test sonucu elde edilen bilgilerin değeri açısından da önem taşımaktadır.

Çıkar çatışması: Bildirilmemiştir.

"Peer-review" değerlendirmesi: İç değerlendirme.

Yazarlık katkıları: Fikir - A.Ş., B.S.; Tasarım - A.Ş., B.S.; Denetleme - A.Ş., B.S.; Kaynaklar - A.Ş., B.S.; Malzemeler - A.Ş.,

B.S.; Veri toplanması ve/veya işleme - A.Ş., B.S.; Analiz ve/veya yorum - A.Ş., B.S.; Literatür taraması - A.Ş., B.S.; Yazı yazarı - A.Ş., B.S.; Eleştirel İnceleme - A.Ş., B.S.; Diğer - A.Ş., B.S.

Kaynaklar

1. Budoff MJ, Dowe D, Jollis JG, Gitter M, Sutherland J, Halamert E, et al. Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis in individuals without known coronary artery disease: results from the prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial. *J Am Coll Cardiol* 2008; 52: 1724-32. [CrossRef]
2. Meijboom WB, Meijjs MF, Schuijff JD, Cramer MJ, Mollet NR, van Mieghem CA, et al. Diagnostic accuracy of 64-slice computed tomography coronary angiography: a prospective, multicenter, multivendor study. *J Am Coll Cardiol* 2008; 52: 2135-44. [CrossRef]
3. Miller JM, Rochitte CE, Dewey M, Arbab-Zadeh A, Niinuma H, Gottlieb I, et al. Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT. *N Engl J Med* 2008; 359: 2324-36. [CrossRef]
4. Desai MY. Cardiac CT beyond coronary angiography: current and emerging non-coronary cardiac applications. *Heart* 2011;97:417-24. [CrossRef]
5. Smith-Bindman R, Lipson J, Marcus R, Kim KP, Mahesh M, Gould R, et al. Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer. *Arch Intern Med* 2009; 169: 2078-86. [CrossRef]
6. Einstein AJ, Henzlova MJ, Rajagopalan S. Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA* 2007; 298: 317-23. [CrossRef]
7. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography--an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007; 357: 2277-84. [CrossRef]
8. Roobottom CA, Mitchell G, Morgan-Hughes G. Radiation reduction strategies in cardiac computed tomographic angiography. *Clin Radiol* 2010; 65: 859-67. [CrossRef]
9. Suzuki K, Yamashita S. Low-dose radiation exposure and carcinogenesis. *Jpn J Clin Oncol* 2012; 42: 563-8. [CrossRef]
10. Hallbutton SS, Schoenhagen P. Cardiovascular imaging with computed tomography: responsible steps to balancing diagnostic yield and radiation. *JACC Cardiovasc Imaging* 2010; 3: 536-40. [CrossRef]
11. Shapiro BP, Young PM, Kantor B, Choe YH, McCollough CH, Gerber TC. Radiation dose reduction in CT coronary angiography. *Curr Cardiol Rep* 2010; 12: 59-67. [CrossRef]
12. Coles DR, Smail MA, Negus IS, Wilde P, Oberhoff M, Karsch KR, et al. Comparison of radiation doses from multislice computed tomography coronary angiography and conventional diagnostic angiography. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1840-5. [CrossRef]
13. Rixe J, Conradi G, Rolf A, Schmermund A, Magedanz A, Erkapic D, et al. Radiation dose exposure of computed tomography coronary angiography: comparison of dual-source, 16-slice and 64-slice CT. *Heart* 2009; 95: 1337-42. [CrossRef]
14. Pierce DA, Preston DL. Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. *Radiat Res* 2000; 154: 178-86. [CrossRef]
15. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat Res* 2003; 160: 381-407. [CrossRef]
16. Board of Radiation Effects Research Division on Earth and Life Sciences National Research Council of the National Academies,

- Health Risks From Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC National Academies Press; 2006.
17. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res* 2007; 168: 1-64. [\[CrossRef\]](#)
 18. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report: Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1993 Report to the General Assembly. New York, NY: UNSCEAR; 1993.
 19. International Commission on Radiological Protection. ICRP-60. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, UK: Pergamon Press, 1991.
 20. Tubiana M, Aurengo A, Averbeck D, et al. Dose effect relationships and estimation of the carcinogenic effect of low doses of ionizing radiation. Paris, France: Academie des Sciences and Academie Nationale de Medicine, 2005.
 21. Feinendegen LE, Pollycove M, Sondhaus CA. Responses to low doses of ionizing radiation in biological systems. *Nonlinearity Biol Toxicol Med* 2004; 2: 143-71. [\[CrossRef\]](#)
 22. Berrington A, Darby SC, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897-1997. *Br J Radiol* 2001; 74: 507-19.
 23. Vrijheid M, Cardis E, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill C, et al. The 15-Country Collaborative Study of Cancer Risk Among Radiation Workers in the Nuclear Industry: design, epidemiological methods and descriptive results. *Radiat Res* 2007; 167: 361-79. [\[CrossRef\]](#)
 24. Şahinarslan A, Erbaş G, Kocaman SA, Baser D, Akyel A, Karaer D, et al. Comparison of radiation induced damage between computed tomography angiography and conventional coronary angiography *Eur Heart J* 2011; 32 (Suppl): 1119-94.
 25. Schoenhagen P, Thompson CM, Halliburton SS. Low-dose cardiovascular computed tomography: where are the limits? *Curr Cardiol Rep* 2012; 14: 17-23. [\[CrossRef\]](#)
 26. Moscariello A, Takx RA, Schoepf UJ, Renker M, Zwerner PL, O'Brien TX, et al. Coronary CT angiography : image quality, diagnostic accuracy, and potential for radiation dose reduction using a novel iterative image reconstruction technique-comparison with traditional filtered back projection. *Eur Radiol* 2011; 21: 210-8. [\[CrossRef\]](#)
 27. Achenbach S, Marwan M, Ropers D, Schepis T, Pflederer T, Anders K, et al. Coronary computed tomography angiography with a consistent dose below 1 mSv using prospectively electrocardiogram-triggered high-pitch spiral acquisition. *Eur Heart J* 2010; 31: 340-6. [\[CrossRef\]](#)
 28. Tornizawa N, Nojo T, Akahane M, Toriqoe R, Kiryu S, Ohtomo K. Adaptive iterative dose reduction in coronary CT angiography using 320-row CT: Assessment of radiation dose reduction and image quality. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2012; 5: 318-24.
 29. Hausleiter J, Meyer T, Hermann F, Hadamitzky M, Krebs M, Gerber TC, et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography. *JAMA* 2009; 301: 500-7. [\[CrossRef\]](#)
 30. Taylor AJ, Cerqueira M, Hodgson JM, Mark D, Min J, O'Gara P, et al. ACCF/SCCT/ACR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 appropriate use criteria for cardiac computed tomography. A report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the American Society of Nuclear Cardiology, the North American Society for Cardiovascular Imaging, the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J Am Coll Cardiol* 2010; 56: 1864-94. [\[CrossRef\]](#)
 31. Gerber TC, Gibbons RJ. Weighing the risks and benefits of cardiac imaging with ionizing radiation. *JACC Cardiovasc Imaging* 2010; 3: 528-35. [\[CrossRef\]](#)
 32. Limacher MC, Douglas PS, Germano G, Laskey WK, Lindsay BD, McKetty MH, et al. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology. American College of Cardiology. *J Am Coll Cardiol* 1998; 31: 892-913.
 33. Sabarudin A, Sun Z, Nq KH. A systematic review of radiation dose associated with different generations of multidetector CT coronary angiography. *J Med Imaging Radiat Oncol* 2012; 56: 5-17. [\[CrossRef\]](#)