

مدل سازی تأثیر سکان در شبیه سازی عددی شناورهای تندرو

امین مهدی حسینی* (کارشناس ارشد)

محمد سعید سیف (استاد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (پیاو ۱۳۹۴)
دوره ۲ - ۳۱، شماره ۱، ص. ۱۳-۳

در این تحقیق اثر سکان بر حرکات یک شناور، در یک کد دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شده است. روش معمول در مدل سازی سکان استفاده از شبکه بندی هم برای سکان و هم برای بدنه است. اما استفاده از این روش، به دلیل افزایش تعداد سلول های محاسباتی به کاهش سرعت حل می انجامد. افزون بر این، با توجه به پیچیدگی فرآیند ایجاد شبکه در حالتی که سکان وجود دارد، در شبکه بندی فقط بدنه شناور مد نظر قرار می گیرد و نیروهای سکان به صورت روابط تجربی به آن اضافه و در حل معادلات حرکت از آن استفاده می شود. در این پژوهش ابتدا روش هایی برای تخمین نیروهای سکان در شرایطی که جریان با سرعت یکناخت به آن برخورد می کند ارائه می شود. سپس در حالتی که بدنه و پروانه بر جریان ورودی به سکان اثر می گذارند، روش اصلاح نیروها بیان می شود.

amin.mehdihoseyni@gmail.com
seif@sharif.edu

واژگان کلیدی: سکان، لیفت، درگ، زاویه پیچ.

۱. مقدمه

وقتی سرعت شناور خیلی کم باشد یا زاویه ی سکان کوچک باشد، کارکرد سکان مختل می شود. در این حالت بهترین راه این است که سکان در پایین دست جریان خروجی از پروانه قرار گیرد. حتی در سرعت های معمول نیز اگر سکان خارج از جریان پروانه قرار گیرد بازده مناسبی نخواهد داشت. پس در شرایطی که بازده سکان پایین می آید می توان با افزایش دور پروانه بر بازده آن افزود.

سکان هایی که در سینه ی شناور قرار می گیرند و آب خور شناور را زیاد نمی کنند، در حرکت رو به جلوی شناور بازده مناسبی نخواهند داشت؛ زیرا انحراف در جریان -- که توسط سکان در حالتی که زاویه دارد ایجاد می شود -- توسط بدنه خنثی می شود. بنابراین نیروی عرضی ایجاد شده در سکان با نیروی ایجاد شده روی سینه ی شناور خنثی می شود.

برای بررسی سکان روش های مختلفی وجود دارد. در برخی از مطالعات، سکان به همراه بدنه و پروانه به صورت آزمایشگاهی^[۱] و نیز پروانه و سکان به صورت عددی بررسی شده است. در مطالعات دیگری نیز اثر حفره بندی (کاویتاسیون) بر پروانه به صورت عددی و تجربی بررسی شد.^[۲] در ادامه محققین به مقایسه ی عددی سیستم آزیپاد با سکان پرداختند.^[۳] و برخی نیز اثر حفره بندی بر سکان را بر اثر کارکرد پروانه بررسی کردند.^[۴] همچنین سکان در دو حالتی که بدنه باشد و نباشد، به روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شد.^[۵] مطالعاتی نیز برای بررسی سکان از طریق محاسبات جریان آشفته و بدون وقوع حفره بندی انجام شده است.^[۶]

برای جهت دهی به شناورها دو نوع ابزار کنترلی وجود دارد: ابزار فعال و غیرفعال. ابزارهای فعال همان تراسترها هستند که یا تراسترهای اصلی شناورند که با تغییر زاویه سبب مانور شناور می شوند، یا تراسترهایی هستند که فقط برای ایجاد مانور مستقر شده اند. اما ابزارهای غیرفعال در واقع صفحاتی هستند که با ایجاد اختلاف فشار در دو طرف، نیروی لیفت و درگ ایجاد می کنند و سبب مانور شناور می شوند. برخلاف ابزارهای فعال که حتی در سرعت های پایین عملکرد مطلوبی دارند، ابزارهای غیرفعال در سرعت های خیلی کم کارایی خود را از دست می دهند. در این تحقیق سکان از نوع ابزار غیرفعال در نظر گرفته می شود.

سکان ها هیدروفویل هایی هستند که دارای محورهای عمودی یا نزدیک به عمودند و معمولاً در پاشنه ی شناور و در پشت پروانه قرار می گیرند. سکان با منحرف کردن جریان ورودی نیروی عرضی تولید می کند که سبب ایجاد ممان در مرکز جرم شناور می شود و باعث می شود شناور قابلیت مانوردهی پیدا کند. علل استقرار سکان در پاشنه عبارت است از:

-- ممانی که سبب مانوردهی شناور می شود از تولید نیروی سکان، و عکس العمل آن روی بدنه ایجاد می شود. واضح است که هرچه بازوی ممان بزرگ تر باشد، ممان ایجاد شده بزرگ تر خواهد بود. با توجه به وضعیت شناور در حالت حمل بار، قرارگیری سکان در پاشنه سبب بزرگ تر شدن بازوی ممان خواهد شد.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۴/۲۳، پذیرش ۱۳۹۲/۹/۲۶.

۲. انواع سکان

تاکنون انواع مختلفی از سکان ساخته شده که رایج ترین آن عبارت اند از: [۷]

۱.۲. سیمپلکس

سیمپلکس رایج ترین نوع سکان در گذشته بود. چنان که از نام آن پیداست این نوع سکان در بالا و پایین یاتاقان قرار دارد و پایین آن باید آن قدر پهنا داشته باشد که قادر به تحمل نیروهای افقی باشد. سطح این نوع سکان معمولاً مستطیلی است و قسمت پایینی آن سبب وقوع جدایی و در نتیجه افزایش مقاومت می شود. همچنین اگر سکان زاویه داشته باشد، وجود ناهمگونی سبب ایجاد ویک در میدان، و در نتیجه افزایش ارتفاعات القایی در پروانه می شود. بنا به دلایل یاد شده امروزه در شناورهای تک پروانه از این نوع سکان استفاده نمی شود ولی در شناورهای کوچک تر مانند شناورهای ماهیگیری به دلیل ارزان تر بودن این نوع سکان همچنان از آن بهره می گیرند.

۲.۲. اسپید

این نوع سکان برای شناورهای خاص، مانند رو-روها، استفاده می شود. به طور معمول محور این نوع سکان تحت همان خمشی زیاد قرار می گیرد که وقتی شناور مورد نظر تندرو نیز باشد یا ارتفاع سکان زیاد باشد وضع بدتر نیز خواهد شد. اگر قطر محور بیش از ۱ متر باشد از این نوع سکان استفاده نمی شود.

۳.۲. نیمه متعادل

این نوع سکان قطعه بی به نام هد گاید^۱ دارد که یک قسمت آن به بدنه و قسمت دیگر آن به سکان متصل است. ویژگی های این نوع سکان عبارت است از:

-- نسبت به نوع اسپید در معرض همان خمشی کمتری قرار می گیرد.

-- نسبت به نوع اسپید بازدهی کمتری دارد. اگر پیچیدن یک کشتی را در حالت پایا در نظر بگیریم، مشاهده می شود که وقتی از این نوع سکان استفاده می شود، نیروی لیفت تولید شده بر روی سکان در این حالت نصف نیروی لیفتی است که در صورت استفاده از نوع اسپید ایجاد می شود. برای توجیه این پدیده می توان گفت:

- شکاف بین هورن^۲ و سکان برای زوایای بزرگ تر فضای خالی زیادی ایجاد می کند، حتی در بعضی موارد از لایه هایی برای پوشاندن این شکاف استفاده می شود.
- زوایای حمله برای هورن نامناسب است.
- نسبت درگ به لیفت در این نوع سکان دو برابر نوع اسپید است.
- سکان ها دارای فلپ هستند.

قسمت انتهایی این نوع سکان به وسیله سیستم های هیدرولیکی یا مکانیکی می تواند نسبت به بقیه سکان زاویه داشته باشد. این نوع سکان در هر زاویه نیروی لیفت بیشتری تولید می کند و بیشینه نیروی لیفت تولید شده به وسیله آن ۶۰ تا ۷۰ درصد بیشتر از بیشینه نیروی لیفت تولید شده در سکان های معمولی است.

۳. نیروهای وارد بر سکان

مؤلفه ی نیرو در راستای زاویه ی حمله را «درگ»، و عمود بر آن را «لیفت» می نامند. همان حول محور سکان که در لبه ی حمله قرار دارد اختصاراً با Q_N نمایش داده می شود. اگر فاصله ی لبه ی حمله تا محور سکان d باشد، گشتاور سکان از رابطه ی ۱ به دست می آید:

$$Q_R = Q_N + L.d. \cos \alpha + D.d. \sin \alpha \quad (1)$$

روابط مهم در مورد سکان عبارت است از: [۸]

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_R} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_R} \quad (3)$$

$$C_{Q_N} = \frac{Q_N}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_R c_m} \quad (4)$$

$$C_{Q_R} = \frac{Q_R}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_R c_m} \quad (5)$$

که در آن:

$$c_m = \frac{A_R}{b} \quad (6)$$

A_R سطح سکان است. ضریب گشتاور سکان نیز طبق رابطه ی ۷ بیان می شود:

$$C_{Q_R} = C_{Q_N} + \frac{d}{c_m} (C_L \cdot \cos \alpha + C_D \cdot \sin \alpha) \quad (7)$$

۴. ضریب لیفت و درگ سکان

در این قسمت روابطی برای محاسبه ی ضرایب لیفت و درگ ارائه شده است.

۱.۴. روش تحلیلی اول

با استفاده از روابط تجربی و محاسباتی می توان C_L ، C_D و C_{Q_N} را بیان کرد. برای زوایای حمله ی کوچک تر از زاویه ی استال داریم: [۹]

$$C_L = C_{L1} + C_{L2} = 2\pi \frac{AR \cdot (AR + \theta \cdot \gamma)}{(AR + \theta \cdot \gamma)^2} \cdot \sin \alpha + C_Q \cdot \sin \alpha \cdot |\sin \alpha| \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$C_D = C_{D1} + C_{D2} + C_{D3} = \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR} + C_Q \cdot |\cos \alpha|^2 + C_{D3} \quad (9)$$

$$C_{Q_N} = -(C_{L1} \cdot \cos \alpha + C_{D1} \cdot \sin \alpha) \cdot (\theta \cdot \gamma - \frac{AR + 2}{4(AR + 1)}) - \theta \cdot \gamma \cdot 5(C_{L1} \cdot \cos \alpha + C_{D1} \cdot \sin \alpha) \quad (10)$$

جمله ی اول در رابطه ی ۸ از نظریه ی پتانسیل فویل نازک به دست می آید که برای ضریب منطری صفر یا بی نهایت، دقیق است و برای سایر مقادیر ضریب منطری تقریبی است. جمله ی اول در رابطه ی ۹ مربوط به درگ القایی حاصل از گردابه های پشت سکان است. جمله ی اول در رابطه ی ۱۰ نیز مربوط به حالتی است که سیال ایده آل باشد. جمله ی دوم در روابط ۸ و ۹ مربوط به مقاومت اضافی است که

۳.۴. روش تحلیلی دوم

ضرایب ارائه شده برای ضریب لیفت و درگ عبارت‌اند از: [۹]

$$C_L = \frac{2\pi \cdot AR \cdot (AR + 1)}{(AR + 2)^2} \sin \delta + C_Q \sin \delta |\sin \delta| \cos \delta \quad (19)$$

$$C_D = 1/8 \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR} + C_Q |\sin \delta|^2 + C_{D0} \quad (20)$$

که در آن:

$$C_{D0} = 2/5 \frac{0.75}{(\log Rn - 2)^2} \quad (21)$$

و برای سکان با لبه‌های تیز می‌توان مقدار C_Q را معادل ۱ در نظر گرفت.

۵. اثر ضریب منظری بر زاویه‌ی مؤثر سکان

بزرگ‌تر شدن ضریب منظری به افزایش ضریب لیفت می‌انجامد اما، ضریب لیفت بیشینه مستقل از ضریب منظری است. اگر هدف افزایش نیروی لیفت بر اثر افزودن سطح سکان باشد، بهتر است بر ارتفاع سکان افزوده شود تا طول وتر، زاویه‌ی مؤثر سکان مطابق رابطه‌ی ۲۲ بیان می‌شود: [۷]

$$\delta_{eff} = \frac{2/2 AR}{AR + 2} \delta \quad (22)$$

۶. تأثیر پروانه بر سکان

معمولاً سکان در مسیر جریان خروجی از پروانه قرار می‌گیرد، زیرا: [۷]

-- مقطع سکان با استفاده از انرژی چرخشی سیال خروجی از پروانه بازده را بالا می‌برد؛

-- چنانچه سکان در مسیر جریان خروجی از پروانه قرار گیرد، نیروهای وارد بر آن دو برابر سکانی است که در مسیر جریان خروجی از پروانه قرار نمی‌گیرد.

از آنجا که عملکرد سکان وابسته به سرعت سیال مجاور آن است، چنانچه شناور مانوری با سرعت پایین انجام دهد، سیال سرعت خود را از دست می‌دهد و در نتیجه بازده آن کاهش می‌یابد. در این حالت می‌توان با به کار بردن پروانه به جریان سیال سرعت داد و این نارسایی را جبران کرد.

نیروهای تولید شده توسط سکان، با توان دوم سرعت متناسب است و لذا تعیین سرعت جریان در محل سکان، در تخمین نیروهای سکان بسیار مهم است. براساس نظریه‌ی اندازه حرکت برای پروانه، میانگین سرعت محوری جریان پشت پروانه برابر است با: [۷]

$$V_{\infty} = V_A \sqrt{1 + C_{Th}} \quad (23)$$

که در آن C_{Th} ضریب بار تراست است و آن عبارت است از: [۹]

$$C_{Th} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_A^2 A_P} \quad (24)$$

V_A میانگین سرعت محوری ورودی جریان سیال به پروانه (سرعت پیشروی)، و A_P سطح دیسک پروانه است.

متناسب با توان چهارم سرعت فرض شده است. در مورد سکان‌هایی که لبه‌های تیز دارند می‌توان مقدار C_Q را معادل ۱ در نظر گرفت، در غیر این صورت این عدد بزرگ‌تر از ۱ خواهد بود. جمله‌ی دوم در رابطه‌ی ۱۰ از فرض قرار گرفتن نیرو در فاصله‌ی ۰.۷۵ طول وتر از لبه‌ی حمله به دست آمده است. ضریب اصطکاک از رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید.

$$C_{D0} = 2/5 \frac{0.75}{(\log Rn - 2)^2} \quad (11)$$

این روابط متناسب با نیمی از سطح خیس شده‌ی سکان است. عدد رینولدز به صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود.

$$Rn = \frac{Vc}{\nu} \quad (12)$$

اگر ضخامت پروفیل سکان بیشتر شود، ضریب لیفت بیشینه افزایش می‌یابد. اما افزایش درگ و نیز افزایش احتمال وقوع حفره‌بندی (کاویتاسیون) از معایب افزایش ضخامت است.

روابط یادشده برای زوایای کوچک‌تر از زاویه‌ی استال مناسب است، زیرا در غیر این صورت جدایی جریان رخ می‌دهد و روابط ذکر شده معتبر نخواهند بود. به طور خلاصه می‌توان عوامل مؤثر بر زاویه‌ی استال را «ضریب منظری»، «شکل پروفیل و ضخامت آن»، «عدد رینولدز»، «زبری سطح»، «توربولانس» و «توزیع سرعت ورودی» دانست. در حضور چهار مورد آخر نمی‌توان در تونل باد یا حوضچه‌ی کشش، بیشینه ضریب لیفت را به دست آورد.

۲.۴. ضرایب مربوط به سکان‌هایی که طول کورد متغیر دارند

ضریب لیفت و درگ مطابق روابط ۱۳ تا ۱۵ بیان شده است: [۸]

$$C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi \cdot e \cdot AR} = C_{D0} + K_i \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR} \quad (13)$$

$$C_L = \left[\frac{dC_L}{d\alpha} \right]_{\alpha=0} \times \alpha + \frac{C_{Dc}}{AR} \left[\frac{\alpha}{0.573} \right]^2 \quad (14)$$

$$\left[\frac{dC_L}{d\alpha} \right]_{\alpha=0} = \frac{(0.9)(2\pi)AR}{0.573 \left[\left(\cos \Omega \left(\frac{AR^2}{\cos^2 \Omega} + 4 \right)^{0.5} + 1/8 \right) \right]} \quad (15)$$

برای سکان با لبه‌های تیز:

$$C_{Dc} = 0.1 + 1/6 \frac{C_T}{C_R} \quad (16)$$

برای سکان با لبه‌های نرم:

$$C_{Dc} = 0.1 + 0.7 \frac{C_T}{C_R} \quad (17)$$

C_R و C_T به ترتیب نشان‌گر طول کورد در پایین و بالای سکان هستند.

با توجه به ناچیز بودن اثر زاویه‌ی سوپ (Ω)، می‌توان به جای رابطه‌ی ۱۵ از رابطه‌ی ۱۸ استفاده کرد:

$$\left[\frac{dC_L}{d\alpha} \right]_{\alpha=0} = \frac{1/95\pi}{0.573 \left[1 + \frac{2}{AR} \right]} \quad (18)$$

سرعت محوری جریان ورودی به سکان، در امتداد ارتفاع سکان به دلیل یک حاصل از پروانه تغییر می‌کند، به همین دلیل باید از سرعت متوسط استفاده کرد (رابطه ۳۳).

$$\bar{V}^r = \frac{1}{AR} \int_0^b V^r c \cdot dz \quad (33)$$

در حالت کلی می‌توان با اضافه کردن روابط ۳۴ و ۴۰ به لیفت و درگ^[۱۳] سکان در حالتی که بدنه وجود ندارد، به اصلاح لیفت و درگ سکان پرداخت.

$$\Delta L = T \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + C_{Th}}}\right) \cdot \sin \delta \quad (34)$$

$$\Delta D = T \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + C_{Th}}}\right) \cdot (1 - \cos \delta) \quad (35)$$

در روابط ۳۴ و ۳۵ نماد T نشان‌گر تراست پروانه و δ زاویه‌ی سکان است.

۷. اثر بدنه بر عملکرد سکان

اگر بدنه‌ی شناور درست در بالای سکان مغروق باشد، سیال از قسمت پرفشار به قسمت کم فشار جریان می‌یابد (مکش). همانند این فرایند، افزایش ضریب منظری سکان منجر می‌شود به:^[۷]

-- افزایش درگ القایی؛

-- افزایش شیب نمودار ضریب لیفت نسبت به زاویه‌ی حمله؛

-- افزایش ضریب لیفت بیشینه.

میزان تغییرات ضریب منظری وابسته به فاصله‌ی سکان تا بدنه است. برای فواصل خیلی کم، به لحاظ نظری این ضریب ۲ برابر حالت اسمی است، اما در حالت عملی ۱٫۶ برابر است. از این رو، برای کمینه‌کردن فاصله از فین استفاده می‌کنند.

اما اگر بدنه در بالای سکان مغروق نباشد یا بخشی از سکان بالای آب باشد، سطح آزاد ممکن است ضریب منظری را افزایش دهد. با افزایش سرعت، ضریب منظری کم‌تر از حالت قبل خواهد شد و حتی ممکن است افزایش سرعت اثر منفی بر ضریب منظری داشته باشد و این ناشی از دوفازی شدن سیال حول سکان است. ویک ایجاد شده توسط بدنه سبب می‌شود سرعت سیال در محل قرارگیری سکان تغییر کند. این تغییرات برابر با ضریب کاهش تراست است و سرعت جریان خروجی از پروانه برابر خواهد بود با:

$$V_x = \frac{(V_{corr} + t \cdot V^r)}{V_{corr}} \quad (36)$$

$$r_x = (r + \Delta r) \cdot \sqrt{\frac{V_{corr}}{V_x}} \quad (37)$$

برای زوایای غیر صفر سکان و در حالتی که شناور رو به جلو حرکت می‌کند، به دلیل برهمکنش سکان و بدنه نیروی لیفت در سکان کاهش می‌یابد، ولی علاوه بر آن در قسمت پاشنه‌ی شناور نیروی عرضی به شناور وارد می‌شود که هم‌راستا با نیروی سکان است. این نیرو سبب می‌شود نیروی کل با ضریب $1 + a_H$ افزایش یابد. a_H را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۳۸ محاسبه کرد:^[۷]

$$a_H = \frac{1}{1 + \left(4,9 \frac{e}{T} + 3 \frac{e}{T}\right)^2} \quad (38)$$

سیالی که از دیسک پروانه عبور می‌کند، تحت تأثیر پروانه قرار می‌گیرد و سرعت و فشار آن تغییر می‌کند. این سیال بر نیروی سکان تأثیر می‌گذارد اما با دور شدن از پروانه، شعاع دیسک حاوی این جریان تغییر می‌کند. برای تحلیل اثر پروانه بر سکان می‌توان از رابطه‌ی پیوستگی استفاده کرد؛ با فرض این که سرعت متوسط برای جریان در پروانه میانگین V_A و V_∞ باشد خواهیم داشت:^[۷]

$$r_\infty = r_0 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_A}{V_\infty}\right)} \quad (25)$$

که در آن r_0 شعاع پروانه است. اما معمولاً سکان در جایی قرار می‌گیرد که هنوز جریان به حالت پایا نرسیده و لذا در این حالت رابطه‌ی ۲۵ دقیق نیست و باید از رابطه‌ی ۲۶ استفاده کرد:^[۱۰]

$$r_x = r_0 \cdot \frac{0,14 \left(\frac{r_\infty}{r_x}\right)^2 + \frac{r_\infty}{r_x} \cdot \left(\frac{x}{r_x}\right)^{0,5}}{0,14 \left(\frac{r_\infty}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{x}{r_x}\right)^{0,5}} \quad (26)$$

و به‌طور مشابه برای سرعت داریم:

$$V_x = V_\infty \cdot \left(\frac{r_\infty}{r_x}\right)^2 \quad (27)$$

در روابط ۲۶ و ۲۷ نماد x نشان‌گر فاصله از پروانه است. برای به دست آوردن نیروهای سکان باید از مرکز سطح سکان استفاده کرد. رابطه‌ی یادشده برای r_x براساس محاسبات جریان پتانسیل به دست آمده است. با بررسی‌های تجربی مشاهده می‌شود که با دور شدن از پروانه، تحت تأثیر آشفتگی شاهد افزایش شعاع خواهیم بود. برای اصلاح شعاع از رابطه‌ی ۲۸ استفاده می‌کنیم:^[۱۱]

$$\Delta r = 0,15x \cdot \frac{V_x - V_A}{V_x + V_A} \quad (28)$$

بر همین اساس سرعت را نیز باید اصلاح کرد:

$$V_{corr} = (V_x - V_A) \cdot \left(\frac{r}{r + \Delta r}\right)^2 + V_A \quad (29)$$

V_{corr} نشان‌گر سرعت متوسط محوری جریان خروجی از پروانه در دیسک مورد نظر است.

سکان با منحرف کردن جریان سبب تولید نیروی لیفت می‌شود، اما وجود پروانه -- نسبت به حالتی که جریان به صورت یکنواخت وارد سکان می‌شود -- باعث کاهش نیروی لیفت خواهد شد. برای جریان دوبعدی پتانسیل و برای زوایای حمله‌ی کوچک می‌توان با ضرب کردن عبارت ۳۰ در نیروی لیفت ایجاد شده توسط سکان تنها، نیروی تولیدی سکان را اصلاح کرد:^[۱۰]

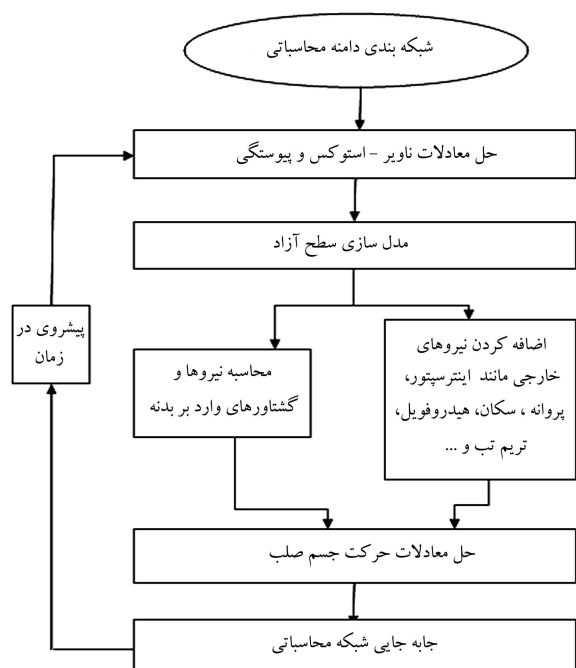
$$\lambda = \left(\frac{V_A}{V_{corr}}\right)^f \quad (30)$$

که در آن:

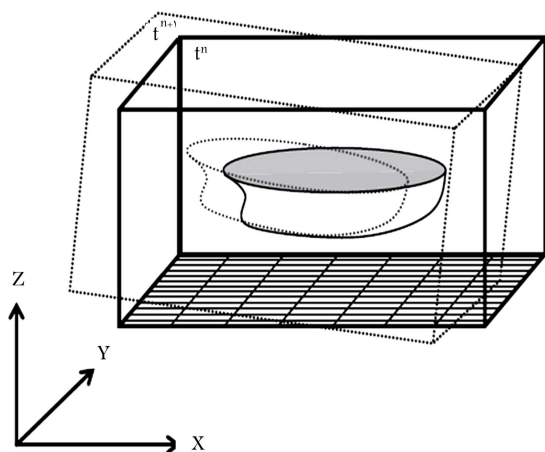
$$f = 2 \left(\frac{2}{2 + \frac{d}{e}}\right)^4 \quad (31)$$

d عرض جریان خروجی از پروانه در محل سکان است و برای به دست آوردن آن باید مربعی در نظر گرفت که مساحت آن برابر با مساحت دایره‌ی به شعاع $r + \Delta r$ باشد؛ بنابراین:^[۷]

$$d = \sqrt{\frac{\pi}{4}} (r + \Delta r) = 0,866 (r + \Delta r) \quad (32)$$



شکل ۱. مراحل مدل سازی شناور. [۱۵]



شکل ۲. شبکه بندی متصل به بدنه. [۱۶]

ساختار شبکه بندی در نرم افزار، به صورت متصل به بدنه است؛ به عبارت دیگر همراه با بدنه حرکت می کند و دوران می یابد (شکل ۲). در شکل ۳ مراحل مدل سازی سکان نشان داده شده است. ابتدا با حل دامنه ی مورد نظر نیروها به دست می آید و سپس در بخش حل معادلات جسم صلب با استفاده از آنها، حرکات شناور به دست می آید. در شکل ۴ به طور شماتیک المان هایی نشان داده شده که برای مدل کردن اثر سکان به کار می روند. چنان که مشاهده می شود المان های به کار رفته برای مدل کردن سکان نسبت به شناور همواره ثابت اند. در شکل ۵ نیروهای وارد بر شناور از طرف سکان نشان داده شده است. مراحل معتبر سازی نرم افزار NUMELS در جدول ۱ ارائه شده است. چنان که مشاهده می شود ابتدا مسائل ساده ی دوبعدی بررسی شده، و جریان سیال بدون

که در آن e نشانگر میانگین فاصله بین لبه ی جلویی سکان و پاشنه ی شناور، c متوسط طول وتر، و T آبخور است.

در مقایسه با بررسی سکان به تنهایی، مشاهده می شود که مرکز نیرو در صورت وجود بدنه به جلو خواهد آمد. میزان جلو آمدگی را می توان چنین تقریب زد:

$$\Delta x = \frac{0.3T}{\frac{c}{T} + 0.46} \quad (39)$$

اثر دیگری که بدنه بر سکان می گذارد «تغییر زاویه ی مؤثر سکان» است. برای زاویه ی دریافت غیر صفر (جهت مثبت به سمت پورت، محل اندازه گیری در مقطع میانی) که با V نشان داده می شود و سرعت زاویه یی یا r نشان داده می شود (جهت مثبت در جهت عقربه های ساعت)، بدنه جهت جریان را در جلوی سکان تغییر می دهد. بدون اثر بدنه سرعت جریان عرضی در محل سکان برابر خواهد بود با:

$$v_R = -(v + x_R \cdot r) \quad (40)$$

که در آن x_R فاصله ی سکان تا مقطع میانی شناور است. اثر بدنه را می توان مطابق رابطه ی تجربی ۴۱ بیان کرد: [۱۴]

$$v_R = -(0.36v + 0.66x_R \cdot r) \quad (41)$$

و با استفاده از آن زاویه ی برخورد جریان به سکان را اصلاح کرد. اگر زاویه ی سکان را δ در نظر بگیریم (جهت مثبت به سمت پورت) داریم:

$$\alpha = \delta + \tan^{-1} \frac{V_R}{V_{corr}} \quad (42)$$

۸. روش مدل سازی

مدل سازی عددی حرکت شناور مستلزم حل مجموعه یی از معادلات پیچیده است. راه حل مرسوم در این زمینه، شکستن مسئله به زیرمسئله های کوچک تر است. اجزای اساسی الگوریتم حل عددی را می توان چنین بیان کرد: [۱۵]

-- شبکه بندی دامنه محاسباتی؛

-- مدل سازی جریان سیال بر اساس حل معادلات ناویر - استوکس و پیوستگی (رابطه ی ۴۳)؛

-- مدل سازی سطح آزاد؛

-- حل معادلات حرکت جسم صلب برای محاسبه ی جابه جایی شناور تحت اثر نیروهای محیطی (روابط ۴۴ و ۴۵).

هر یک از زیرمسئله های بیان شده جزئیات زیادی را شامل می شود، و مسئله ی مهم سازگاری مناسب بخش های مختلف بیان شده است. در شکل ۱ مراحل حل مسئله نشان داده شده است. [۱۵]

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i u_j}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (43)$$

$$\sum F = ma \quad (44)$$

$$\sum M_G = I_G \alpha + \omega \times I_G \omega \quad (45)$$

در روابط ۴۳ تا ۴۵، u نشانگر سرعت، p فشار، F بردار نیرو، m جرم، a شتاب خطی، M_G ممان حول مرکز جرم، I_G ممان اینرسی، و ω سرعت زاویه یی است.

جدول ۱. مراحل معتبرسازی نرم افزار تهیه شده (NUMELS). [۱۶]

عامل مورد بررسی	مسئله‌ی مورد نظر برای معتبرسازی
کوپل فشار و سرعت	حفره عمود
جریان‌های نامتعاد	حفره مایل
معادله‌ی انتقال کسر حجمی	انتقال اسکالر در: ۱. جریان ثابت مایل ۲. جریان برشی
جریان دوفازی	۱. ناپایداری رایلی - تیلور ۲. شکست سد، بدون مانع ۳. تلاطم جریان در مخزن
ایجاد موج و شرط مرزی خروجی	تولید و انتقال امواج ابری
برهمکنش سازه و سیال (صفر درجه آزادی)	۱. تلاطم در مخزن همراه با نوسان ۲. مقاومت شناور با فرم بدنه ویگلی ۳. خروج سیلندر از آب
برهمکنش سازه و سیال (شش درجه آزادی)	۱. اسلمینگ تیغه ۲. اسلمینگ سیلندر ۳. مانور و مقاومت بارچ ۴. مانور و مقاومت تریماران

جدول ۲. مشخصات سکان مدل سازی شده برای بررسی ضرایب لیفت درگ.

نوع مقطع	ضریب منطری	نسبت taper	زاویه‌ی سوئپ	شکل لبه
NACA۰۰۱۵	۳	۰٫۴۵	۰	مربعی (گوشه‌ها منحنی نیست)

جدول ۳. مشخصات سکان مدل سازی شده برای بررسی اثر پروانه.

نوع مقطع	ضریب منطری	t/c	شکل لبه
NACA۰۰۲۰	۳	۰٫۲	مربعی

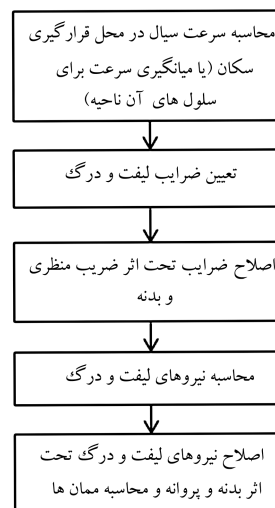
جدول ۴. حالت‌های مختلف کارکرد پروانه برای بررسی اثر پروانه بر عملکرد سکان.

حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
KT/J۲	۲٫۳	۰٫۸۸
J	۰٫۳۶	۰٫۹۴

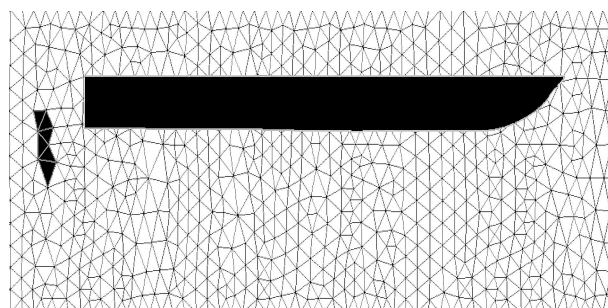
می‌یابد و در زاویه‌های بزرگ سکان خطا بیشینه می‌شود. اما در این حالت نیز در زاویه‌ی ۲۵ درجه، روش دوم بیشترین خطا (در حدود ۱۵٪) را دارد. لازم به ذکر است که در زاویه‌ی صفر درجه‌ی ضریب درگ صفر نیست.

۲.۹. اثر پروانه

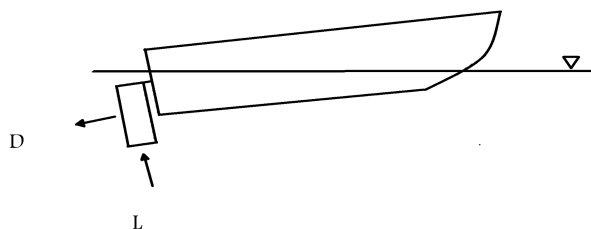
در این قسمت با فرض این که پروانه قبل از سکان قرار گرفته است، اثر آن بر ضریب لیفت و درگ سکان بررسی شده است. برای این کار از داده‌های تجربی [۸] مربوط به یک سکان (جدول ۳) استفاده شد که در سه حالت کارکرد پروانه آزموده شده است (جدول ۴). در شکل‌های ۸ تا ۱۳ سه نمودار مشاهده می‌شود که یکی مربوط به داده‌های تجربی است، یکی مربوط به شبیه‌سازی اثر پروانه بر سکان، و دیگری



شکل ۳. نحوه‌ی مدل کردن سکان.



شکل ۴. شکل شماتیک برای نشان دادن المان‌های مورد استفاده برای شبیه سازی سکان.



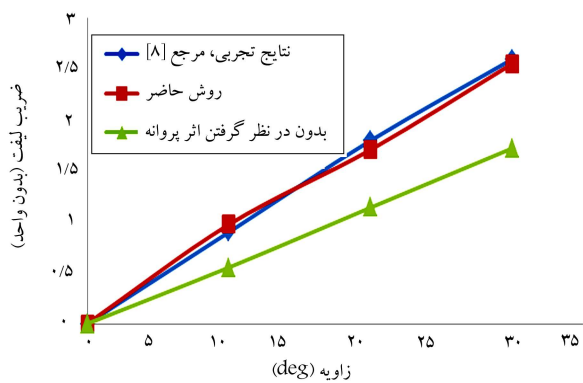
شکل ۵. نیروهای وارد بر شناور از طرف سکان.

حضور جسم صلب حل شده است. در انتها نیز مانور شناور شبیه سازی شده است.

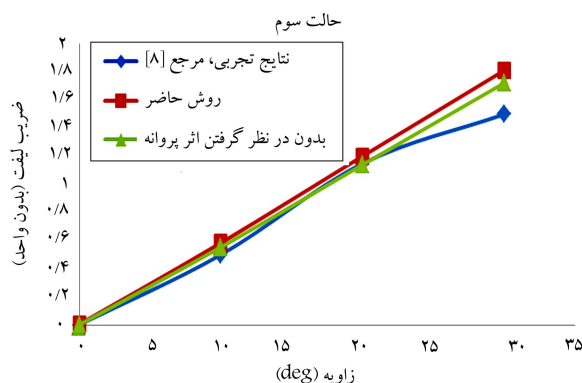
۹. نتایج عددی

۹.۱. ضریب درگ و لیفت

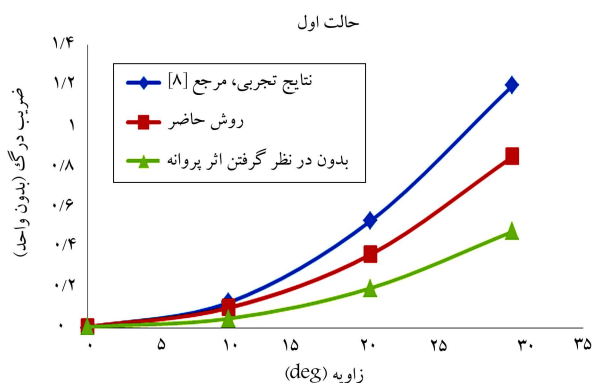
در این قسمت ضریب لیفت و درگ سکان بررسی می‌شود. مشخصات سکان مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود روش‌های مدل سازی ارائه شده به خوبی ضریب لیفت را پیش بینی می‌کنند و همخوانی بسیار مناسبی با داده‌های تجربی [۸] دارند (شکل‌های ۶ و ۷). مشاهده می‌شود که در مورد ضریب درگ دقت مدل سازی روش‌ها نسبت به حالتی که ضریب لیفت مدل می‌شد کاهش



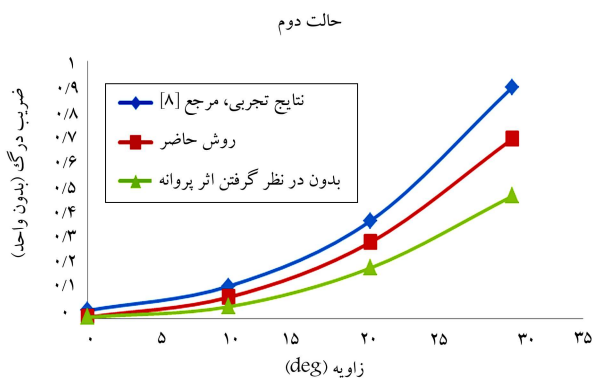
شکل ۹. تأثیر پروانه بر ضریب لیفت سکان در حالت دوم کارکرد پروانه.



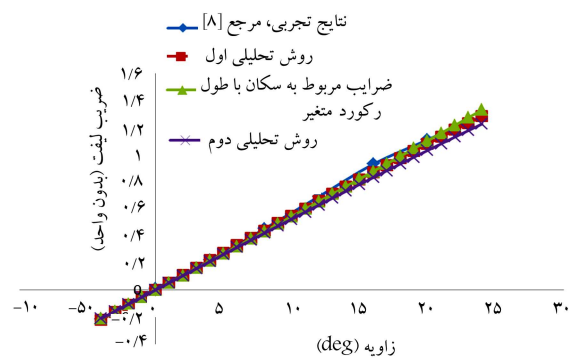
شکل ۱۰. تأثیر پروانه بر ضریب لیفت سکان در حالت سوم کارکرد پروانه.



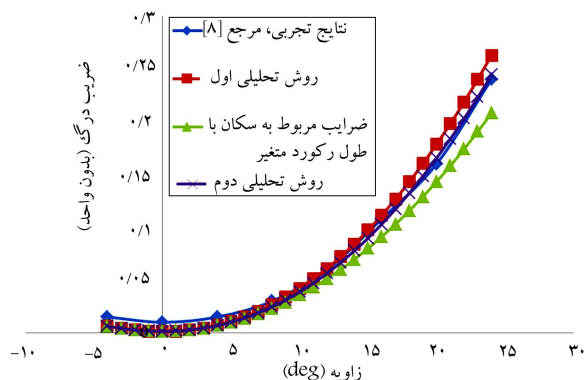
شکل ۱۱. تأثیر پروانه بر ضریب درگ سکان در حالت اول کارکرد پروانه.



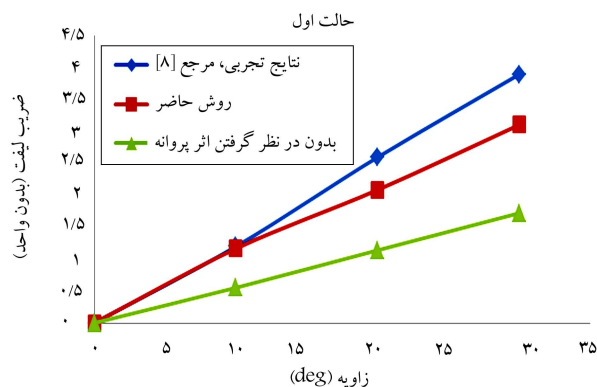
شکل ۱۲. تأثیر پروانه بر ضریب درگ سکان در حالت دوم کارکرد پروانه.



شکل ۶. مقایسه‌ی ضریب لیفت پیش‌بینی شده در روش‌های ارائه شده با نتایج تجربی.



شکل ۷. مقایسه‌ی ضریب درگ پیش‌بینی شده در روش‌های ارائه شده با نتایج تجربی.

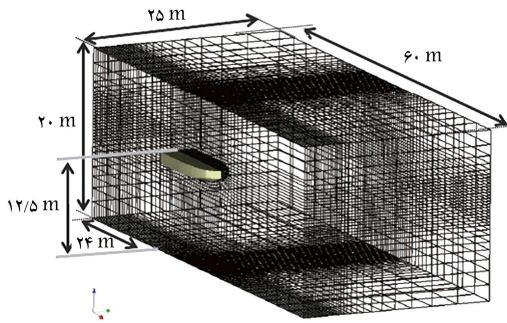


شکل ۸. تأثیر پروانه بر ضریب لیفت سکان در حالت اول کارکرد پروانه.

ضریب لیفت یا درگ سکان را در حالتی نشان می‌دهد که اثر پروانه در نظر گرفته نشود. مشاهده می‌شود که در نظر نگرفتن اثر پروانه، خطای زیادی (تا ۵۰٪) ایجاد می‌کند. با افزایش زاویه‌ی سکان خطای شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. روش مذکور در زوایای بزرگ دارای حداکثر ۲۵٪ درصد خطاست و این یعنی ۲۵٪ نسبت به حالتی که پروانه مدل نشود خطا را کاهش می‌دهد. با مقایسه‌ی سه حالت مختلف کارکرد پروانه مشاهده می‌شود که هرچه پروانه تراست بیشتری تولید کند ضریب لیفت و درگ سکان بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. علت آن است که در این حالت پروانه بیشترین تغییر را در جریان ورودی به سکان ایجاد می‌کند.

جدول ۶. مشخصات دامنه.

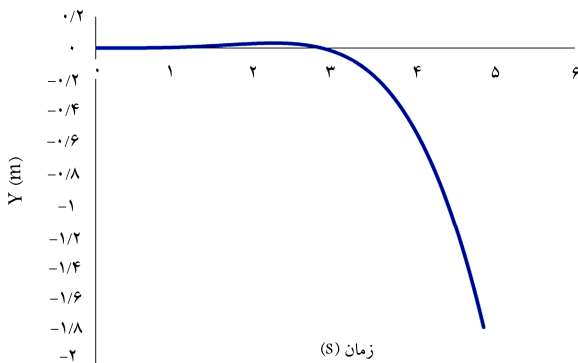
مشخصه	اندازه
طول (متر)	۶۰
عرض (متر)	۵۰
ارتفاع (متر)	۲۰
تعداد سائول	۱۲۹۰۴۴
تعداد وجه	۳۹۶۰۰۴
تعداد گره	۱۳۸۰۳۹



شکل ۱۵. دامنه‌ی در نظر گرفته شده. [۱۶]

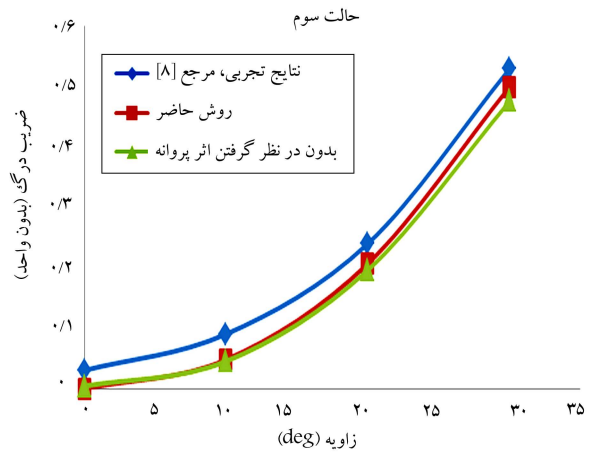
جدول ۷. مشخصات هریک از سکان‌های شبیه سازی شده.

مشخصه	اندازه
طول کورد (متر)	۰٫۲
اسپن (متر)	۰٫۵
موقعیت طولی (متر)	۱ متر بعد از پاشنه
موقعیت عرضی (متر)	۱٫۵ متر از وسط به سمت پورت و استاربود
موقعیت عمودی (متر)	۰٫۲۵ متر بالاتر از کف
زاویه (درجه)	۲۰

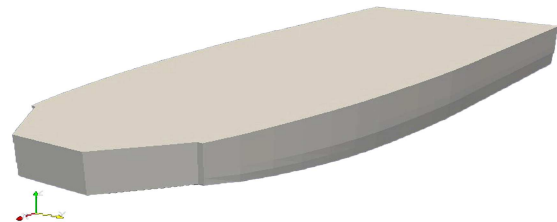


شکل ۱۶. منحنی جابه جایی عرضی مرکز جرم بر حسب زمان با وجود سکان.

که زوایای رول، پیچ و یاو نیز افزایش می یابند، و این ناشی از افزایش ممان هاست (شکل های ۲۲ و ۲۳). دلیل افزایش ممان ها این است که سرعت شناور با گذر زمان افزایش می یابد (شکل ۲۴). زاویه ی پیچ شناور در ابتدا به شدت افزایش می یابد و با رسیدن به مرحله ی پلن ادامه می یابد، سپس ثابت می ماند و با عبور از این مرحله روند صعودی پیدا می کند. نیروها و ممان ها بعد از پلن همراه با مقداری نوسان افزایش می یابند.



شکل ۱۳. تأثیر پروانه بر ضریب درگ سکان در حالت سوم کارکرد پروانه.



شکل ۱۴. شناور شبیه سازی شده.

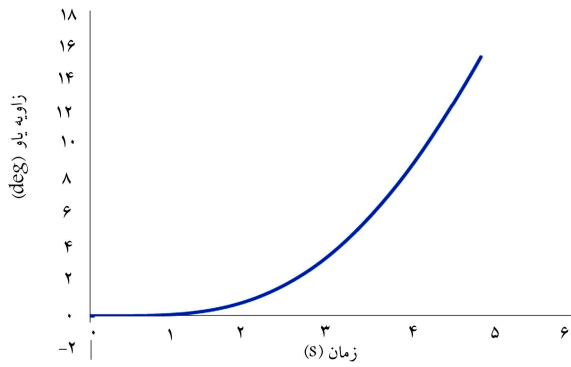
جدول ۵. مشخصات شناور شبیه سازی شده.

مشخصه	اندازه
طول (متر)	۱۲٫۳
عرض (متر)	۴٫۶
آبخور (متر)	۰٫۹۵
جرم (kg)	۱۷۸۵۰
ممان اینرسی $(kg \cdot m^2)$: XX, YY, ZZ	۵۳۲۲۴، ۲۹۵۹۶۷، ۳۲۵۵۶۳
موقعیت طولی مرکز جرم (متر)	۳٫۸۱ از پاشنه
ارتفاع مرکز جرم (متر)	۰٫۴۵ از کف
C_B	۰٫۳۳

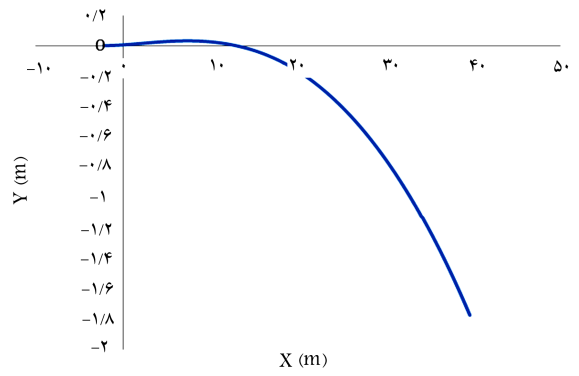
۳.۹. شبیه سازی شناور

شناور مورد استفاده یک شناور دو بدنه بوده (شکل ۱۴)، که مشخصات آن در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین مشخصات دامنه در جدول ۶ آورده شده است. در شکل ۱۵ دامنه‌ی مورد نظر برای حل نشان داده شده است. شناور تحت اثر نیروی ۸۰ کیلو نیوتنی که ۰٫۲۵ متر بالاتر از مرکز جرم قرار می گیرد، قرار گرفته است. دو سکان که مشخصات آن‌ها در جدول ۷ آورده شده، سبب مانور شناور می شوند.

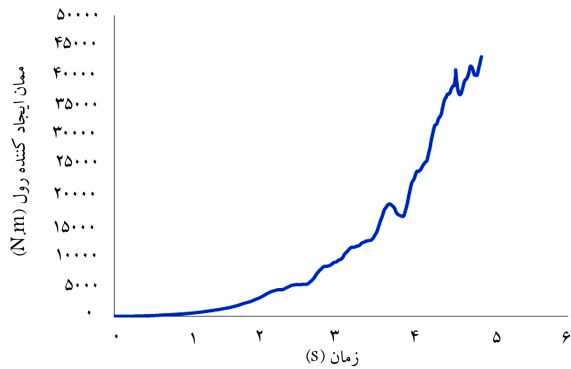
در شکل ۱۶ جابه جایی عرضی مرکز جرم بر حسب زمان، و در شکل ۱۷ مکان هندسی مرکز جرم در صفحه‌ی X-Y نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش زمان سرعت عرضی شناور زیاد شده و این به دلیل افزایش نیروی عرضی ایجاد شده است (شکل ۱۸). با توجه به شکل های ۱۹ تا ۲۱، مشاهده می شود



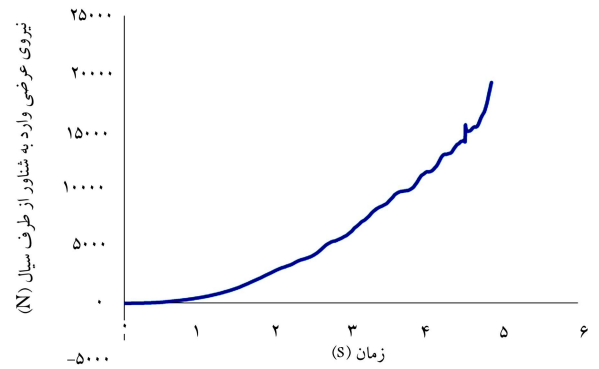
شکل ۲۱. منحنی زاویه یار برحسب زمان با وجود سکان.



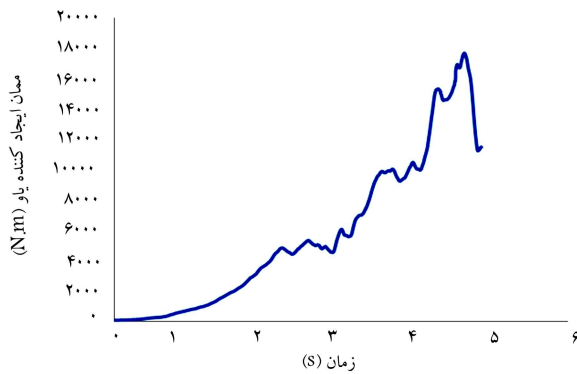
شکل ۱۷. مکان هندسی مرکز جرم در دو بعد x و y با وجود سکان.



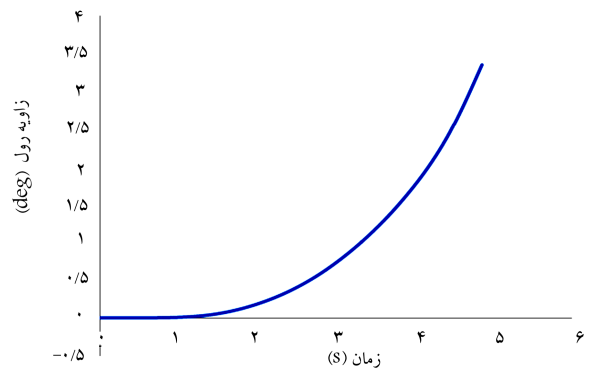
شکل ۲۲. منحنی ممان ایجادکننده رول برحسب زمان با وجود سکان.



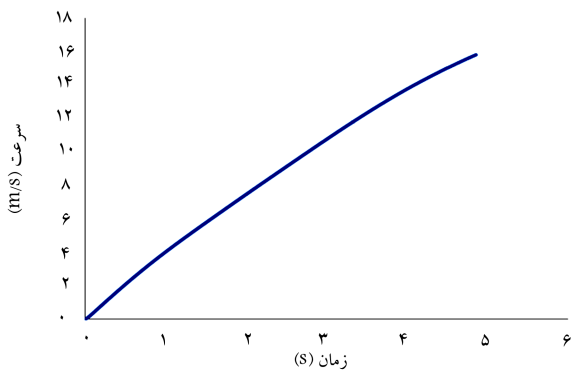
شکل ۱۸. منحنی نیروی عرضی وارد بر شناور برحسب زمان با وجود سکان.



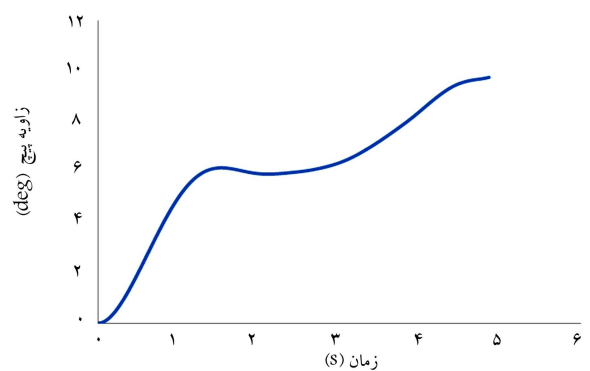
شکل ۲۳. منحنی ممان ایجادکننده یار برحسب زمان با وجود سکان.



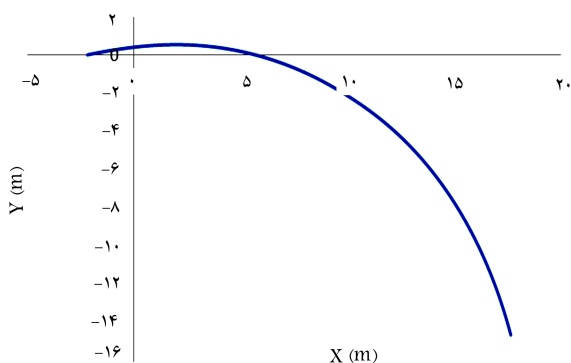
شکل ۱۹. منحنی زاویه رول برحسب زمان با وجود سکان.



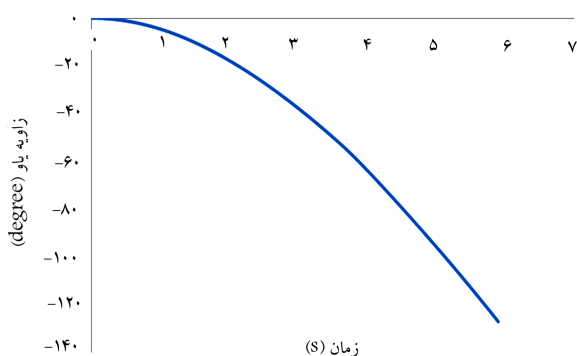
شکل ۲۴. منحنی سرعت شناور برحسب زمان با وجود سکان.



شکل ۲۰. منحنی زاویه پیچ برحسب زمان با وجود سکان.



شکل ۲۶. موقعیت هندسی مرکز جرم تحت اثر سکان و پروانه.



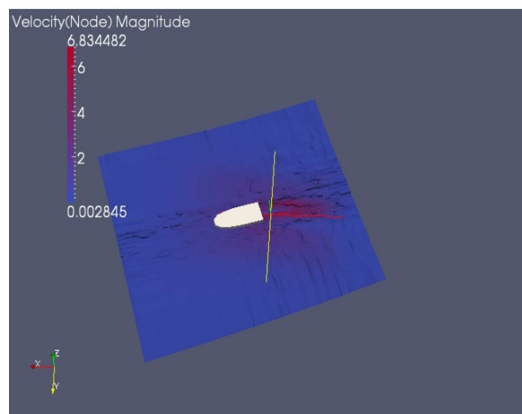
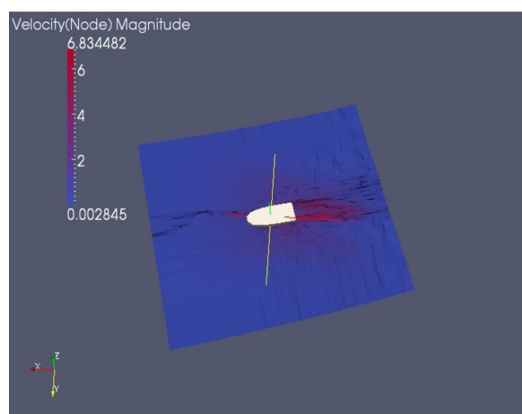
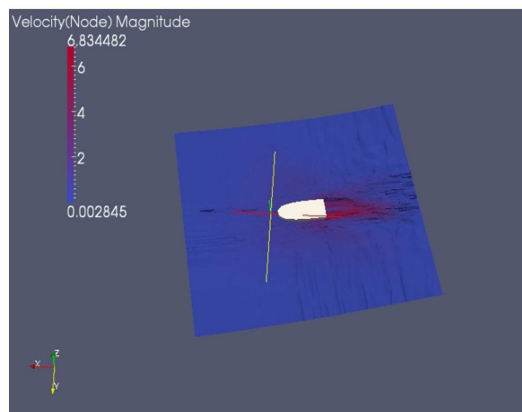
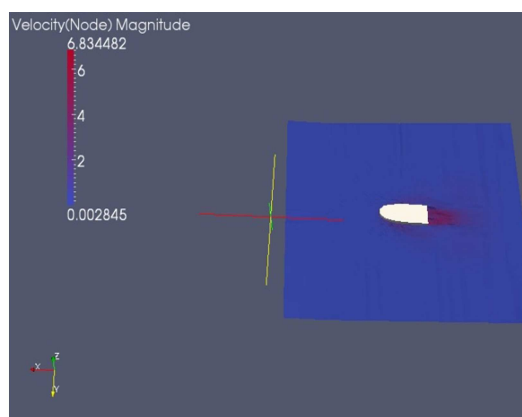
شکل ۲۷. منحنی زاویه یابو برحسب زمان تحت اثر سکان و پروانه.

جدول ۸. مشخصات پروانه های مورد استفاده.

مشخصه	اندازه
قطر (متر)	۰٫۶
دوران (دور بر ثانیه)	۳۰
تعداد پره	۴
EAR	۰٫۷۰
P/D	۱٫۴
موقعیت طولی (متر)	۰٫۵ متر بعد از پاشنه
موقعیت عرضی (متر)	۱٫۵ متر از وسط
موقعیت عمودی (متر)	۰٫۲۵ متر بالاتر از کف
نوع	Wageningen, B۴-۷۰
زاویه ی شفت (درجه)	۵

در شکل ۲۵ نحوه ی دورزدن شناور تحت اثر سکان در زمان های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ ثانیه نشان داده شده است. مشاهده می شود که تحت اثر این مانور جریان پشت شناور دچار به هم ریختگی می شود. گفتنی است که چون سرعت شناور با گذشت زمان افزایش می یابد، این پدیده تشدید می شود.

در شکل های ۲۶ و ۲۷ موقعیت مرکز جرم شناور و زاویه یابو شناور، برای حالتی که پروانه و سکان به طور همزمان شبیه سازی شده اند، نشان داده شده است. مشاهده می شود که پروانه سرعت جریان ورودی به سکان را به شدت افزایش می دهد و لذا زاویه و مرکز جرم به شدت تغییر می کنند. مشخصات پروانه های مورد نظر در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۲۵. نحوه ی دورزدن شناور تحت اثر سکان در زمان های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ ثانیه.

و لیفت را تخمین می‌زنند. مطالعه‌ی موردی بر روی شناور دو بدنه نشان داد که می‌توان از این روش برای مدل‌سازی اثر سکان استفاده کرد. به این ترتیب می‌توان تنها با ایجاد شبکه برای بدنه‌ی شناور اثر چندین سکان را بررسی کرد، و علاوه بر مطالعه‌ی اثر هر سکان بر شناور مورد بحث سکان مناسب را نیز پیدا کرد. با استفاده از روش مشابهی که برای سکان ارائه شد می‌توان اثر سایر ملحقات مانند تریم تب، هیدروفویل و اینترسپتور را بدون ایجاد شبکه برای هر یک از آنها و تنها با استفاده از شبکه‌بندی بدنه بررسی کرد. بررسی اثر پروانه نیز به این روش ممکن است اما باید از ضرایب تصحیح برای اصلاح تراست استفاده شود.

شبیه‌سازی سکان را می‌توان با ایجاد شبکه، هم برای شناور و هم برای سکان، انجام داد. اما استفاده از این روش سبب می‌شود به دلیل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی، سرعت حل کاهش یابد. علاوه بر آن ایجاد شبکه در حالتی که سکان وجود دارد فرایندی پیچیده است. در این حالت می‌توان به عنوان روش دیگر، تنها با ایجاد شبکه برای بدنه‌ی شناور و حل دامنه‌ی سیالاتی نیروهای لیفت و درگ سکان را به دست آورد. دقت این روش وابسته به دقت روابطی است که نیروهای درگ

پانوشت‌ها

1. Head Guide
2. Horn

منابع (References)

1. Han, J.-M., Kong, D.-S. and Song, I.-H. "Analysis of the cavitating flow around the horn-type rudder in the race of a propeller", CAV2001:sessionB9.005 (2001).
2. Lücke, T. and Streckwall, H. "Cavitation research on a very large semi spade rudder", First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway (June 2009).
3. Ghassemi, H. and Iranmanesh, M. "Comparison of hydrodynamic characteristics on two ship propulsors (prs and azipod)", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, **32**(B4), pp 401-413 (2008).
4. Szantyr, J.A. "Dynamic interaction of the cavitatin propeller tip vortex with the rudder", *Polish Maritime Research*, **14**, pp. 10-14 (2007).
5. Özdemir, Y.H., Bayrakta, S. and Yilmaz, T. "Flowfield analysis of a rudder by using computational fluid dynamics", 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09) (13-15 May 2009).
6. Chau, S.-W., Kouh, J.-S., Wong, T.-H. and Chen, Y.-J. "Investigation of hydrodynamic performance of high-speed craft rudders via turbulent flow computations, part i: Non-cavitating characteristics", *Journal of Marine Science and Technology*, **13**(1), pp. 61-72 (2005).
7. Bertram, V., *Practical Ship Hydrodynamics*, Butterworth-Heinemann (2000).
8. Molland, A.F. and Turnock, S.R., *Marine Rudders and Control Surfaces*, Butterworth-Heinemann (2007).
9. Marine Propulsion, Janes Information Group (1998).
10. Soding, H. "Prediction of ship steering capabilities", *Schiffstechnik*, **29**(1), pp. 3-29 (1982).
11. Soding, H. "Krafte am ruder", *Handbuch der Werften XVIII*, Hansa-Verlag, pp. 47-56 (1986).
12. Soding, H. "Limits of potential theory in rudder flow predictions", *Ship Technology Research*, **45**, pp. 141-155 (1998).
13. Soding, H. "Limits of potential theory in rudder flow predictions", *Symp. Naval Hydrodynamics, Washington*, **22**, pp. 622-637 (1998).
14. Kose, K. "On the new mathematical model of manoeuvring motions of a ship and applications", *Int. Shipb. Progr.*, **29**, pp. 205-220 (1982).
15. Jahanbakhsh, E. "Ship maneuver modeling by CFD", Msc thesis, Energy Conversion, Sharif University of Technology (2005).
16. Jahanbakhsh, E., Panahi, R. and Seif, M.S. "Catamaran motion simulation based on moving grid technique", *Journal of Marine Science and Technology*, **17**(2), pp. 128-136 (2009).