KÜÇÜK ÖLÇEKLİ GÜÇ ÜRETİMİ İÇİN BİR BOYUTLU RADYAL GİRİŞ TÜRBİN ÖNTASARIM ARACININ GELİŞTİRİLMESİ

Mustafa Bilgiç ¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara M. Halûk Aksel² Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu bildiride küçük ölçekli güç üretiminde kullanılan radyal giriş türbinleri için geliştirilmiş bir ön tasarım kodu sunulmuştur. Çalışma kapsamında geliştirilen yazılım radyal türbinler için bir boyutlu hesapları yaparak akış yolunu belirlenmekte ve kanatçıkların ilk boyutlandırmasını yapmaktadır. Kanatçık dizilerinin giriş ve çıkış istasyonlarında termodinamik ve kinematik değerleri temel termodinamik ve akışkanlar mekaniği kanunları kullanılarak hesaplanmaktadır. Kanatçıklar boyunca kayıplar literatürde yaygın kullanılan kayıp eş-ilişkileri kullanılarak modellenmiştir. Pasaj kayıpları için NASA [Glassman, 1976] ve CETI [Baines, 2003] modelleri kullanılmaktadır. Uç açıklığı kayıplarının etkisi için Dambach [Dambach, 1998]tarafından geliştirilen uç açıklığı kayıp modeli kullanılmakladır. Radyal makinelerde ön tasarım aşamasında sıklıkla kullanılan kayma çarpanı modeli [Aungier, 1995] yazılıma eklenmiş, kanatçık giriş açısı bu yöntemle hesaplanmaktadır. Bütün bu hesaplar sonucunda tasarlanan türbinin ürettiği güç, genleşme oranı ve verimi çıktı olarak bastırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar çeşitli test durumları ile kıyaslanmış ve geliştirilen program doğrulanmıştır.

Giriş

Bir radyal türbin kademesi 4 ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla giriş bölümü, duran kanatçık dizgisi, döner kanatçık dizgisi ve yayıcı bölümleridir. Giriş bölümü gelen akışkanı toparlayıp duran kanatçığa ileten bölümüdür. Bu bölüm yönlendirme dışında ikinci bir görev olarak kanatçığa teğet yönde bir hız da sağlamaktadır. Duran kanatçık dönen kanatçığa girmeden hem akışı yönlendirir hem de dönen kanatçığa gelen havanın açısını ayarlamış olur. Dönen kanatçık tork ürettiğinden dolayı türbinde güç üretilmesinden sorumlu parçadır. Yüksek basınç ve sıcaklıkta türbine gelen akışkanın enerjisi soğrulup son parça olan yayıcıya aktarılır. Yayıcı, türbin döner kanadının çıkışındaki akışkanın hızını düşürerek durağan verimin artırılmasını sağlar. Platformda yerleşim sıkıntısı yoksa yayıcı mutlaka bir türbin kademesinde bulunması gereken bir parçadır. Geliştirilen yazılımda bu kısımların giriş ve çıkış istasyonlarının numaraları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'de görünmeyen 2 ve 5 istasyonları sırasıyla duran kanat ve dönen kanat boğazlarının istasyon numaralarıdır.

Giriş bölümü kullanılacak platforma göre değişiklik göstermektedir. Literatürde bazı uygulamalarda salyangozun olmadığı, duran kanatçık dizgisinden önce sadece bir kanal koyulduğu görülmüştür. Ancak yeni uygulamalarda salyangoz genellikle kullanılmıştır [Baines, 2003]. Giriş kısmı ve duran kanatçık tasarımı birbiri ile bağlantılıdır çünkü duran kanatçığın geometrisinin kamburlu ya da kambursuz olması salyangozun sistemde olup olmamasıyla ilgilidir. Eğer sadece kanal kullanılacaksa bir sonraki kanatçık dizgisi olan duran kanatçık üzerinde, akışı yüksek mertebelerde çevirmek gerekmektedir. Eğer platformda yerleşim açısından bir sıkıntı yoksa girişte salyangoz

¹ Mustafa Bilgiç, Makine Müh. Böl., E-posta: e167640@metu.edu.tr

² Prof. Dr. M. Haluk Aksel, Makine Müh. Böl., aksel@metu.edu.tr

kullanılması tasarım açısından daha iyi bir seçenektir. Salyangoz yapı kullanılırsa, zaten salyangoz yapı içerisinde istenilen dönme miktarının bir kısmı sağlandığından, duran kanatçıklar sadece akışkanı döner kanada yönlendirme amacıyla kullanılmaktadır. Bu da tasarımcıyı kambursuz duran kanatçık tasarımına doğru yöneltmektedir. Tam tersi durum düşünüldüğünde ise döner kanada gerekli dönüş açısı verilmesi için duran kanadın kamburlu olması zorunlu hale gelmektedir. Kamburlu duran kanatçık yüksek akış dönüşünden dolayı türbin verimine olumsuz etki etmektedir. Bu iki durumdaki duran kanatçık geometrileri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de gösterilen "r" istasyonlara ait yarıçap uzunluklarını belirtmektedir.



Şekil 1 Türbin Hesaplama Istasyonları



Şekil 2 Kamburlu ve Kambursuz Sabit Kanat Kanatçık Geometrisi

Döner kanat (çark) kısmı türbinde en önemli parçadır. Hem şaft gücünün döner kanatta üretildiği hem de kayıpların çok büyük bir bölümünün döner kanat üzerinde gerçekleştiği düşünülürse, döner kanatın önemi açıkça ortaya çıkmaktadır. Diğer tüm turbomakina sınıfları için de önemli olan boyutsuz parametreler (iş sabiti, akış sabiti, reaksiyon...), radyal giriş türbin içinde tasarımı şekillendirme açısından çok önemlidir. Döner kanat için kayıp mekanizmaları çok çeşitli olup anlaşılması zor akış yapılarını içerisinde barındırmaktadır. Eksenel turbomakinalarda olduğu gibi profil ve ikincil akış kayıplarını birbirinden ayırt etmek çok zordur. O yüzden radyal giriş türbinlerinde ikisi beraber düşünülüp pasaj kayıpları olarak adlandırılmıştır. Kayıpların büyük bölümünü pasaj kayıpları oluşturmaktadır. Onu uç açıklığı kayıpları ve disk açıklığı kayıpları izlemektedir. Pasaj kayıplarının da önemli bir bölümü gelme açısı kaynaklıdır. Radyal giriş türbinlerinde gelme açısı çarkın giriş bölümünde akış yapısını önemli ölçüde etkilemektedir.

Eksenel turbomakinalarda etkisi çok görülmeyen çevresel ve Koriyolis kuvveti radyal giriş türbininde çok etkilidir. Özellikle giriş kısmında bu etkiyi azaltmak amacıyla alışılmışın çok dışında (-40[°] civarı) gelme açısı değerleri verilebilmektedir. Bu açının fazla ya da az verilmesi pasaj kayıplarını önemli derecede artıracağından, giriş açısı çark tasarımı için çok önemli bir parametredir.

Yayıcı bölümü en son parça olup çıkıştaki akışkanın hızından dolayı kaynaklanan kinetik enerji kaybını engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Endüstri uygulamalarında bazen %30'a kadar kinetik enerji kaybının yeniden kazanıldığı durumlar görülmüştür [Baines, 2003]. Yayıcı için kritik tasarım parametreleri basınç artış sabiti, yayıcı eksenel uzunluğunun genişliğine oranı ve açılma açısı olarak belirlenebilir. Literatürde birçok deneysel sonuç bu üç parametreye bağlı olup, ön tasarım aşamasında tasarımı oldukça iyi noktalara taşımaktadır.

YÖNTEM

Tasarıma başlamak için gerekli sınır koşulları çevrim analizinden gelmektedir. Çevrim analizi sonucu giriş ve çıkış toplam basınç, toplam sıcaklık, debi ve hedef verim değerleri belirlenir. Bu isterler belirlendikten sonra geriye kalan tüm girdiler tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Geliştirilen yazılımda tasarım yarıçapı olarak duran kanatçığın giriş yarıçapı belirlenmiştir. Bununla beraber tasarımcı girdisi olarak yarıçap oranları da girilmektedir ve böylece Şekil 1'deki tüm istasyonlarda yarıçaplar belirlenmektedir. Şaft hızı da tasarımcı tarafından girildiğinde çevresel hız bileşenleri olan U₄ ve U₆ belirlenmiş olmaktadır. Daha sonra 1. ve 2. eşitlikte tanımlanan akış sabiti ve meridyonel hızlanma oranı tasarımcı tarafından girdi olarak verilir.



Şekil 3 Dönen Kanat Giriş ve Çıkış Hız Üçgenleri

$$\Phi = \frac{V_{m_6}}{U_4} \tag{1}$$

$$MVR_{46} = \frac{V_{m_6}}{V_{m_4}}$$
(2)

Radyal giriş türbinlerde çıkış kayıplarını azaltmak amacıyla genelde çıkış mutlak akış açısı (α_6) sıfıra eşitlemeye çalışılır. Bu nedenle, bir diğer girdi de döner kanat çıkış mutlak akış açısıdır. Bu değer girildikten sonra hız üçgenlerinden çıkıştaki teğetsel hız bileşeni hesaplanabilmektedir.

$$V_{t_6} = V_{m_6} \tan(\alpha_6) \tag{3}$$

Turbomakina tasarımlarında sıkça kullanılan iş sabiti ise 4. eşitlikte tanımlanmıştır. İş sabiti kademe boyunca toplam entalpi düşüşünün döner kanat giriş çevresel hızının karesine oranıdır. Toplam entalpi düşüşü Euler türbin denkleminden 5. eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$\psi = \frac{\Delta H}{U_4^2} \tag{4}$$

$$\Delta H = U_4 V_{t_4} - U_6 V_{t_6}$$
 (5)

Genleşme oranı ve debi çevrim analizi sonucu belirlendiğinden toplam entalpi düşüşü girdi olarak tasarıma gelmektedir. Eğer tasarımcı iş sabitini de girdi olarak programa girerse döner kanat girişindeki teğetsel hız 4 ve 5. eşitlikler kullanılarak 6. eşitlikte gösterildiği gibi bulunabilir.

$$V_{t_4} = \frac{\Psi U_4^2 + U_6 V_{t_6}}{U_4}$$
(6)

Yukarıdaki eşitlikler ve belirtilen girdiler verildiğinde hız üçgenleri oluşturulmuş olmaktadır. Diğer hız bileşenler üçgen eşitliklerinden Şekil 3'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Buraya kadar döner kanat parametreleri hesaplanmıştır. Duran kanat bölümü daha önce de belirtildiği gibi tasarımda bir salyangoz olup olmamasına çok bağlıdır. Eğer salyangoz var ise kambursuz kanatçık profili seçilecektir. Yarıçap değerleri tasarımcı tarafından girdi olarak verildiği için Şekil 2'de gösterilen her şey tanımlanmış olup duran kanat giriş açısı 7. eşitlikte gösterildiği gibi kolayca hesaplanabilmektedir. Eğer salyangoz yoksa giriş açısı tasarımcı tarafından belirlenmelidir

$$\alpha_1 = \operatorname{asin}\left(\frac{r_3}{r_1}\operatorname{sin}(\alpha_3)\right) \tag{7}$$

Duran kanatçığın girişini çözmek için geriye sadece merdiyonel hız kalmaktadır. Bu hız da duran kanat geometrisinden hesaplanmaktadır. Genelde duran kanat kanatçık boyu sabit seçildiğinden meridyonel hız yinelemeli olarak hesaplanmaktadır. Alternatif olarak tasarımcı tarafından tıpkı çark tasarımında olduğu gibi (Eşitlik 2), meridyonel hız oranı girdi olarak verilebilir. Böylece duran kanat hız bileşenleri de tanımlanarak tüm kinematik değerler hesaplanmış olur. Termodinamik değerlerin hesaplanabilmesi için istasyonlarda iki termodinamik değerin sabitlenmiş olması gerekmektedir. Bu iki değer istasyonlardaki entalpi ve entropi değerleri olarak seçilebilir. Giriş toplam sıcaklığı çevrim analizinden geldiği için istasyon 0, 1 ve 2'de toplam entalpi bilinmektedir. Döner kanat boyunca toplam entalpi değişimi de çevrim analizinden belli olduğu için aslında tüm istasyonlarda belirlenmiş olmaktadır. Kinematik değerler ve toplam entalpi değerlerinden statik entalpiye 8. eşitlikte gösterildiği gibi geçilebilmektedir.

$$H_{duragan} = H_{toplam} - \frac{V^2}{2}$$
(8)

Geriye entropi değerleri kalmaktadır. Bir boyutlu hesaplamalarda tasarımın geometrisi hakkında çok kısıtlı bilgiler belirlenebilmektedir. Bu sebepten dolayı kayıpların numerik hesaplama yöntemleri ile belirlenmesi mümkün değildir. Entropi daha önce de belirtildiği üzere literatürde bulunan kayıp katsayıları kullanılarak belirlenmektedir. Kayıp katsayısının ifade olarak farklı görünse de mantık olarak neredeyse aynıdır. Entalpi tabanlı kayıp katsayısı tanımı 9. Eşitlikte [Baines, 2003] verilmiştir.

$$\zeta_{\rm duran\,kanat} = \frac{h_3 - h_{3_{\rm S}}}{\frac{1}{2}V_3^2}, \zeta_{\rm döner\,kanat} = \frac{h_6 - h_{6_{\rm S}}}{\frac{1}{2}W_6^2}$$
(9)

9. Eşitlikte gösterilen tüm terimler entalpi-entropi grafiğinde Şekil 4'de gösterilmektedir. Paydada görünen terimler duran ve dönen kanatçıkların çıkış istasyonlarındaki kinetik enerji terimlerini göstermektedir. 9. Eşitliğe çok benzer şekilde NASA [Wasserbauer,1975] kayıp katsayısını 10. Eşitlikteki gibi tanımlamıştır.

$$e_{duran \, kanat} = \frac{V_{3s}^2 - V_3^2}{2}, e_{d\ddot{o}nen \, kanat} = \frac{W_{6s}^2 - W_6^2}{2}$$
 (10)



Şekil 4 Duran ve Döner Kanat Üzerinde Genleşme Süresince Entalpi-Entropi Grafiği

Kayıp mekanizmaları modellenirken üç ana kısımda modellenmektedir: Pasaj kayıpları, uç açıklığı kayıpları ve disk açıklığı kayıpları. Pasaj kayıpları için NASA [Glassman, 1976] 11. Eşitlikteki eşilişkiyi sunmuştur.

$$e_{2BOYUT} = \frac{\delta_{e}}{s\cos(\alpha_{c1k1s}) - \delta_{d} - t}, e_{3BOYUT} = e_{2BOYUT} \frac{A_{3BOYUT}}{A_{2BOYUT}}$$
(11)

11. Eşitlikte kayıp katsayısı içerisindeki δ_e , δ_d sırrasyıla enerji ve yer değiştirme kalınlığını göstermektedir. *s* iki kanatçık arası mesafeyi gösterirken, *t* firar kenarı kalınlığını göstermektedir. $\alpha_{c_{lkls}}$ ise duran kanat için mutlak çıkış akış açısı, dönen kanat için ise izafi çıkış akış açısını göstermektedir. Kayıp katsayısının altındaki "2D" iki boyuttaki kayıp manasına gelmekte olup, üç boyuttaki kayıp katsayısı hesabı ise alanlar oranından gelmektedir. 11. Eşitlikte gösterilen ifade geliştirilmiş ve daha detaylı bir şekle sokulmuştur. Geliştirilmiş model CETI [Baines, 2003] model olarak bilinmekte ve kayıp katsayısını veren ifade 12. Eşitlikte gösterilmektedir. 12. Eşitlik boğaz istasyonunun bilgilerini detaylı bir şekilde istemektedir. Birçok çalışmada kolaylık olması açısından boğaz istasyonu çıkış ile aynı kabul edilmektedir. 12. Eşitlikte yer alan m_f ikincil akışları ayarlamak için bir sabit olup L_h ve D_h hidrolik uzunluğu ve çapı belirtmektedir. Bu eşitlikte b_5 boğaz

istasyonunda kanatçık boyunun değerini gösterirken *c* kanatçığa ait kiriş uzunluğunu göstermektedir.

$$\zeta_{\rm p} = m_{\rm f} \, 0.11 \left[\left(\frac{L_{\rm h}}{D_{\rm h}} \right) + 0.68 \left(1 - \left(\frac{r_{\rm 5}}{r_{\rm 4}} \right)^2 \right) \frac{\cos(\beta_{\rm 5})}{\frac{b_{\rm 5}}{c}} \right] \frac{W_4^2 + W_5^2}{2} \tag{12}$$

Kanatçık giriş açısı belirlenirken kayma modeli olarak 13. eşitlikte gösterilen [Aungier, 1995] model kullanılmıştır. 13. eşitlikte σ kayma çarpanını simgelerken N_R dönen kanat kanatçık sayısını göstermektedir. Yazılım bir tasarım programı olduğu için V_{t4} 6. eşitlikte belirlenmektedir. Metal açısını ve dolayısı ile gelme açısını hesaplamak için 13 ve 14. eşitlik yinelemeli olarak çözülmelidir. 14. eşitlikte gösterilen " K_{B4} " dönen kanat ucundaki tıkanıklığı (blokaj) göstermektedir.

$$\sigma = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_{4metal}}}{N_R^{0.7}}$$
(13)

$$V_{t4} = \sigma \left(U_4 - \frac{V_{m4} \cot \beta_{4metal}}{K_{B4}} \right)$$
(14)

Metal açısı belirlendikten sonra gelme açısı kaynaklı kayıp da 15. eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır.

$$\zeta_{i} = \frac{1}{2} W_{4}^{2} \sin^{2} (\beta_{4} - \beta_{4_{metal}})$$
⁽¹⁵⁾

Uç açıklığı kayıp katsayısı için 16. Eşitlikte gösterilen model [Dambach, 1998] kullanılmıştır.

$$\zeta_{\rm C} = \frac{U_4^3 N_{\rm R}}{8\pi} \left(K_a \epsilon_{\rm x} C_a + K_{\rm r} \epsilon_{\rm r} C_{\rm r} + K_{\rm ar} \sqrt{\epsilon_a \epsilon_{\rm r} C_a C_{\rm r}} \right)$$
(16)

Bu modelde uç açıklığı Şekil 5'de gösterildiği biçimde eksenel ve radyal olarak ikiye bölünmüş şekilde sadeleştirilerek ele alınmıştır. 16. Eşitlikte bulunan terimlerin detayları için Referans [Baines, 2003] ya da [Dambach, 1998] incelenebilir.



Şekil 5 Sadeleştirilmiş Uç Açıklığı Modeli [Baines, 2003]

UYGULAMALAR

Geliştirilen programın çıktıları Glassman [Glassman, 1976] tarafından geliştirilen programın çıktıları ile kıyaslanmıştır. Test durumu: en yüksek yarıçapı 9.78 cm olan, akışkan olarak yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta argon gazı kullanılan, 1.55 genleşme oranına sahip olan bir radyal giriş türbinidir. 22.65 kW güç üretilmiş %89.2 toplam verimi olan türbinin debisi 0.2771 kg/s'dir. Giriş kısmında salyangoz kullanılmamış ve bu yüzden kamburlu duran kanatçık geometrisi tercih edilmiştir. Duran kanatçık boyu girişten çıkışa değişmemiştir. Genel performans değerlerinin kıyaslanması Tablo 1'de gösterilmiştir. Genel performans parametrelerinin karşılaştırmasına göre geliştirilen programın çıktıları referans sonuçlar ile çok iyi uyum göstermektedir. İş sabiti ve akış sabiti referans kodun çıktısı olup geliştirilen programa direk girdi olarak verilmiştir.

	Referans [Glassman, 1976]	Geliştirilen Program
Genleşme oranı	1.555	1.552
Güç [kW]	22.657	22.651
Özgül İş [kJ/kg]	81.77	81.74
Toplam verim [%]	89.6	89.4
Durağan verim [%]	83.4	83.3

Tablo 1 Birinci Durum İçin Genel Performans Parametrelerinin Karşılaştırılması

Daha detaylı doğrulama için Şekil 6'da akış yolunun koordinatları ve istasyonlardaki basınç değerleri gösterilmiştir. Genel performans parametrelerindeki güzel uyum kademelerin giriş ve çıkışlarında da görünebilmektedir. Ayrıca akış yolu koordinatları referans değerler ile uyumlu görünmektedir.



Şekil 6 Birinci Durum İçin Geliştirilen ve Referans Kodun Solda Akış Yolu Koordinatlarının, Sağda İse İstasyonlardaki Basınç Değerlerinin Karşılaştırılması

İkinci uygulama durumu olarak 84 kW güç üreten ve akışkan olarak CO₂ kullanılan bir test durumu seçilmiştir [Wei, 2014]. Çalışmada ideal gaz yaklaşımı kullanılmasa da akış sıcaklığı ve basıncı sıkıştırma oranı bire çok yakın olacak şekilde seçilmiştir. Dolayısı ile ideal gaz yaklaşımı da kullanılabilmektedir. Gerekli girdiler yapıldıktan sonra programdan basılan genel performans sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında geliştirilen programın çıktıları ile referans değeler arasında çok iyi bir uyum görünmektedir.

	Referans [Wei, 2014]	Geliştirilen Program
Genleşme oranı	1.364	1.37
Güç [kW]	84.0	84.0
Özgül İş [kJ/kg]	46.708	46.709
Toplam verim [%]	85.0	84.97
Durağan verim [%]	82.7	82.58

Tablo 2 İkinci Durum İçin Genel Performans Parametrelerinin Karşılaştırılması

Detaylı bir kıyaslama yapmak için Şekil 7'de akış yolu koordinatlarının ve istasyonlardaki meridyonel hızların kıyaslanması gösterilmiştir. Hem duran kanat hem de dönen kanat giriş ve çıkış koordinatları referans [Wei, 2014] değerler ile çok iyi uyum içerisindedir. Meridyonel hızların istasyonlardaki değerlerine bakıldığında yine çok iyi bir uyum görünmektedir.



Şekil 7 İkinci Durum İçin Geliştirilen ve Referans Kodun Solda Akış Yolu Koordinatlarının, Sağda İse İstasyonlardaki Meridyonel Hız Değerlerinin Karşılaştırılması

SONUÇ

Bildiride tanımlanan yazılım radyal giriş türbin ön tasarım aracı olarak akış yolunu, kanatçık dizgilerinin giriş ve çıkış kısmında termodinamik ve kinematik değerleri belirlemektedir. Ayrıca kanatçık geometrisinin oluşturulması için gerekli ön bilgileri de çıktı olarak vermektedir. Geliştirilen yazılımın sonuçları, Glassman [Glassman, 1976] ve Wei [Wei, 2014] tarafından geliştirilen kodların sonuçları ile kıyaslanmış, referans sonuçlar ile oldukça iyi bir uyum göstermiştir. Bir sonraki basamakta kod organik gazlar için çalışır duruma getirilecek ve organik Rankine çevrimlerinde kullanılmak üzere bir ön tasarım aracına dönüştürülecektir.

Kaynaklar

- Aungier, R. H. (2006). Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis. NY: American Society of Mechanical Engineers.
- Dambach, R., Hodson, H. P., & Huntsman, I. (1998, January). An experimental study of tip clearance flow in a radial inflow turbine. In ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Glassman, A. J. (1976). Computer program for design analysis of radial-inflow turbines. NASA Technical Report TN D- 8164.
- Moustapha, H., Zelesky, M.F., Baines, N.C., Japikse, D., 2003. Axial and Radial Turbines. Concepts NREC, White River Junction, VT: Concepts NREC.
- Wasserbauer, C. A., & Glassman, A. J. (1975). FORTRAN program for predicting off-design performance of radial-inflow turbines. NASA Technical Paper, (TN D-8063), 55. https://doi.org/NASA TN D-7487
- Z. Wei, "Meanline Analysis of Radial Inflow Turbines at Design and Off-Design Conditions," p. 157, 2014.