



پیش بینی نیروی چرخشی ناپایا از فشار آکوستیکی میدان دور از پروانه دریایی توسط روش معکوس

محمد رضا باقری¹، محمد سعید سیف²، حمید مهدیقلی^{3*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک دریا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

*تهران، صندوق پستی 9567-11155. mehdi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 دی 1393

پذیرش: 11 اردیبهشت 1394

ارائه در سایت: 30 خرداد 1394

کلید واژگان:

نیروی چرخشی ناپایا

فشار آکوستیکی میدان دور

معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز

تابع انتقال

دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده

نیروی چرخشی ناپایا یا توزیع قدرت دو قطبی‌ها که توسط چرخش فن یا پروانه در سیال به وجود می‌آید، توسط روش معکوس قابل پیش‌بینی است. به منظور استفاده از این روش از اندازه‌گیری‌های فشار آکوستیکی میدان دور در فرکانس‌های عبوری پره پروانه در حالت غیر کاویتاسیونی استفاده شده است. در این مقاله فشار آکوستیکی میدان دور از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در آرایه هیدروفونی مشخص استخراج و سپس نیرو چرخشی ناپایای اعمالی از پره به سیال که مهمترین منبع تولید صوت در حالت غیر کاویتاسیونی است به دست آمده است. نیروهای چرخشی ناپایای با استفاده از روش معکوس توسط کدی تحلیلی در متلب استخراج شده است. حل درست به انتخاب صحیح پارامتر مرتب‌سازی تابع انتقال (تابع انتقال ارتباط میان فشار آکوستیکی و نیروها در روش معکوس است) وابسته است. بنابراین باید محدوده مناسب پایداری انتخاب تا مشکل ناپایداری تابع انتقال حل شود. کد تحلیلی برای پارامتر پایداری در حالات مختلف حل و مناسبترین مقادیر نیروی ناپایای اعمالی در سه مقطع پروانه به دست آمده است. از روش معکوس به منظور محاسبه منبع تولید صوت در مقاطع مختلف پروانه در حالت غیر کاویتاسیونی جهت طراحی پروانه با کمترین مقدار صوت می‌توان استفاده کرد. این روش برای اولین بار در این مقاله برای یک مدل پروانه دریایی مورد استفاده قرار گرفته است.

The unsteady rotating force prediction of far-field acoustic pressure for marine propeller by inverse method

Mohammad Reza Bagheri, Mohammad Saeed Seif, Hamid Mehdigholi*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. Tehran, Iran 11155-9567, mehdi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 January 2015
Accepted 01 May 2015
Available Online 20 June 2015

Keywords:

Unsteady Rotating Force
Far-field Acoustic Pressure
Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H)
Equations
Transfer Function
Computational Fluid Dynamic (CFD)

ABSTRACT

The unsteady rotating force or dipole strength distribution, acting by the fan or propeller on the fluid, is predicted by inverse method. In this method, the far-field acoustic pressures are used in non-cavitating condition. In this paper, the far-field acoustic pressures are obtained from Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H) equations using computational fluid dynamic (CFD) in specific hydrophone array and then the unsteady rotating force, acting by the propeller on the fluid, is obtained as the most important sound source in non-cavitating condition. The unsteady rotating forces are extracted using inverse method by analytical code in Matlab. The correct solution is independence to the optimum choice of regularization parameter from transfer function; the transfer function represents the relationship between the force coefficients and the far-field acoustic pressure. Therefore, the appropriate range of regularization parameter should be chosen in order for an ill-conditioned problem from transfer function to be solved. The analytical code is solved for different regularization parameters and then the unsteady rotating forces are obtained for three sections on the blade surface. The inverse method could be used for dipole strength distribution calculation as the most important sound source in non-cavitating condition in order to design the noiseless marine propeller.

1- مقدمه

پروانه در سیال است. معادلات کلی آیروآکوستیک¹ توسط فاکس ویلیامز و هاوکینگز² [1] که شکل توسعه یافته معادله لایت هیل است، استخراج شده

در حالت کلی نوپز پروانه شامل دو حالت کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی می‌باشد. در حالت غیر کاویتاسیونی منبع صوت دو قطبی مهمترین عامل تولید صوت در سیال می‌باشد. دو قطبی‌ها ناشی از نیروی ناپایای حاصل از چرخش

1- Aeroacoustics

2- Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. R. Bagheri, M. S. Seif, H. Mehdigholi, The unsteady rotating force prediction of far-field acoustic pressure for marine propeller by inverse method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 353-362, 2015 (In Persian)

آکوستیکی⁴ میدان دور یا به عبارتی نویز آهنگین⁵ تولید شده توسط یک پروانه، استفاده می‌شود. برای فن‌ها و پروانه‌ها با زاویه گام یکسان، صداهای حاکم در فرکانس عبوری پره و ضرابی از آن در محیط منتشر می‌شود. بنابراین نیاز است تا مقادیر این نویزها و بالعکس نیروهای ناپایای ناشی از آن به منظور طراحی فن‌ها و پروانه‌هایی با نویز پایین استخراج شود. نویز فن و پروانه بعنوان یک موضوع تحقیقاتی مهم، از زمانیکه حل‌های تحلیل آن‌ها با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز انجام شد مورد توجه قرار گرفته است. اثبات شده است که در عدد ماخ کمتر از 0/8 منابع دو قطبی که ناشی از اعمال نیروهای ناپایا در سیال در فرکانس‌های عبوری پره است بیشترین تأثیر را دارد. بنابراین در اعداد ماخ پایین و در حالت غیر کاویتاسیونی فشار ناپایا در طول پره معادل با توزیع دو قطبی‌ها می‌باشد [10-12].

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی⁶ با حل معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز سطوح فشار صوت را ارائه می‌نماید. بنابراین با پیشگویی فشار صوت در آرایه هیدروفونی و استفاده از تکنیک معکوس می‌توان مقادیر نیروی ناپایای اعمالی ناشی از نویز در فرکانس‌های پره را استخراج کرد. از طرفی اندازه گیری نوسانات فشار روی پره‌ها نیاز به روشهای تجربی گسترده‌ای مانند استفاد از سنسورهای پیزو پلاستیک یا دیگر ترنسدیوسرهای فشار دقیق دارد. روش‌های آکوستیک معکوس اخیراً به منظور غلبه بر پیچیدگی‌های تکنیک‌های اندازه‌گیری، توسعه و پیشنهاد می‌شود. لی و همکارانش یک روش معکوس به منظور بازسازی توزیع فشار روی سطح پره فن از میدان صوت منتشر شده ارائه داده‌اند [14]. تحقیق آن‌ها بر اساس معکوس حل معادله انتگرالی فاراست از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز می‌باشد. لو و همکارانش یک مدل آبرو آکوستیک از اندرکنش ویک روتور و استاتور بر اساس معادله انتگرالی صوت پیشنهاد کردند [15]. همچنین مطالعات دیگری روی مدل آبرو آکوستیکی از اندرکنش یک صفحه تخت در برابر یک تند باد انجام شده است [16-18]. از کارهای اخیر تحقیق طرابلسی و همکارانش در 2014 می‌باشد [19]. آن‌ها در تحقیق خود نیروهای ناپایای چرخشی یک فن را به شیوه معکوس استخراج نموده‌اند.

هیچگونه نتیجه تجربی هنوز برای ویژگی‌های منبع و یا نیروی ناپایای اعمالی ناشی از چرخش پره پروانه دریایی در سیال گزارش نشده است. بنابراین در این مقاله با استفاده از روش معکوس نیروی ناپایای ناشی از چرخش پره در سیال که منجر به نویز در فرکانس‌های عبوری پره می‌شود استخراج می‌شود. بدین منظور در ابتدا فشار آکوستیکی میدان دور در آرایه هیدروفونی مناسب با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز توسط دینامیک سیالات محاسباتی استخراج و سپس با نوشتن کدی در متلب و با به کارگیری روش معکوس غیرمستقیم نیروهای ناشی از چرخش پره در سیال به عنوان مهمترین منبع تولید صوت در حالت غیر کاویتاسیونی برای سه مقطع استخراج و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. این تحقیق برای اولین بار برای یک مدل پروانه دریایی صورت می‌گیرد و با به کارگیری آن بر روی مقاطع زیادی از سطح پره می‌توان پروانه‌ای با کمترین مقدار نویز طراحی کرد.

2- پیش‌بینی نیروی چرخشی ناپایا به شیوه معکوس

2-1- تشریح معادلات معکوس غیر مستقیم

بررسی‌های تئوری زیادی در زمینه استخراج فشار آکوستیکی بعنوان تابعی از

است. این معادلات شامل حرکت جسم در محیط نامحدود سیال بوده و می‌تواند به منظور استخراج نویز در فن‌ها و پروانه‌ها به کار گرفته شود. تحقیقات زیادی به منظور استخراج سطح فشار صوت در میدان دور و با استفاده از این معادلات صورت گرفته است. پان و ژانگ در 2013 [2]، جین مینگ و همکارانش در 2012 [3]، سول و همکارانش در 2002 و 2005 [4-5]، کارو و همکارانش در 2007 [6] و باقری و همکارانش در 2012، 2013 و 2014 [7-9] سطوح فشار صوت را در حالات مختلف با استفاده از این معادلات استخراج کردند. در حالت کلی فشار آکوستیکی در سیال ناشی از سه منبع تولید صوت می‌باشد. منبع اول که مرتبط با توربولانس در سیال است تحت عنوان منبع چهار قطبی شناخته و متناظر با حل معادله لایت هیل است. منابع چهار قطبی تنها زمانی مهم می‌باشد که عدد ماخ در نوک پره بیشتر از 0/8 شود [10-12]. منبع دوم در معادله فاکس ویلیامز و هاوکینگز مرتبط با حرکت منبع دو قطبی و متناسب با نیروهای ناپایای اعمال شده توسط سطوح صلب (در این مطالعه همان پروانه است) در سیال می‌باشد. این منبع تحت عنوان نویز بارگذاری یا نویز دو قطبی شناخته می‌شود. منابع دو قطبی بصورت حرکت انتقالی ساده در سیال تغییر مکان می‌دهند و مهمترین منبع تولید صوت در حالت غیر کاویتاسیونی است. بنابراین پیش‌بینی آن بر روی سطوح مختلف پروانه هدف اصلی موجود در این مقاله است. منبع سوم معادل با یک انتشار تک قطبی که ناشی از اثرات جابجایی حجمی سطوح بوده و نویز ضخامتی نامیده می‌شود. میزان بازدهی نویز ضخامتی در ماخهای پایین بسیار کم و قابل چشم پوشی است تا زمانی که سرعت سیال در نوک پره کمتر از سرعت صوت باشد. بنابراین در سرعت‌های پایین که زیر سرعت صوت در آب است، این منبع نیز در شرایط غیر کاویتاسیونی به علت ماخ پایین قابل صرف نظر است [13]. اما در حالت کاویتاسیونی منبع تک قطبی بسیار مهم می‌باشد زیرا کاویتاسیون به شکل کره‌ای نوسانی عمل می‌کند که در حال انبساط و انقباض است و به نحوی با رفتار خود منجر به تزریق حجم در سیال می‌شود. کاویتاسیون از نوع منبع تک قطبی است که با نوسان در سیال تولید صوت می‌نماید. بنابراین در حالت غیر کاویتاسیونی منبع اصلی تولید صوت در سیال توزیع نیروهای اعمال شده توسط پره‌ها در سیال است.

نیروهای پریودیک (نیروهای چرخشی پایا یا ناپایا) منجر به تولید صوت می‌شود. این نیروها در فرکانس‌های عبوری پره¹ و مضاربی از این فرکانس‌ها که هارمونی‌های پره می‌باشند به وجود می‌آیند. در تحقیقات [2-9] با حل جریان در حالت کلی میدان فشار آکوستیکی در میدان دور استخراج می‌شود اما منبع صوت دو قطبی که مهمترین منبع تولید صوت در حالت غیر کاویتاسیونی است مورد بحث و بررسی واقع نشده است. در مطالعه حاضر پیش‌بینی نیروهای چرخشی ناپایای پروانه 5 پره از فشار آکوستیکی میدان دور هدف مطالعه می‌باشد. نویز این مدل پروانه در مطالعه اخیر باقری و همکارانش [9] به شیوه عددی و تجربی بررسی شد، اما در این مقاله استخراج نیروی ناپایای چرخشی با ماهیت منبع دو قطبی به شیوه روش معکوس² هدف اصلی مطالعه می‌باشد.

روش معکوس به منظور ارزیابی نیروهای چرخشی ناپایا³ (ناشی از توزیع قدرت دو قطبی‌ها) که توسط چرخش فن یا پروانه در سیال اعمال می‌شود استفاده می‌شود. جهت استفاده از این روش از اندازه‌گیری‌های فشار

4- Acoustic pressure

5- Tonal noise

6- Computational Fluid Dynamic (CFD)

1- Blade passing frequency (BPF)

2- Inverse method

3- Unsteady rotating forces

استفاده از روش معکوس نیاز به معرفی سیستم مختصات میدان فشار آکوستیکی است. سیستم مختصات کروی (r, φ, θ) نیز به عنوان خصوصیات هندسی یک نقطه در میدان آکوستیکی تعریف می‌شود. هدف از مدل معکوس استخراج نیروهای ناپایای اعمالی بر واحد سطح در مقطع (r_1, φ_1) در فرکانس‌های عبوری پره است.

نیروی محوری بر واحد سطح که در جهت محور Z است با f_z نشان داده می‌شود. این نیرو را می‌توان به شکل یک سری فوریه در هارمونی‌های زمانی و محیطی به شکل رابطه (2) نوشت [21]:

$$f_z(r_1, \varphi_1) = \sum_{s=-\infty}^{s=+\infty} \sum_{q=-\infty}^{q=+\infty} \overline{f_z^0} \alpha_s(r_1) \beta_q(r_1) e^{i(sB+q)\varphi_1} e^{-isw_1 t} \quad (2)$$

به طوریکه β_q ضریب فوریه هارمونی‌های محیطی که در بردارنده نیروهای ناپایای ناشی از چرخش پروانه در مقطع (r_1, φ_1) می‌باشد. مقادیر کوچکی از این نیرو تولید صوت بزرگی در اعداد ماخ پایین می‌نمایند بنابراین پیش‌بینی آن حائز اهمیت است. این نیرو وابسته به هارمونی‌های چرخشی پروانه می‌باشد. α_s ضریب فوریه هارمونی‌های زمانی می‌باشد. w_1 سرعت زاویه‌ای، B تعداد پره، s شماره پره هارمونی‌های پره و q تعداد هارمونی‌ها و یا به عبارتی تعداد نقاطی است که روی یک مقطع به عنوان باندهای انتگرال گیری در نظر گرفته می‌شود.

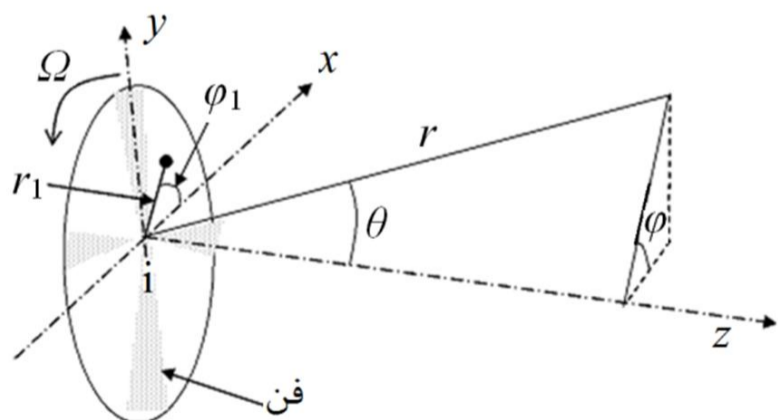
فشار آکوستیکی را می‌توان با انتگرال گیری از نیروهای ناپایای چرخشی در طول سطح مقطع A ، پروانه به شکل رابطه (3) به دست آورد [21].

$$p(t; r, \varphi, \theta) = \iint_A f_z(t; r_1, \varphi_1) g_{1z}(t; r_1, \varphi_1; r, \varphi, \theta) r_1 dr_1 d\varphi_1 \quad (3)$$

که g_{1z} میدان صوت حاصل از یک نیروی نقطه‌ای در جهت Z و در موقعیت (r_1, φ_1) می‌باشد. با یک تقریب میدان دور $r \gg r_1$ ، g_{1z} را می‌توان به فرم (4) نوشت [21]:

$$g_{1z} = -ik \cos \theta \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} i^m J_m(kr_1 \sin \theta) e^{im(\varphi - \varphi_1)} e^{-iwt} \quad (4)$$

که $k = \frac{w}{c}$ عدد موج آکوستیکی، c سرعت صوت، w فرکانس زاویه‌ای صوت منتشر شده و J_m تابع بسل استوانه‌ای از مرتبه m می‌باشد. با جایگزینی رابطه (2) و (4) در رابطه (3) و استفاده از روابط تعامد و همچنین با گسسته‌سازی انتگرال نسبت به r_1 و کوچک نمودن سری نسبت به هارمونیک‌های محیطی q در معادله (2) می‌توان رابطه (5) را برای ارتباط میان فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در میدان دور و نیروی ناپایای چرخشی اعمالی از پره در سیال به دست آورد.



شکل 1 موقعیت قرار گیری هیدروفون‌ها به عنوان گیرنده و مقطع نیروی اعمالی به عنوان منبع صوت

نیروهای نوسانی اعمال ناشی از چرخش پره در سیال در مراجع [2، 10، 18، 20] صورت گرفته است. فرض بر این است که این نیروها به عنوان مهمترین منابع تولید نویز به خصوص در سرعت‌های پایین با روش‌های ریاضیاتی و یا با اندازه‌گیری قابل استخراج باشند. به منظور استخراج این نیروها از معادلات انتشار صوت مورس یا فاکس ویلیامز و هاوکینگز در میدان دور استفاده می‌شود [21]. این نیروها به عنوان ترم منبع دو قطبی در معادلات هلمهولتز و لایت هیل که معادله اصلی برای میدان فشار آکوستیکی است معرفی می‌شود. معادله اساسی جهت بررسی انتشار صوت معادله لایت هیل می‌باشد که از تلفیق معادلات پیوستگی و مومنوم حاصل می‌شود. معادله لایت هیل طبق رابطه (1) معرفی می‌شود. جملات سمت چپ در معادله لایت هیل مربوط به انتشار صوت و جملات سمت راست منابع تولید صوت بوده، اولین جمله سمت راست مربوط به تزریق جرم یا حجم به داخل سیال است و تحت عنوان منبع تک قطبی نام برده می‌شود که بیشترین تأثیر آن مربوط به حالت کاویتاسیونی است، جمله دوم اعمال نیرو به داخل سیال است و بیشتر مرتبط با اختلاف فشار به وجود آمده در جلو و عقب پروانه است و جمله سوم تنسور تنش لایت هیل بوده که در سرعت‌های پایین پروانه قابل چشم پوشی است. چند قطبی‌ها در بخش مقدمه توضیح داده شده- اند [22].

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \dot{q} + \nabla \cdot f + \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

یکی از حل‌های توسعه داده شده تحلیلی برای رابطه لایت هیل رابطه انتگرالی برای حل آن می‌باشد. حالت کلی این روابط برای اولین بار توسط فاکس ویلیامز و هاوکینگز ارائه شد. کاربرد این روابط برای پیش‌بینی میدان آکوستیکی، برای مناطق دور از جسم می‌باشد که در روش دینامیک سیالات محاسباتی موجود در این مقاله از معادلات فوق جهت استخراج میدان فشار صوت پروانه در میدان دور استفاده می‌شود [23]. همانطور که گفته شد کاربرد این روابط برای پیش‌بینی میدان آکوستیکی، برای مناطق دور از جسم می‌باشد. بطوریکه ابتدا با حل جریان در اطراف جسم، منابع تولید نویز مشخص می‌گردد. سپس با تعریف سطح مرجعی در اطراف جسم داده‌های مربوط به جریان به عنوان منبع تولید صوت در رابطه لایت هیل جمع‌آوری و با استفاده از حل انتگرالی موجود توزیع فشار آکوستیکی در مناطق دور از جسم تعیین می‌شود. با توجه به آنچه توضیح داده شد در حالت غیر کاویتاسیونی منبع حاکم، منبع دو قطبی می‌باشد، بنابراین میدان فشار آکوستیکی به دست آمده از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز در حالت غیر کاویتاسیونی مرتبط با منبع دو قطبی یا همان نیروهای چرخشی ناپایای در فرکانس عبوری پره است که منجر به تولید صوت می‌شود. بنابراین با استخراج میدان فشار آکوستیکی توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی و به کارگیری آن در فرمولاسیون روش معکوس می‌توان نیروهای تولید کننده صوت در سیال به عنوان منبع دو قطبی و در هر مقطع را استخراج کرد.

به منظور مطالعه روش معکوس که در واقع هدف استخراج نیروهای ناپایای اعمالی در سیال است از میدان فشار آکوستیکی موجود در سیال استفاده می‌شود. بنابراین نیاز به تعریف سیستم مختصات مرجع جهت معرفی آرایه هیدروفونی و محل اعمال این نیروها است. سیستم مختصات در این مطالعه در شکل 1 مشاهده می‌شود. مختصات قطبی (r_1, φ_1) بعنوان مختصه یک نقطه روی سطح پره در نظر گرفته می‌شود. در واقع این نقطه معرف یک مقطع بر روی سطح پره است که هدف استخراج نیروی ناپایای اعمالی عمود بر سطح پره در این نقطه بعنوان منبع تولید صوت می‌باشد. همچنین برای

صوت باشد جواب وجود ندارد. هر چه تعداد سطرها در ماتریس انتقال بیشتر باشد به لحاظ ریاضیاتی ماتریس خوش رفتار می‌شود، بنابراین به منظور افزایش تعداد سطرها در ماتریس انتقال که معرف تعداد هیدروفون‌ها و یا گیرنده‌های صوتی است تعداد بیشتری هیدروفون در آرایه صوتی مشخص و میدان فشار آکوستیکی در آنها با حل معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز توسط دینامیک سیالات محاسباتی بدست می‌آید و سپس در رابطه (10) استفاده می‌شود.

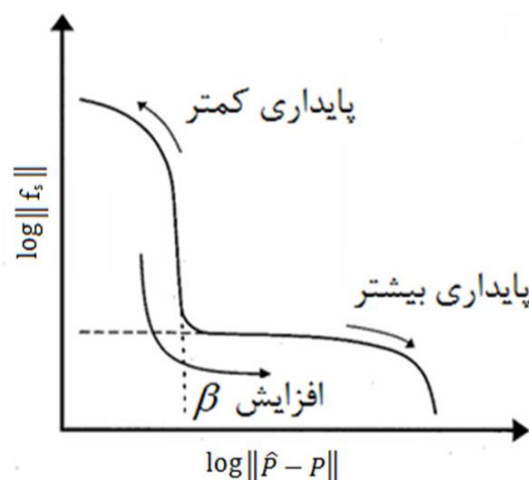
زیرا تغییرات کوچک در \hat{P}_s باعث ایجاد خطاهای نسبتاً بزرگ در جواب می‌شود. به منظور جلوگیری از ایجاد اختلاف‌های بزرگ در مقادیر تکین H_s و در نتیجه ایجاد یک مسئله بدرفتار (بدحالت)، یک روش پایدارسازی در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن، عبارت نیرو در یک ضریب β ضرب می‌شود. β یک ضریب تنظیم کننده می‌باشد. در نهایت، جواب مسئله معکوس به صورت زیر ارائه می‌شود. در این مقاله از رابطه (11) به منظور به دست آوردن نیرو در هر مقطع استفاده می‌شود.

$$f_{s0} = [H_s^H H_s + \beta I]^{-1} H_s^H \hat{P}_s \quad (11)$$

2-2- انتخاب ضریب تنظیم کننده مناسب در خوش‌رفتار کردن صحیح ماتریس انتقال

نکته اساسی در یک روش منظم‌سازی خوب انتخاب مناسب پارامتر منظم‌سازی β می‌باشد. یکی از روش‌های مورد استفاده روش معیار منحنی L می‌باشد. منحنی L شامل رسم نورم 2 (نورم 2 مجذور مجموع مربعات تمام درایه‌های ماتریس می‌باشد) بردار f_s جواب خوش رفتار (رابطه 11) نسبت به نرم 2 بردار باقیمانده $\|\hat{P} - P\|$ در مقیاس لگاریتمی برای مقادیر مختلف β می‌باشد. مقدار فشار آکوستیکی بدست آمده توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی است و P فشار بدست آمده به شکل مستقیم از رابطه (8) است. منحنی عمومی L در شکل 2 نشان داده شده است [21].

این نمودار از دو ناحیه اساسی تشکیل می‌شود. بین این دو ناحیه می‌توان یک پارامتر منظم‌سازی بهینه پیدا کرد که باقیمانده $\|\hat{P} - P\|$ کوچک بوده و جواب منظم‌شده دارای نرم $\|f_s\|$ کوچک می‌باشد. به منظور اینکه پارامتر $\|\hat{P} - P\|$ که میزان خطا را نشان می‌دهد به سمت صفر میل نماید انتخاب مناسب پارامتر β بسیار مهم می‌باشد. پارامتر مناسب β تأثیر مهم در کاهش عدد حالت و به دنبال آن صحت جواب‌ها دارد. بدین منظور باید ماتریس انتقال به‌طور مناسب استخراج شود. بنابراین باید برخی پارامترها



شکل 2 شکل کلی منحنی L [21]

$$P_{sj} = -\frac{ik_1 \cos \theta_j}{4\pi r} \sum_{q=q_{\min}}^{q=q_{\max}} i^{sB+q} e^{isk_1 r_j} e^{i(sB+q)\varphi_j} \times \sum_{i=1}^L s \overline{f_z^0}(r_{1i}) \alpha_s(r_{1i}) \beta_q(r_{1i}) J_{sB+q}(s k_1 r_{1i} \sin \theta) 2\pi r_{1i} \Delta r_1 \quad (5)$$

رابطه (5) را می‌توان به فرم فشرده (6) نوشت.

$$P_{sj} = \sum_L H_{sjL} f_{sL} \quad (6)$$

اندیس‌های i و q به ترتیب مرتبط با تعداد مقاطع و هارمونی‌های محیطی در هر مقطع می‌باشند، و با اندیس کلی $L=(i,q)$ نشان داده می‌شود. $f_{sL} = \overline{f_z^0}(r_{1i}) \alpha_s(r_{1i}) \beta_q(r_{1i})$ بردار منبع صوت می‌باشد که نشان‌دهنده خصوصیات قدرت منبع صوتی دوقطبی پخش شده در موقعیت شعاعی i برای هارمونیک زمانی s و هارمونیک محیطی q می‌باشد. علاوه بر این:

$$H_{sjL} = -\frac{isk_1 \cos \theta_j}{2r_j} i^{sB+q} e^{isk_1 r_j} e^{i(sB+q)\varphi_j} J_{sB+q}(s k_1 r_{1i} \sin \theta) \cdot r_{1i} \Delta r_1 \quad (7)$$

یک تابع انتقال است که قدرت منبع صوت f_{sL} را به میدان صوت انتشاریافته P_{sj} مرتبط می‌سازد.

رابطه (6) یک سیستم خطی می‌باشد که می‌توان آن را به فرم ماتریسی (8) نوشت:

$$\{P\} = [H]\{f\} \quad (8)$$

P_s یک بردار از فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در میدان دور و در J موقعیت بوده (یک ماتریس $1 \times j$ می‌باشد) و f_s یک بردار از ضرایب نیروهای محوری چرخشی ناپایا بر واحد سطح و اعمالی از طریق پره بر روی سیال می‌باشد (ماتریس $1 \times q$) است. H_s تابع انتقال بین ضرایب نیرو و فشار آکوستیکی میدان دور است که از رابطه (7) بدست می‌آید (ماتریس $j \times q$). تمام این مقادیر برای ضرایب s از فرکانس عبوری پره تعریف می‌شوند. بنابراین رابطه (8) را می‌توان به شکل ماتریسی مطابق (9) بازنویسی کرد:

$$\begin{pmatrix} P_s^1 \\ \vdots \\ P_s^j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1q_{\min}} & \cdots & H_{1q_{\max}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{jq_{\min}} & \cdots & H_{jq_{\max}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_{s-q_{\min}} \\ \vdots \\ f_{s-q_{\max}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

به‌طوریکه P_s^j ضریب فوریه فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در J هیدروفون، $f_{s-q_{\max}}$ ضریب فوریه نیروی ناپایای چرخشی اعمالی از پره در سیال و H_{jq} ضرایب ماتریس انتقال می‌باشند. هدف مدل معکوس محاسبه بردار منبع صوت f_s از داده‌های فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در دور دست، P_s است. فشار آکوستیکی اندازه‌گیری شده در دور دست که توسط دینامیک سیالات محاسباتی در این مقاله بدست آمده است را با \hat{P}_s نشان داده می‌شود. بردار f_s را می‌توان با روش نیلسون و یون¹ برای تخمین قدرت منبع صوت آکوستیکی توسط روش معکوس به دست آورد [21]. این نیرو توسط روش ارائه شده توسط نیلسون و یون با رابطه (10) قابل استخراج است.

$$f_{s0} = H_s^+ \hat{P}_s \quad (10)$$

که $H_s^+ = [H_s^H H_s]^{-1} H_s^H$ معکوس جدید از ماتریس H_s می‌باشد. هنگامی که $[H_s^H H_s]$ ماتریس مثبت معین باشد مسئله یک جواب یکتا دارد. اگر تعداد هیدروفونها (J) برابر با تعداد آرایه‌های منبع صوت روی مقطع مورد نظر یعنی (I) باشد، جواب را می‌توان به سادگی توسط معکوس مستقیم به فرم $f_{s0} = H_s^{-1} \hat{P}_s$ نوشت. اگر تعداد هیدروفون‌ها کمتر از آرایه‌های بردار منبع

2- Well posed
3- Ill posed
4- Two norm

1- Nelson & Yoon

مرزی در شکل 3 مشاهده می‌شود. در تحقیقات زیادی از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ استاندارد با توابع دیواره به منظور حل معادلات ناویر استوکس در حل جریان استفاده شده است [25-29]. مدل توربولانسی $k - \epsilon^2$ RNG دارای مزیت‌های زیادی نسبت به مدل $k - \epsilon$ استاندارد می‌باشد [28]. بنابراین در این مطالعه از مدل توربولانسی $k - \epsilon$ RNG با توابع دیواره استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها فاصله اولین گره از سطح در طول لایه مرزی بسیار مهم می‌باشد. این موضوع با پارامتر y^+ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مقدار تعیین کننده کیفیت مش در طول لایه مرزی است. محدوده مناسب y^+ برای مدل توربولانسی $k - \epsilon$ در محدوده $500 < y^+ < 30$ قرار دارد [28, 29]. مقدار y^+ برای این مدل در محدوده 30 تا 110 قرار دارد که محدوده بسیار مناسب در شبیه سازی است و نشان‌دهنده کیفیت شبکه در حل است. محدوده y^+ برای این مدل پروانه در شکل 4 مشاهده می‌شود.

همانطور که اشاره شد میدان فشار آکوستیکی برای این مدل توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز استخراج می‌شود. نتایج میدان فشار آکوستیکی در هارمونی‌های پره به‌عنوان ورودی جهت استخراج نیروها در روش معکوس استفاده می‌شود. بنابراین نیاز است تا صحت جواب‌های فشار آکوستیکی به‌خوبی اعتبار سنجی شود. از آنجا که از نتایج تحلیل جریان بعنوان منابع تولید صوت در حل معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز استفاده می‌شود، بنابراین اعتبارسنجی نتایج هیدرودینامیکی در تحلیل عددی به عنوان منابع تولید صوت مهم می‌باشد. به منظور اعتبار سنجی نتایج حل جریان نمودار ضرایب تراست، گشتاور

جدول 1 مقایسه استقلال از شبکه در تحلیل عددی با نتایج تجربی در $J=0/4$

نتیجه	ضریب تراست	ضریب گشتاور	خطا در ضریب تراست (%)	خطا در ضریب گشتاور (%)
تجربی	0/3454	0/05298	-	-
شبکه 1	0/3101	0/04905	10/22	6/53
شبکه 2	0/3396	0/05174	1/67	2/34
شبکه 3	0/3391	0/05168	1/82	2/45

جدول 2 مقایسه استقلال از شبکه در تحلیل عددی با نتایج تجربی در $J=0/6$

نتیجه	ضریب تراست	ضریب گشتاور	خطا در ضریب تراست (%)	خطا در ضریب گشتاور (%)
تجربی	0/2495	0/04088	-	-
شبکه 1	0/2203	0/03793	11/70	7/21
شبکه 2	0/2359	0/03897	5/45	4/67
شبکه 3	0/2348	0/03834	5/89	6/21

جدول 3 مقایسه استقلال از شبکه در تحلیل عددی با نتایج تجربی در $J=0/8$

نتیجه	ضریب تراست	ضریب گشتاور	خطا در ضریب تراست (%)	خطا در ضریب گشتاور (%)
تجربی	0/1451	0/0270	-	-
شبکه 1	0/1359	0/0238	6/34	11/85
شبکه 2	0/1447	0/0259	1/89	4/07

مانند تعداد هیدروفونها، محل قرارگیری آنها که خود وابسته به زوایای θ و φ می‌باشد، درست انتخاب شود. مقادیر مناسب این پارامترها توسط پرسزنیاک ارائه شده است [24]. در مقاله حاضر به منظور محل صحیح قرارگیری هیدروفون‌ها از شرایط موجود در تحقیق [24] استفاده که در بخش 4 ارائه می‌شود.

3- مدلسازی، تحلیل عددی و ارائه نتایج در CFD

3-1- توسعه شبکه و ارائه نتایج هیدرودینامیکی

در این مقاله از یک مدل پروانه پنج پره با قطر 0/15 متر، نسبت گام 1 که پروانه‌ای با کاربرد زیاد در شناورهای تجاری است استفاده می‌شود. تحلیل هیدرودینامیکی و نویز این مدل توسط باقری و همکارانش به شیوه تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است [9]. مدل این پروانه جهت انجام کارهای تحقیقاتی در آزمایشگاه مهندسی دریا دانشگاه صنعتی شریف موجود و نمونه-ای پر کاربرد است. در تحقیق اخیر باقری و همکارانش، نویز این مدل به شیوه عددی و تجربی استخراج و نتایج عددی به شیوه دینامیک سیالات محاسباتی با نتایج تجربی مقایسه و اعتبار سنجی شده است. از آنجا که این مدل پروانه در شرایط کاری فاقد کاویتاسیون و در دورهای بالا به کاویتاسیون می‌رسد، بنابراین در شرایط کاری مهمترین منبع تولید صوت در آن منبع دو قطبی ناشی از نیروهای ناپایا ناشی از نوسانات فشار و عمود بر مقطع پروانه است. بنابراین به منظور کاهش صوت در این مدل نیاز به استخراج نیروهای فوق در مقاطع مختلف پروانه است. همانطور که گفته شد نویز این مدل پروانه در شرایط کاویتاسیونی و غیر کاویتاسیونی به شیوه عددی و تجربی در مرجع [9] استخراج شده است. همچنین در مرجع اشاره شده به طور مفصل شرایط ایجاد کاویتاسیون در این پروانه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این در حالیست که مسئله در مقاله حاضر با تعریف و نوآوری جدیدی همراه است و آن استخراج منبع صوت از میدان فشار آکوستیکی در حالت غیر کاویتاسیونی است. بنابراین معادلات تعریفی در مقاله حاضر برای شرایط غیر کاویتاسیونی به کار گرفته شده است و کد تحلیلی نیز برای استخراج منبع صوت در حالت غیر کاویتاسیونی نوشته شده است.

در بخش عددی این مقاله شبکه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد شبکه در این مدل پروانه به منظور استقلال جواب‌ها از تعداد شبکه، بررسی می‌شود. بدین منظور نتایج ضریب تراست و گشتاور برای سه شبکه مختلف 1/5، 3/5 و 4 میلیون شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج استقلال شبکه در جداول 1، 2 و 3 به ترتیب برای سه ضریب پیشروی 0/4 و 0/6 و 0/8 قابل مشاهده است. همانطور که از این جداول مشاهده می‌شود مقادیر ضریب تراست و گشتاور با افزایش تعداد شبکه از 1/5 به 3/5 میلیون به نتایج تجربی نزدیک می‌شود، در حالیکه با افزایش شبکه از 3/5 به 4 میلیون این مقادیر تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین تعداد شبکه مناسب 3/5 میلیون انتخاب و نتایج در این تعداد ارائه می‌شود. ناحیه حل جریان اطراف پروانه به دو قسمت دوار و ساکن تقسیم می‌شود. طول و قطر ناحیه دوار متناسب با قطر مدل پروانه و قسمت دوار هاب می‌باشد. هدف از ساخت این ناحیه مدل سازی حرکت دورانی پروانه و هاب و وارد ساختن جمله شتاب کوریولیس در معادلات کلی حاکم بر جریان سیال می‌باشد.

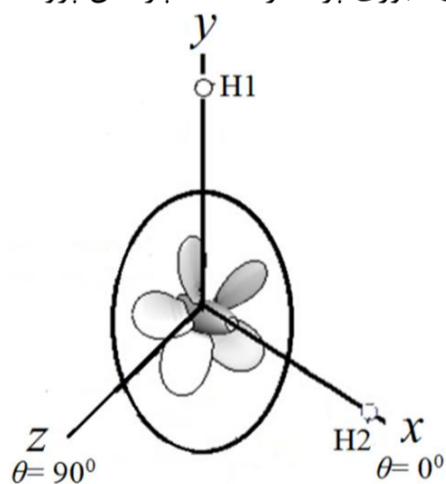
جهت مدل‌سازی حرکت چرخش پروانه، روش محورهای چرخان¹ در نظر گرفته می‌شود. جهت حل جریان از شرط مرزی سرعت ورودی و فشار خروجی استفاده می‌شود. شبکه بندی پروانه، ناحیه محاسباتی و شرایط

2- Reynolds Normalization Group

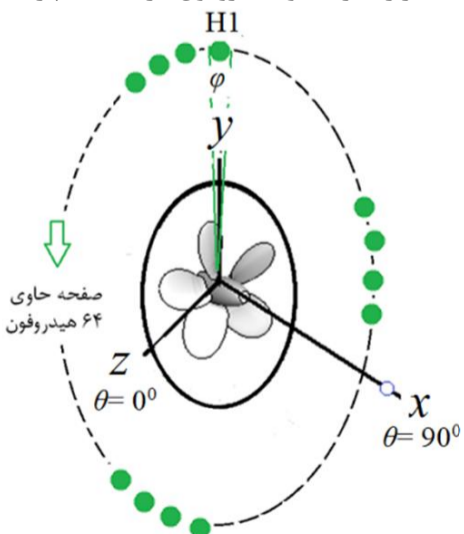
3- Wall plus

1- Moving Reference Frame (MRF)

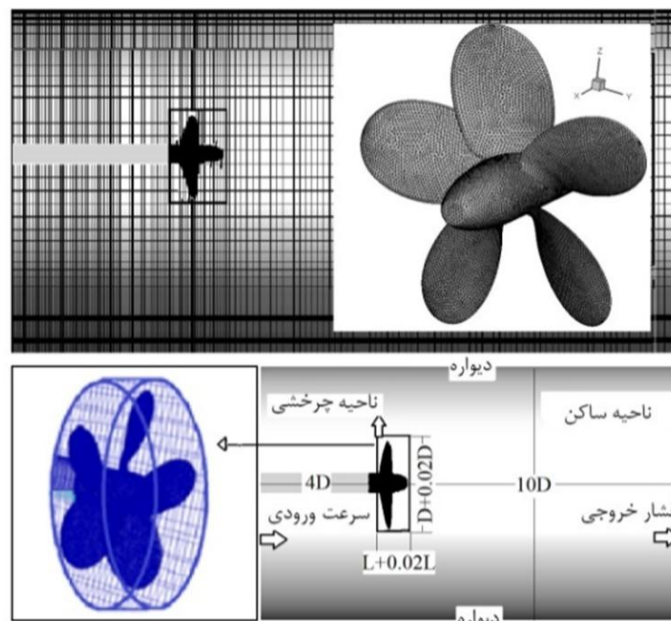
هیدروفون واقع در فاصله $10R$ در صفحه چرخش پروانه و در جلوی هاب استخراج می‌شود. در شکل 6- الف دو هیدروفون بر روی محور هاب و صفحه چرخش پروانه و در فاصله $10R$ از مبدا مختصات قرار گرفته است. مطابق شکل 1 زوایای θ و φ به ترتیب معرف محل قرارگیری هیدروفون‌ها در صفحه $x-y$ و $z-y$ می‌باشند. قرارگیری هیدروفون‌ها تأثیر مهمی در نتایج نهایی استخراج نیرو به شیوه معکوس دارد. بدین منظور برای قرارگیری هیدروفون-ها جهت استخراج نیروهای ناپایای چرخشی از آنچه توسط پرسزنیاک در مرجع [24] ارائه شد استفاده می‌شود. بنابراین آرایش قرارگیری هیدروفون‌ها در صفحه چرخش پروانه و برای 64 هیدروفون در شکل 6-ب مشاهده می‌شود. پروانه مورد نظر در این پژوهش پروانه 5 پره می‌باشد که نوپز آن به شیوه عددی و تجربی استخراج شده است [9]. آنچه خیلی مهم است، هرچه تعداد هیدروفون‌ها را بیشتر انتخاب نماییم نتایج ارائه شده برای نیروی ناشی از نوپز که به روش معکوس بدست می‌آید دقیقتر است. این نیرو میزان نیروی حاصل از اثر چرخش پره در سیال است و تأثیر زیادی در ارتعاش بدنه کشتی دارد. بنابراین نتایج بدست آمده از این مدل‌سازی باید به درستی استخراج شود. همانطور که گفته شد محل قرارگیری بهینه میکروفون‌ها و تعداد آن در پژوهش پرسزنیاک استخراج شده است [24]. بدین منظور در این تحلیل از 64 هیدروفون در صفحه چرخش پروانه استفاده که موقعیت آرایش هیدروفون‌ها و زوایای θ و φ نسبت به پروانه در جدول 4 و شکل 6-ب مشاهده می‌شود. همچنین برای تعداد 16 و 32 هیدروفون نتایج مشابهی با تعداد 64 هیدروفون حاصل می‌شود. τ که معادل فاصله هیدروفون‌ها تا مبدا می‌باشد برای تمامی هیدروفون‌ها $10R$ یعنی معادل $0/75$ متر در نظر گرفته می‌شود. مناسبترین مختصه برای قرارگیری هیدروفون‌ها در صفحه چرخش پروانه می‌باشد زیرا این روش از فشار آکوستیکی میدان دور در فرکانس‌های عبوری پره به منظور تخمین نیرو استفاده می‌کند و بیشترین نوپز تولید شده در فرکانس‌های عبوری پره در صفحه چرخش پروانه می‌باشد [24].



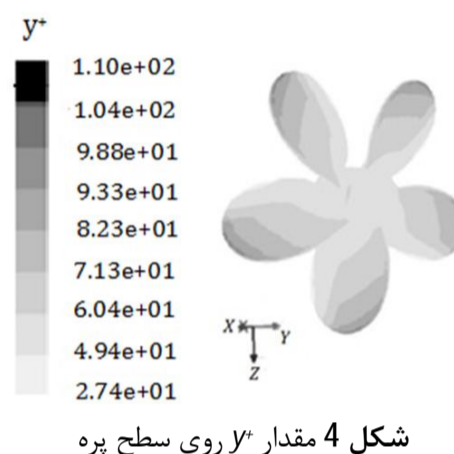
شکل 6- الف موقعیت قرارگیری دو هیدروفون در صفحه چرخش و روی محور هاب



شکل 6- ب موقعیت قرارگیری هیدروفون‌ها در صفحه چرخش پروانه به منظور بازسازی منابع دو قطبی تولید نوپز



شکل 3 شبکه بندی پروانه، ناحیه محاسباتی حل و اعمال شرایط مرزی

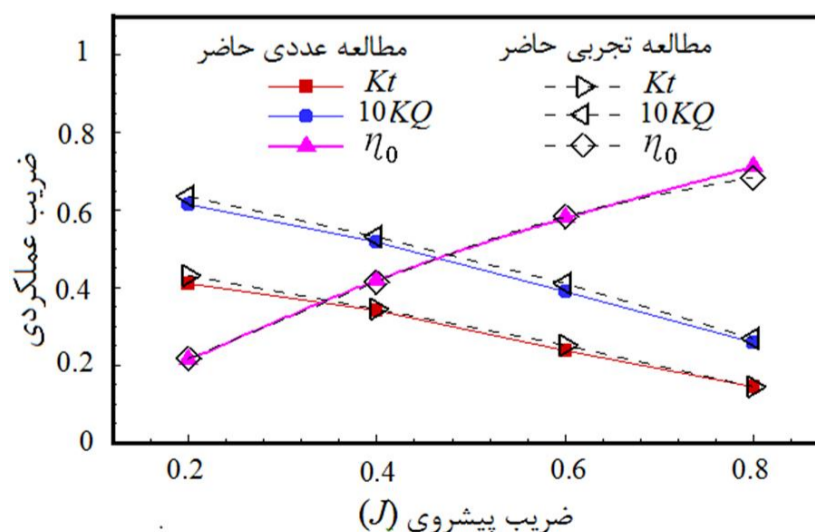


شکل 4 مقدار y^+ روی سطح پره

و بازده برای شبکه $3/5$ میلیون ارائه و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. همانطور که از شکل 5 مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان نتایج عددی و تجربی برای این مدل برقرار است.

3-2- ارائه نتایج میدان فشار آکوستیکی در آرایه هیدروفونی مطلوب

در این پژوهش نیروهای ناپایای چرخشی که منجر به نوپز زیادی در سیال می‌شود برای یک مدل پروانه دریایی بدست می‌آید. بدین منظور باید از تابع انتقال مناسب که ارتباط میان نیرو به‌عنوان منبع صوت و فشار آکوستیکی است استفاده شود. همانطور که پیش از این در بخش 2 این مقاله توضیح داده شد، عدد حالت به منظور انتخاب پارامتر مرتب سازی مناسب در خوش رفتار کردن تابع انتقال نقش مهمی در نتایج نهایی ایفا می‌کند. این پارامتر اثر مستقیمی روی هندسه مدل و بنابراین اثر مهمی در موقعیت‌های اندازه‌گیری دارد. به منظور قرارگیری تعداد هیدروفون‌ها و همچنین موقعیت آن‌ها نسبت به پروانه به شکل 1 توجه کنید. در این مقاله ابتدا نتایج فشار صوت برای

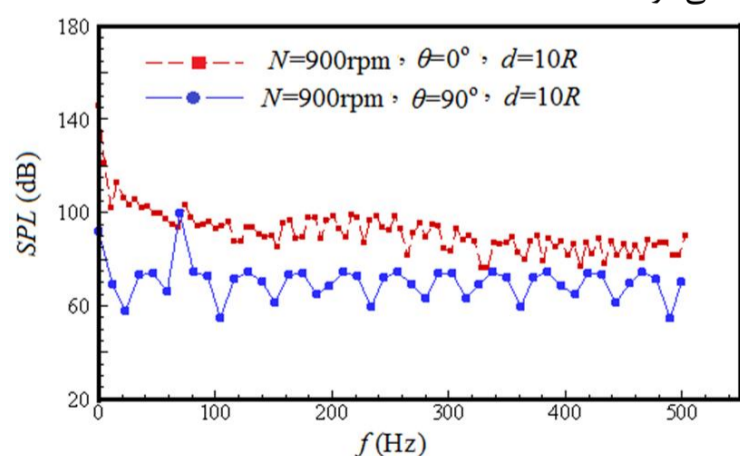


شکل 5 مقایسه ضرایب عملکردی در دو حالت عددی و تجربی

هیدروفون 1 و 2 موجود در شکل 6-الف در شکل 8 بر حسب فرکانس³ مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، سطح فشار صوت برای هیدروفون 2 بیشتر از هیدروفون 1 است. نوسانات فشار در جلوی هاب پروانه بیشتر از تغییر آن در صفحه چرخش می‌باشد، بنابراین در فاصله یکسانی از مبدا سطح فشار صوت در جلوی هاب بیشتر از صفحه چرخش می‌باشد. در شکل 8 یک قله در فرکانس 75 هرتز برای هیدروفون واقع در صفحه چرخش پروانه یعنی در $10R$ و $\theta=0^\circ$ مشاهده می‌شود. این قله مرتبط با اولین فرکانس عبوری پره می‌باشد.

4- ارائه نتایج نیروهای ناپایا در سه مقطع توسط روش معکوس غیر مستقیم

همانطور که بیان شد به منظور خوش رفتار کردن جواب‌ها نیاز به استخراج پارامتر مناسب منظم سازی می‌باشد. پس از حل صوت توسط معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز توسط دینامیک سیالات محاسباتی و استخراج فشار آکوستیکی بدست آمده در 64 هیدروفون موجود در شکل 6-ب هدف استخراج نیرو ناپایای چرخشی اعمالی از پره به سیال که منجر به این نویز شده است می‌باشد. بدین منظور از روابط مدل معکوس غیر مستقیم استفاده و کدی تحلیلی در متلب نوشته می‌شود. با توجه به اینکه جواب‌های درست بستگی زیادی به نحوه صحیح انتخاب پارامتر مرتب سازی دارد، بنابراین نیاز است تا محدوده درست β برای هر هارمونی به خوبی مشخص شود. بدین منظور کد تحلیلی به ازای β های مختلف حل و عدد حالت، k ، مناسب استخراج می‌شود، تا مقادیر درست برای آن انتخاب شود. کد نوشته شده برای مقاطع $0.5R$ ، $0.7R$ و $0.9R$ روی سطح پره یعنی به ازای $r_i=0/0375$ ، $r_i=0/0525$ و $r_i=0/0675$ متر حل می‌شود. همچنین مقادیر q_{min} و q_{max} در رابطه (9) با توجه به تحقیق جرارد و همکارانش انتخاب می‌شود [21]. بنابراین $q_{min}=-SB-2$ و $q_{max}=-SB+3$ می‌شود. در این روابط S شمارنده هارمونی پره، B تعداد پره و q هارمونیک‌های محیطی در سری فوریه رابطه (2) می‌باشد. در این مقاله نتایج برای اولین هارمونی زمانی یعنی $s=1$ یا به عبارتی در اولین فرکانس عبوری پره با تعداد $B=5$ ارائه می‌شود. در این صورت تعداد کل Q ها یعنی تعداد درایه‌های ماتریس نیرو در رابطه (9) از رابطه $q_{max}-q_{min}+1=6$ که در مرجع [21] ارائه شده معادل با 6 است. بنابراین مطابق رابطه 9 ماتریس انتقال یک ماتریس 64×6 و ماتریس نیرو یک ماتریس 6×1 می‌شود. کد تحلیلی نوشته شده در متلب برای دامنه β های مختلف حل و مطابق با روش ریاضیاتی نیلسون و یون مقادیر لگاریتمی نیرو بر حسب باقیمانده فشار آکوستیکی برای هارمونیک‌های مختلف استخراج می‌شود. دیاگرام کد تحلیلی به منظور استخراج صحیح مقادیر متوسط نیرو در شکل 9 مشاهده می‌شود.



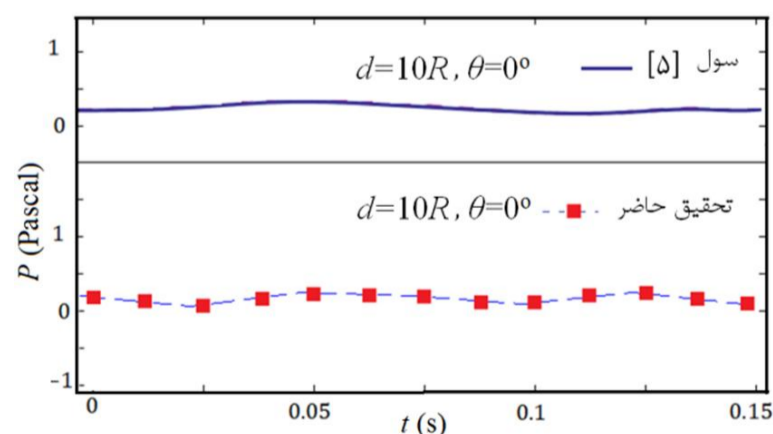
شکل 8 سطح فشار صوت بدست آمده در روش عددی برای هیدروفون 1 و 2

3- Frequency

r_0^m (m)	θ (rad)	φ_i ($i=1 \dots 64$)(rad)	تعداد هیدروفون
1/5	1/5533	$i \times \pi/32$	64
1/5	1/5533	$i \times \pi/16$	32

فشار صوت برای 64 هیدروفون موجود در شکل 6-ب که موقعیت آنها در جدول 2 مشاهده می‌شود در دینامیک سیالات محاسباتی بدست می‌آید. بدین منظور ابتدا میدان جریان با حل معادلات ناویر استوکس¹ حل می‌شود. سپس سطوح پروانه به عنوان سطح مرجع در انتگرال گیری معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز انتخاب می‌شود. بعد از آن معادلات فاکس ویلیامز و هاوکینگز حل و تاریخچه میدان فشار آکوستیکی در 64 هیدروفون استخراج می‌شود. با توجه به رابطه (9) مقادیر فشار در ناحیه فرکانسی است، بنابراین برای استخراج مقادیر فشار صوت در ناحیه فرکانسی باید از مقادیر تاریخچه زمانی فشار صوت تبدیل فوریه گرفت، بنابراین از تاریخچه زمانی فشار تبدیل فوریه و فشار در ناحیه فرکانسی به منظور استفاده در معادله (11) استخراج می‌شود. نمونه‌ای از تاریخچه زمانی فشار صوت برای هیدروفون 1 (شکل 6-ب) در شکل 7 مشاهده می‌شود. برای سایر هیدروفون‌ها نیز این تاریخچه استخراج و از آن تبدیل فوریه گرفته می‌شود. همانطور که از شکل 7 مشاهده می‌شود، تغییرات فشار در طول زمان در صفحه چرخش پروانه با نوسانات کمی همراه است. این موضوع به علت آن است که در حالت غیر کاویتاسیونی تغییرات فشار و یا به عبارتی نوسانات فشار تقریباً ثابت می‌باشد و به همین دلیل رفتار منحنی‌های صوت در حالت غیر کاویتاسیونی در ناحیه فرکانسی به شکل مشخصی و با نرخ ثابتی کاهش می‌یابد. اما در حالت کاویتاسیونی به علت فیزیک کاویتاسیون که مانند یک حباب بزرگ کره‌ای شکل عمل نموده و دائماً در حال نوسان می‌باشد تغییرات فشار با دامنه‌های بزرگتری نوسان و بنابراین تغییرات فشار در طول زمان با نوسانات بیشتری همراه است. به منظور مقایسه رفتار درست فشار زمان برای این مدل پروانه و در صفحه چرخش پروانه این رفتار با تحقیق سول [5]، برای پروانه DTMB4119 مقایسه می‌شود. همچنین در شکل 7، تغییرات فشار زمان تحقیق سول در $10R$ و در صفحه چرخش پروانه برای حالت غیر کاویتاسیونی مشاهده می‌شود. با مقایسه نتایج سول و تحقیق حاضر در شکل 7 مشاهده می‌شود که در صفحه چرخش پروانه و در حالت غیر کاویتاسیونی تغییرات فشار در طول زمان با نوسانات کمی همراه است.

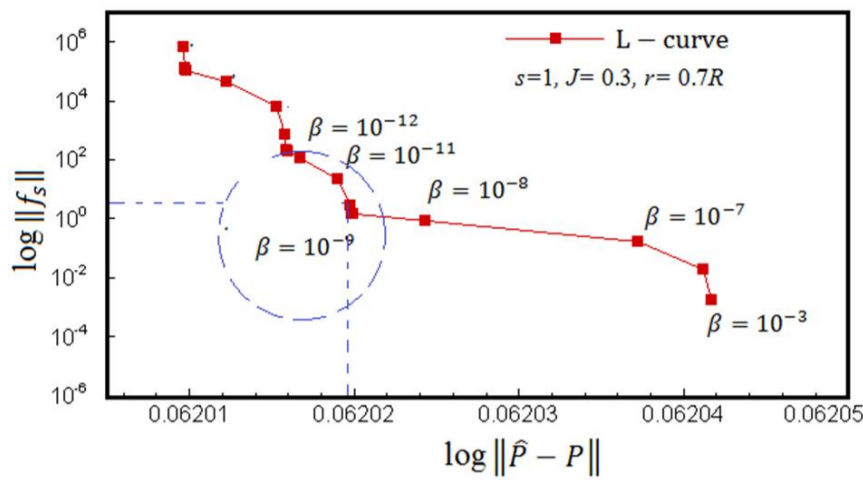
نمودار فشار زمان برای سایر هیدروفون‌های شکل 6-ب استخراج می‌شود که در این مقاله نتیجه فشار زمان برای نمونه در هیدروفون 1 ارائه می‌شود (شکل 7). همچنین مقایسه سطح فشار صوت در فاصله یکسان اما در دو صفحه مختلف مهم می‌باشد. بدین منظور نتایج سطح فشار صوت² در دو



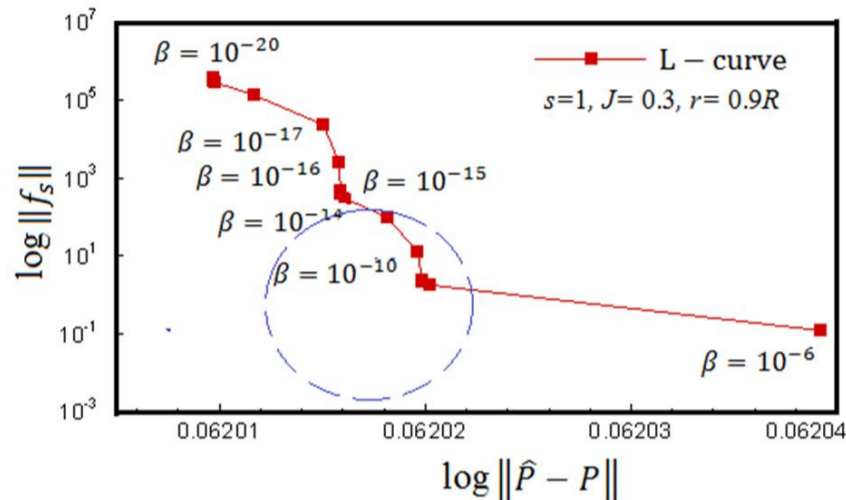
شکل 7 تغییرات فشار آکوستیکی در طول زمان

1- Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)

2- Sound Pressure Level (SPL)



شکل 11 نمودار نورم 2 نیرو بر حسب نورم 2 باقیمانده فشار برای s=1 در r=0/7R



شکل 12 نمودار نورم 2 نیرو بر حسب نورم 2 باقیمانده فشار برای s=1 در r=0/9R

همانطور که بیان شد عدد حالت پارامتر بسیار مهمی در انتخاب صحیح β و به منظور محاسبه درست نیروی محوری عمود بر مقطع می‌باشد. زیرا هر گونه تغییرات کم در فشار نباید منجر به تغییرات زیاد در نیرو شود. بنابراین انتخاب صحیح آن بسیار حائز اهمیت است. در مرجع [21] محدوده مناسب برای β بین 10^{-12} تا 10^{-5} گزارش شده است و در مطالعه حاضر این محدوده 10^{-12} تا 10^{-7} مناسب می‌باشد. باید توجه شود که هرچه عدد حالت کوچکتر شود نتایج مطلوبتر می‌شود، اما مقادیر خیلی کم نیز ممکن است منجر به ناپایداری تابع انتقال شود. بنابراین در این مقاله محدوده مناسب عدد حالت $1/21 \times 10^6 - 1/21 \times 10^4$ گزارش می‌شود.

جدول 5 استخراج عدد حالت و پارامتر مناسب β در سه مقطع پروانه

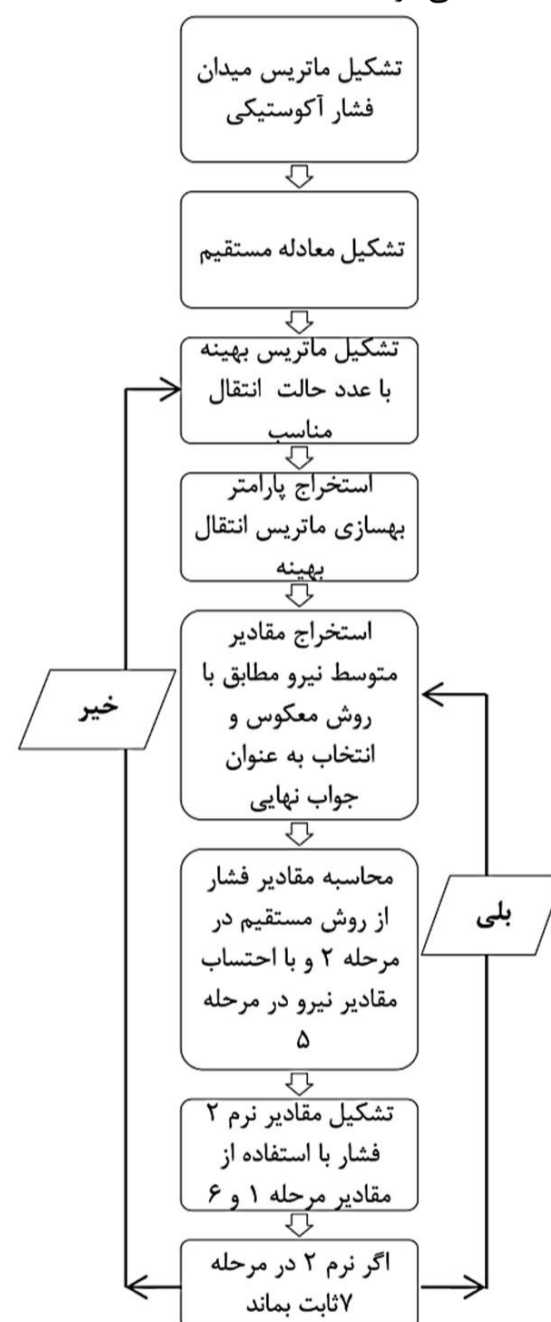
0/9R, s=1		0/7R, s=1		0/5R, s=1		ردیف
K	β	K	β	K	β	
2×10^{14}	10^{-20}	$1/21 \times 10^{14}$	10^{-20}	$6/19 \times 10^{13}$	10^{-20}	1
2×10^{12}	10^{-18}	$1/21 \times 10^{12}$	10^{-18}	$6/19 \times 10^{11}$	10^{-18}	2
2×10^{10}	10^{-16}	$1/21 \times 10^{10}$	10^{-16}	$6/19 \times 10^9$	10^{-16}	3
2×10^8	10^{-14}	$1/21 \times 10^8$	10^{-14}	$6/19 \times 10^7$	10^{-14}	4
2×10^6	10^{-12}	$1/21 \times 10^6$	10^{-12}	$6/19 \times 10^5$	10^{-12}	5
2×10^4	10^{-10}	$1/21 \times 10^4$	10^{-10}	$6/19 \times 10^3$	10^{-10}	6
2×10^2	10^{-8}	$1/21 \times 10^2$	10^{-8}	$6/2 \times 10$	10^{-8}	7
4/01	10^{-6}	2/21	10^{-6}	1/06	10^{-6}	8

جدول 6 استخراج عدد حالت مناسب

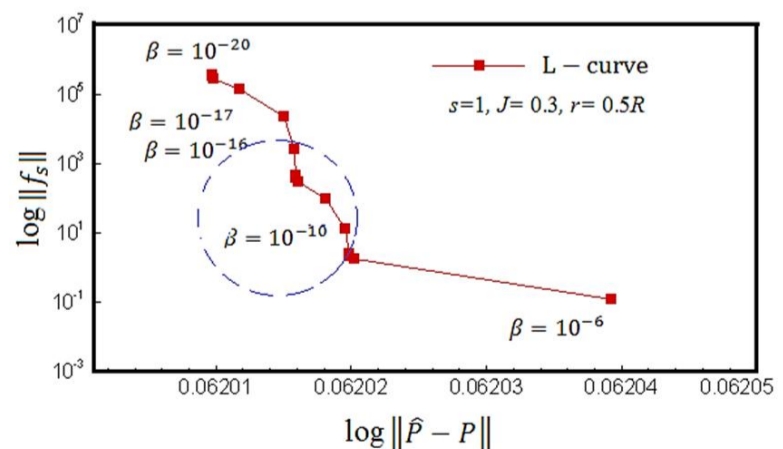
$\phi_{i=(1...64)} \text{ (rad)}$	$\theta_{1...64} \text{ (rad)}$	K عدد حالت
	پرسزنیاک [24]	
$i \times \pi/32$	1/5533	$1/012 \times 10^5$
	تحقیق حاضر	
$i \times \pi/32$	1/5533	$1/21 \times 10^6 - 1/21 \times 10^4$

نرم 2 بردار f_s نسبت به نرم 2 بردار باقیمانده $\| \hat{P} - P \|$ در مقیاس لگاریتمی برای مقادیر مختلف β و برای هارمونی اول در مقاطع 0/7R, 0/5R و 0/9R در شکل‌های 10 تا 12 مشاهده می‌شود. مقادیر مناسب β با استفاده از روش منحنی پایداری که در مرجع [21] ارائه شده انتخاب می‌شود که در شکل 10 تا 12 با خط چین دایره‌ای مشخص می‌شود. مقادیر نیرو در هارمونی اول حائز اهمیت است که ضرایب فوریه مناسب برای آن استخراج و مقدار نیرو در این مقاطع برای هارمونی اول در این مقاله ارائه می‌شود.

بنابراین محدوده مناسب β برای هر هارمونی با توجه به روش معیار منحنی L در مرجع [21] و عدد حالت مناسب استخراج می‌شود. مقادیر عدد حالت و β در حالات مختلف در جدول 5 مشاهده می‌شود. محدوده مناسب عدد حالت و پارامتر مرتب سازی در جدول 5 در ردیف 4 تا 7 مشاهده می‌شود. در مقایسه با تحقیقات گذشته محدوده مناسب در جدول 6 برای مقطع 0/7R مقایسه و مشاهده می‌شود.



شکل 9 دیاگرام کد تحلیلی به منظور استخراج صحیح مقادیر متوسط نیرو



شکل 10 نمودار نورم 2 نیرو بر حسب نورم 2 باقیمانده فشار برای s=1 در r=0/5R

5- نتیجه گیری

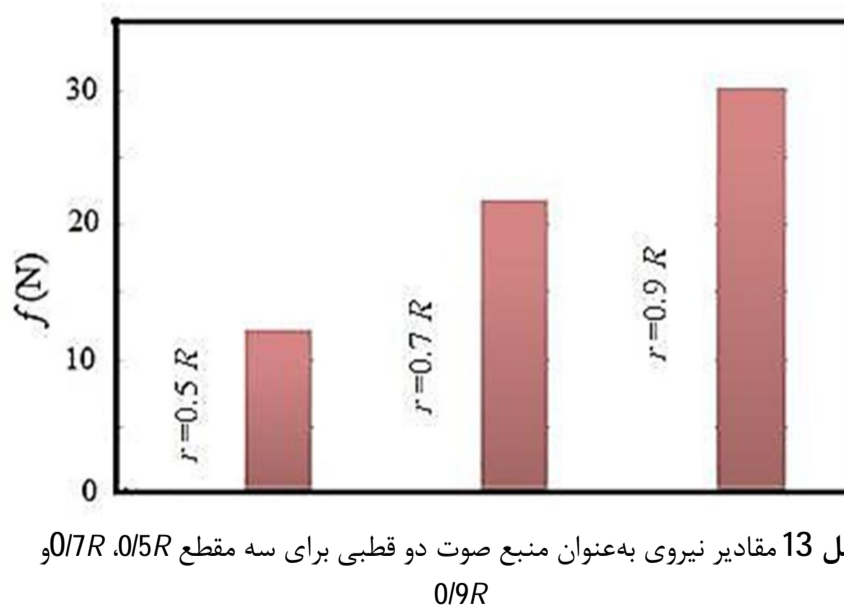
روش معکوس به منظور ارزیابی نیروهای چرخشی ناپایا (ناشی از توزیع قدرت دو قطبی‌ها) که توسط چرخش فن یا پروانه در سیال اعمال می‌شود استفاده می‌شود. به منظور استفاده از این روش از اندازه‌گیری‌های فشار آکوستیکی میدان دور یا به عبارتی نویز به وجود آمده در فرکانس‌های عبوری پره استفاده می‌شود. معکوس مستقیم رابطه فشار آکوستیکی بر اساس نیروهای ناپایای چرخشی خوش رفتار نمی‌باشد به عبارتی در معکوس مستقیم مشکلاتی در حل به خصوص در معکوس کردن ماتریس انتقال که ارتباط میان نیروی چرخشی ناپایای اعمالی از پروانه در سیال است و مقادیر فشار آکوستیکی اندازه گیری شده در فرکانسهای پره وجود دارد. بنابراین نیاز به بهینه سازی و استفاده از تکنیکی به منظور پایداری در حل می‌باشد. در بازسازی نیروهای ناپایا، مسئله معکوس وابسته به منبع و محل گیرنده‌ها در میدان دور و برای فرکانس‌های عبوری پره می‌باشد. در این مقاله نیروهای ناپایای ناشی از چرخش پروانه در سیال به عنوان مهمترین منابع تولید صوت در حالت غیر کاویتاسیونی و به شیوه معکوس استخراج شده است. به منظور استخراج صحیح این نیروها معکوس ماتریس انتقال خوش رفتار و مقادیر بهینه ضریب پایداری و عدد حالت مناسب بدست آمد.

مقدار مناسب ضریب پایداری در محدوده 10^{-12} تا 10^{-7} قرار دارد. همچنین محدوده عدد حالت مناسب در محدوده $1/21 \times 10^4 - 1/21 \times 10^6$ قرار دارد. از آنجا که اندازه‌گیری نیروهای ناپایا به‌عنوان منابع دو قطبی به شیوه تجربی پیچیده و نیاز به سنسورهای پیزو دقیق دارد، بنابراین روش معکوس به منظور استخراج این نیروها به‌عنوان مهمترین منابع صوت در حالت غیر کاویتاسیونی پیشنهاد می‌شود. با استخراج این نیروها در مقاطع مختلف پره می‌توان پروانه‌ای طراحی که این نیروها را در مقاطع مختلف کاهش داد و به دنبال آن پروانه‌ای با نویز پایین طراحی کرد. مهمترین نوآوری موجود در این مقاله استفاده از روش معکوس غیرمستقیم به منظور استخراج نیروهای ناپایا به عنوان منبع دو قطبی صوت برای پروانه دریایی می‌باشد. این تحقیق برای اولین بار بر روی یک پروانه دریایی صورت گرفته است و استفاده از نتایج آن به منظور طراحی پروانه با نویز کم بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در ادامه پیشنهاد می‌شود، نیروها در مقاطع زیادی از پروانه استخراج و پروانه‌ای با کمترین میزان صوت طراحی و ساخته شود.

6- فهرست علائم

B	تعداد پره
c	سرعت صوت
f_{sL}	بردار منبع صوت
$f_{s-q_{max}}$	ضریب فوریه نیروی ناپایای چرخشی
f_z	نیروی محوری عمود بر واحد سطح در جهت محور Z
g_{1z}	میدان صوت حاصل از یک نیروی نقطه‌ای در جهت Z
H_{jq}	ضرایب ماتریس انتقال
H_s^H	هرمتین ماتریس انتقال
H_s^+	شکل خوش رفتار ماتریس انتقال
J	ضریب پیشروی
J_m	تابع بسل استوانه‌ای از مرتبه m
k	عدد موج آکوستیکی
k_Q	ضریب گشتاور
k_t	ضریب تراست

به منظور به دست آوردن نیروی ناپایای اعمالی به سیال که منجر به نویز می‌شود از روش معکوس استفاده و در نهایت هدف استخراج ضرایب فوریه نیرو از رابطه (9) یعنی مقادیر $\begin{pmatrix} f_{s-q_{min}} \\ \vdots \\ f_{s-q_{max}} \end{pmatrix}$ بر اساس معادله (11) می‌باشد. مقادیر مناسب به عنوان ضرایب فوریه $S-Q$ استخراج و سپس با به کارگیری رابطه (2) مقادیر نیرو برای مقطع مورد نظر بدست می‌آید. آنچه مسلم است بدست آوردن مقادیر صحیح نیرو حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین اعتبارسنجی این مقادیر لازم می‌باشد. همانطور که از رابطه 9 مشخص است در ابتدا مقادیر فشار صوت اندازه‌گیری شده در میدان دور باید بدست آید و از نتایج این مقادیر و بدست آوردن تابع انتقال که ارتباط میان فشار صوت و منبع تولیدی صوت که همان نیروی ناپایای ناشی از چرخش پره در سیال می‌باشد با به کارگیری مدل معکوس، نیرو یا منبع تولید صوت در هر مقطع که به شکل نیرویی عمود بر مقطع در محل مورد نظر و در جهت محور Z می‌باشد قابل استخراج است. همانطور که کاملاً توضیح داده شد هدف استخراج نیرو از مقادیر اندازه‌گیری شده فشار صوت که توسط دینامیک سیالات محاسباتی بدست آمده و اعتبارسنجی شده است، می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه معکوس مستقیم رابطه (8) امکان‌پذیر نمی‌باشد (به دلیل اینکه دترمینان ماتریس تابع انتقال صفر می‌شود) بنابراین روش ریاضی و ارائه پارامتر مرتب سازی که توسط نیلسون و یون ارائه شده است به کار گرفته و ماتریس تابع انتقال خوش رفتار و سپس عملیات معکوس صورت می‌گیرد. پس از آنکه ماتریس انتقال خوش رفتار شد مقادیر صحیح ماتریس ضرایب فوریه نیرو یعنی $\begin{pmatrix} f_{s-q_{min}} \\ \vdots \\ f_{s-q_{max}} \end{pmatrix}$ بدست آمده و سپس از این مقادیر و تابع انتقال اولیه مطابق رابطه (8) استفاده و ماتریس مقادیر فشار صوت به شیوه مستقیم استخراج می‌شود. این مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده که توسط دینامیک سیالات محاسباتی بدست آمده مقایسه و کمترین خطا میان آن‌ها برای انتخاب پارامتر مرتب سازی مناسب β حاصل می‌شود. بنابراین مقادیر صحیح نیرو و با خطای کم حاصل می‌شود. نمودار مقادیر نیرو برای سه مقطع $0/5R$ ، $0/7R$ و $0/9R$ در شکل 13 مشاهده می‌شود. بنابراین با به کارگیری روش معکوس غیرمستقیم نیرو یا منبع دو قطبی تولید صوت در سیال و در روی مقاطع مختلف به دست می‌آید. همانطور که از شکل 13 مشخص است، مقدار نیرو در مقاطع مختلف متفاوت است. با افزایش سرعت و نزدیک شدن به نوک پره مقادیر نیرو به علت ارتباط با نرخ سرعت افزایش می‌یابد. مقادیر نیرو در شکل 13 مقادیر متوسط نیروی ماکزیمم در هر مقطع می‌باشد.



شکل 13 مقادیر نیروی به‌عنوان منبع صوت دو قطبی برای سه مقطع $0/5R$ ، $0/7R$ و $0/9R$

- [10] M.E. Goldstein, "Aeroacoustics", McGraw-Hill International Book Company, 293, 1976.
- [11] S.E. Wright, "Sound radiation from a lifting rotor generated by asymmetric disk loading", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 223-240, 1969.
- [12] J.M. Tyler, T.G. Sofrin, "Axial flow compressor noise studies", *Transaction of the Society of Automotive Engineers*, Vol. 70, pp. 309-332, 1994.
- [13] W. Neise, "Review of Fan Noise Generation Mechanisms and Control Methods", *Fan Noise* 92, pp. 45-56, 1992.
- [14] X.D. Li, S. Zhou, "Spatial transformation of the discrete sound field from a propeller", *American Institute of Aeronautics Journal*, Vol. 34, No. 6, pp. 1097-1102, 1996.
- [15] J. Lue, X.D. Li, "An inverse aeroacoustics problem on rotor wake/stator interaction", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 254, pp. 219-229, 1998.
- [16] S.P. Grace, H.M. Atassi, "Inverse aeroacoustic problem for a streamlined body", part 1: Basic formulation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 34, pp. 2233-2240, 1996.
- [17] S.P. Grace, H.M. Atassi, "Inverse aeroacoustic problem for a streamlined body", part 2: Basic formulation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, Vol. 34, pp. 2241-2246, 1996.
- [18] T.V. Wood, S.M. Grace, "Inverse aeroacoustic problem for a rectangular wing", *American Institute of Aeronautics Journal*, Vol. 38, No. 2, pp. 203-210, 2000.
- [19] H. Trabelsi, M. Abid, M. Taktak, T. Fakhfakh and M. Haddar, "Reconstruction of the unsteady rotating forces of fan's blade from far-field sound pressure", *Applied Acoustics*, xxx (2014) xxx-xxx.
- [20] M.V. Lawson, "Theoretical analysis of compressor noise", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 47, No. 1, pp. 371-385, 1968.
- [21] A. Grad, A. Berry and P. Masson, "Reconstruction of aeroacoustic sources from far-field sound pressure", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 288, pp. 1049-1075, 2005.
- [22] M.J. Light hill, "On sound generated aerodynamically: I. General theory", *Proc. Royal Society London*, Vol. 211, pp. 564-587, 1952.
- [23] J.E. Ffowcs Williams, D.L. Hawkings, "Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 264, No. 3, pp. 321-342, 1969.
- [24] F. Presezniak, G. Steenackers, P. Guillaume, "Mechanical systems and signal processing", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 1682-1692, 2010.
- [25] W. Li, C. Yang, "Numerical Simulation of Flow around a Podded Propeller", *Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 756-762, Osaka, Japan, June 21-26, 2009.
- [26] S. Subhas, V.F. Saji, S. Ramakrishna and H.N. Das, "CFD Analysis of a Propeller Flow and Cavitation", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 55, No. 16, pp. 26-33, 2012.
- [27] A. Sanchez, "P4119 RANS calculations at VTT", *22nd ITTC propeller RANS/Panel Method workshop*, France, 1998.
- [28] S. Ivanell, "Hydrodynamic simulation of a torpedo with pump jet propulsion system", Master thesis, Stockholm, 2010.
- [29] J. Kulczyk, L. Skraburski and M. Zawislak "Analysis of screw propeller 4119 using the Fluent system", *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 129-136. 2010.

دور پروانه (rpm)	N
ضریب فوریه فشار آکوستیکی اندازه گیری شده	P_s^j
فشار صوت اندازه گیری در روش عددی	\hat{P}
نوسان فشار آکوستیکی	p'
تزریق جرمی ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	\dot{q}
هارمونیک های محیطی مقطع پره	q
تعداد هارمونیک های محیطی	Q
شعاع پروانه (m)	R
شمارنده هارمونی های فرکانسی پره	S
سطح فشار صوت (dB)	SPL
تنسور تنش لایت هیل	τ_{ij}
فرکانس زاویه ای (rads^{-1})	w
علائم یونانی	
ضریب فوریه هارمونی های محیطی	β_q
ضریب فوریه هارمونی های زمانی	α_s
ضریب بازده	η

7- مراجع

- [1] J.E. Ffowcs Williams, D.L. Hawkings, "Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 264, No. 3, pp. 321-342, 1969.
- [2] Y.c. Pan, H.X. Zhang, "Numerical prediction of marine propeller noise in non-uniform in flow", *Journal china ocean Eng.* Vol. 27, pp. 33-42, 2013.
- [3] Y. jin-ming, X. Ying, L. Fang and W. Zhang-Zhi, "Numerical prediction of blade frequency noise of cavitating propeller", *Journal Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 3, pp. 371-377, 2012.
- [4] H. Seol, B. Jung, J.C. Suh and S. Lee, "Prediction of non-cavitating underwater propeller noise", *Journal Sound and Vibration*, Vol. 257, No. 1, pp. 130-157, 2002.
- [5] H. Seol, J.C. Suh, S. Lee, "Development of hybrid method for the prediction of underwater propeller noise", *Journal Sound and Vibration*, Vol. 288, No. 1-2, pp. 345-360, 2005.
- [6] S. Caro, R. Sandboge, I. Iyer and Y. Nishio, "Presentation of a CAA formulation based on LightHill's analogy for fan noise", *Conference on fan noise Lyon*, 17-19 Sep, 2007.
- [7] M.R. Bagheri, M.S. Seif, H. Mahdigholi, "Numerical simulation of underwater propeller non-cavitating noise by FVM method", *2nd International conference on Vibration and Acoustic*, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [8] M.R. Bagheri, M.S. Seif, H. Mahdigholi, "Hydrodynamic and acoustic analysis of underwater propellers by numerical method", *Journal Maritime Technology*, Vol. 9, No. 17, pp. 1-14, 2013.
- [9] M.R. Bagheri, M.S. Seif, H. Mahdigholi, "An analysis of hydrodynamics and noise behavior for submerged propeller in various conditions by experimental and numerical methods", *Journal Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 15-25, 2014. (In Persian)