J. Energy Conversion
Volume: 10, Issue: 4, 2024: 43-57

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۰، شماره ۴، زمستان۱۴۰۲، ص: ۴۳-۵۷

بررسی اثرات هیدرودینامیکی سطح آزاد و بستر آب بر جریان حول یک هندسه مستطیلی غوطه ور به روش حجم سیال

مهدی نوروزی[۱و*]، سیده زهره آیت اللهی[۲]

*۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی لارستان norozi347@yahoo.com
۲- دانش‌آموخته گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی لارستان ayatollahi.Z10@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

چکیده

در این پژوهش، رفتار هیدرودینامیکی جریان حول یک هندسه مستطیلی غوطه‌ور در نزدیکی بستر و سطح آزاد آب مورد بررسی قرار گرفته است. این تحلیل، به کمک نرم افزار فلوئنت و با استفاده از روش چند فازی حجم سیال (VOF) انجام گرفته و برای شبیه سازی آشفتگی از مدل استاندارد $k-\varepsilon$ استفاده شده است. پس از بررسی استقلال حل از فضای محاسباتی و نیز تعداد شبکه، در ابتدا اثرات تغییر عمق هندسه‌ی غوطه‌ور در آب از سطح آزاد و نیز تغییر سرعت جریان سیال بر شکل موج سطح آزاد و ضرایب هیدرودینامیکی بررسی شده و ادامه، اثرات نزدیک کردن این هندسه به کف مورد ارزیابی قرار گرفته است. این شبیه‌سازی، در محدوده سرعت بین۲۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه و در عمق غوطه‌وری (فاصله از سطح آزاد) بین ۱ تا ۲۸ برابر ضخامت پرتابه مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد با دور شدن صفحه مستطیلی غوطه‌ور از سطح آزاد (افزایش عمق) در یک سرعت مشخص سیال، ضریب پسا و برآی منفی افزایش و در مقابل، با افزایش سرعت سیال در یک عمق مشخص از سطح، عملکرد هیدرودینامیکی سیستم افزایش می‌یابد. همچنین با نزدیک شدن هندسه به بستر (کف) آب، ضریب برآ تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد در حالی که در ضریب پسا تغییر قابل توجهی ایجاد نمی‌شود. به علاوه، در یک عمق مشخص از کف، با افزایش سرعت سیال، عملکرد هیدرودینامیکی به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش و ضریب پسا به دلیل توسعه منطقه ویک و ایجاد کاویتی بر روی سطح پرتابه تا حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.

***عهده‌دار مکاتبات** : norozi347@yahoo.com

کلمات کلیدی: هندسه مستطیلی غوطه‌ور، اثر سطح آزاد، اثر کف، روش حجم سیال

نحوه استناد به این مقاله: مهدی نوروزی، سیده زهره آیت اللهی. بررسی اثرات هیدرودینامیکی سطح آزاد و بستر آب بر جریان حول یک هندسه مستطیلی غوطه ور به روش حجم سیال.
مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۲; ۱۰ (۴) : ۴۳-۵۷.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

جریان روی پرتابه‌ها در نزدیک سطح آزاد آب و نیز اثرات نزدیک شدن پرتابه‌ها به کف آب، دارای مشخصات و خواص ویژه‌ای هستند که با توجه به کاربرد آن در حوزه‌های مختلف نظامی، حمل‌ونقل و گردشگری، به عنوان دو جریان پایه مورد توجه پژوهش‌گران قرار دارد. کاربرد روزافزون استفاده از اجسام پرنده زیرسطحی در نواحی ساحلی جهت جستجو، اندازه‌گیری، اکتشاف و کاربردهای خاص نظامی، اهمیت توجه به این پدیده را در پژوهش‌های علمی دوچندان نموده است. در این پژوهش-ها، اثرات سطح آزاد و کف بستر آب بر جریان حول پرتابه و نیز ضرایب هیدرودینامیکی تولید شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که جسم پرنده‌ای در نزدیکی سطح (در در مجاورت سطح آزاد آب و چه در نزدیکی کف) قرار می‌گیرد در ضرایب هیدرودینامیکی تغییراتی حاصل می شود که می‌تواند به افزایش کارآیی جسم پرنده کمک کند؛ لذا مطالعه جسم پرنده در نزدیک سطح از این منظر حائز اهمیت بوده و توجه و تحقیق بسیاری از پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. جریان حول زیردریایی‌ها و اژدرها در نزدیکی سطح آزاد و کف آب و هم‌چنین جریان حول هواپیماها در نشست و برخاست از زمین، سازه-های دریایی در حوزه نفت و حتی حرکت پرندگان و حشرات از نمونه‌های کاربردی این دو جریان می‌باشند[۱و۲]. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه توسط پژوهش گران مختلف انجام شده است. چن و همکاران[۳] اثرات سطح آزاد را بر جریان حول یک صفحه تخت در دو شرایط پروازی مختلف مورد برررسی قرار دادند. آنها در این شبیه‌سازی دوبعدی، از روش لتیس-ورتکس استفاده نموده و اثر افزایش نیروی برآ ناشی از اثرات سطح را گزارش نمودند. نوهیت و همکاران[۴] نیز از همین روش برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان حول یک بال با نسبت منظری محدود در نزدیکی سطح استفاده نمودند. نیشینو و همکاران [۵و۶] در زمینه جریان روی استوانه در نزدیکی سطح مطالعاتی را انجام داده و پس از بررسی‌های تجربی، دقت مدل‌های مختلف توربولنسی در پیش‌بینی جریان حول استوانه نزدیک سطح را برای اجسام استوانه‌ای و نیز اجسام با پیشانی ضخیم مورد ارزیابی قرار دادند. ماتسوزاکی و همکاران[۷] جریان نزدیک سطح حول یک ایرفویل خاص را در یک تونل باد در شرایط ناپایا آزمایش نمودند. تمرکز این پژوهش، اثرات سرعت القایی ناشی از اثرات سطح بر مشخصه‌های جریان بود. در ادامه، یانگ و همکاران[۸] اثر دمش جریان هوا بر مشخصه های هیدرودینامیکی یک بال در نزدیکی سطح آزاد را به صورت عددی و با حل معادلات ناویر-استوکس بررسی نمودند. جاگادیش و همکاران[۹] مدل های آشفتگی مختلف را جهت شبیه‌سازی جریان زیرسطحی نزدیک سطح برای یک هندسه متقارن محوری بررسی نمودند. بررسی آنها نشان داد که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ضرایب هیدرودینامیکی معتبرتری را نسبت به سایر مدل های آشفتگی ارائه می دهد. دویگ و باربر[۱۰]، اثر فاصله بال یک ماشین مسابقه‌ای از سطح زمین بر عملکرد آیرودینامیکی آن را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار دادند. منصوری‌زاده و جوانمرد[۱۱] اثر سطح آزاد بر ضرایب برآ و پسای ایجاد شده حول یک جسم متحرک زیرسطحی در سرعت‌های مختلف را بررسی نمودند. توزیع ضریب فشار بر روی بدنه جسم متحرک در سرعت ها و ارتفعات مختلف از سطح آزاد از نتایج این شبیه سازی بود. نعمت اللهی و همکاران[۱۲] با شبیه‌سازی جریان حول یک جسم نزدیک سطح آزاد به روش VOF نشان دادند که کاهش عمق غوطه وری جسم منجر به کاهش ضریب پسا می‌شود. بن‌حمزه و همکاران[۱۳] به روش VOF و با استفاده از مدل توربولنسی k- ε جریان ناپایای حول یک مانع در نزدیکی سطح را شبیه‌سازی نمودند و تاثیر سطح آزاد را بر شکل موج و گردابه‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین بوسکاس و همکاران[۱۴] نتایج حاصل از شبیه سازی اثرات سطح آزاد حول یک استوانه سرتخت را با نتایج حاصل از شبیه سازی اثرات سطح آزاد حول یک صفحه با ضخامت کم را با هم مقایسه کردند. لو و همکاران [۱۵] جریان سطح آزاد عبوری از هندسه های مختلف غوطه ور در نزدیکی سطح آزاد را با استفاده ار تکنیک های ردیابی سطح شبیه سازی نمودند و تغییرات پروفیل موج را به صورت دوبعدی و ناپایا مورد بررسی قرار دادند. ملتانی و همکاران[۱۶] به روش المان مرزی، اثر یک سطح کنترل عمودی را بر موج و مشخصه‌های هیدرودینامیکی یک جسم نزدیک به سطح مدل‌سازی نمودند. آنها اثر سطح کنترل عمودی را بر ارتفاع و مقاومت موجی به صورت کمی بررسی نمودند. از آنجایی که تحلیل سه بعدی این جریان دارای هزینه محاسباتی فراوانی است، لذا علاقه پژوهش‌گران بر این است که تا حد امکان جریان سطح آزاد را به صورت دوبعدی شبیه سازی کنند. با توجه به اهمیت پدیده اثر سطح و کف و گسترش

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

آن‌ها در حوزه‌های مختلف اعم از نظامی، حمل‌ونقل و گردشگری، بررسی تأثیر شرایط مختلف جریان و هندسه بر روی این پدیده لازم به نظر می‌آید.

در پژوهش حاضر، پس از حل عددی جریان مغشوش حول یک پرتابه تخت ضخیم نزدیک سطح در رینولدزهای مختلف (سرعت‌های مختلف) و اطمینان از همگرایی و استقلال از شبکه‌بندی و حوزه‌ی حل، اثرات تغییر عمق استوانه از سطح آب، بر موج ایجاد شده روی سطح آب و نیز اثر تغییر فاصله بر تغییر ضرایب هیدرودینامیکی پسا و برآ حول استوانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین اثر تغییر ارتفاع پرتابه از کف بر این ضرایب بررسی شده است. با توجه به وجود اثرات سطح آزاد در حد فاصل بین آب و هوا و نیز جریان دوفاز حول پرتابه در این شرایط، از روش چند فازی VOF استفاده شده است و برای شبیه سازی آشفتگی‌های جریان از مدل k- ε استاندارد استفاده شده است.

۲. استخراج معادلات، تئوری حل و شرایط حل عددی

برای تحلیل حاضر، از معادلات ناویر-استوکس رینولدز متوسط برای یک سیال نیوتنی، تراکم ناپذیر استفاده شده است. جریان آشفته است و برای شبیه سازی آشفتگی جریان از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. معادله بقای جرم و بقای مومنتوم در راستای x و y به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\theta U)+\frac{\partial}{\partial x}(\theta V)=0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial (UU)}{\partial x}+\frac{\partial (VU)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[2(v+v_t)\frac{\partial U}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[(v+v_t)(\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial U}{\partial y}\right]-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial (UV)}{\partial x}+\frac{\partial (VV)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial y}\left[2(v+v_t)\frac{\partial V}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial x}\left[(v+v_t)(\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial U}{\partial y}\right]-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y}+g \quad (۳)$$

که در آن θ پارامتر سلول جزئی مستقل از زمان است و بسته به اینکه نقطه مورد نظر درون جسم و یا در درون سیال است، به ترتیب یکی از مقادیر ۰ یا ۱ را به خود می‌گیرد. x و y به ترتیب مختصات افقی و عمودی سیستم و U و V مولفه های سرعت هستند. P فشار متوسط است؛ v لزجت سینماتیکی و v_t لزجت سینماتیکی مغشوش می باشد [۱۷].

مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد نیز در قالب دو رابطه معادله انرژی جنبشی آشفته (k) و اتلاف انرژی جنبشی (ε) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial (Uk)}{\partial x}+\frac{\partial (Vk)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{v+v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{v+v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right]+G-\varepsilon \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial (U\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial (V\varepsilon)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{v+v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{v+v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right]+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}G-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۵)$$

که در آن:

$$v_t=C\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۶)$$

$$G=v_t\left[\left(\frac{\partial U}{\partial y}+\frac{\partial V}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2\right] \quad (۷)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

ضرایب تجربی مورد استفاده در روابط (۶) و (۷) بر مبنای مرجع [۱۸] می باشد. بررسی مدل‌های مختلف آشفتگی در مرجع [۹] جهت شبیه‌سازی جریان حول اجسام غوطه‌ور نزدیک به سطح نشان می‌دهد که مدل دومعادله‌ای $k-\varepsilon$ ضرایب هیدرودینامیکی معتبرتری را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی ارائه می‌دهد. از این مدل آشفتگی در مراجع [۱۳-۱۱] نیز استفاده شده است.

در این مقاله، جهت شبیه سازی سطح آزاد از مدل حجم سیال (VOF) استفاده شده است. در روش VOF ، برای هر جزء حجم سلول یک معادله دیفرانسیلی حل می‌شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال، در هر سلول معین می‌گردد. روش‌های توسعه‌یافته بر اساس VOF با توجه به دیدگاه اولری نسبت به میدان جریان، کارایی بیشتری دارند. در تعیین سطح آزاد به روش VOF از یک تابع متغیر به نام F استفاده می‌شود که جزء حجم سیال نامیده می‌شود. شکل این تابع دیفرانسیلی در حالت دوبعدی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\theta F)}{\partial t}+\frac{\partial(\theta UF)}{\partial x}+\frac{\partial(\theta VF)}{\partial y}=0 \qquad (۸)$$

در حل معادله (۸) در سلولی که پر از سیال می‌باشد مقدار F برابر ۱، در سلول خالی از سیال این مقدار برابر صفر و در سلول سطحی این مقدار بین ۰ و ۱ می‌باشد [۱۹].

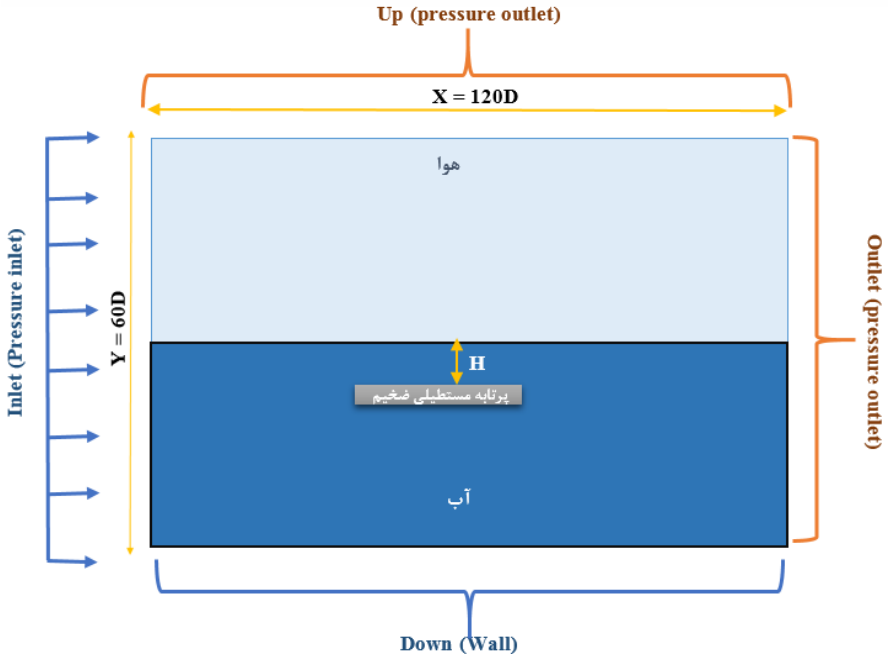
با استفاده نرم افزار فلوئنت و با بهره گیری از تئوری ارایه شده در معادلات (۱) تا (۸)، شبیه سازی عددی جریان بر مبنای طرح کوپل سرعت-فشار $SIMPLE$ انجام گرفته است و گسسته سازی معادلات بقای جرم، مومنتوم و آشفتگی با دقت مرتبه دوم صورت گرفته است.

۳. هندسه مورد بررسی و شرایط حل

هندسه مورد بررسی، مطابق شکل ۱ صفحه تخت ضخیمی به طول ۱۶۰ سانتی متر و به ضخامت ۱۰ سانتی متر و به فاصله H از سطح آب می‌باشد. همان‌گونه که شکل نشان داده شده است، جریان سیال با شرط مرزی فشار ورودی از سمت چپ به صورت عمود بر مرز، وارد فضای محاسباتی می شود و به منظور مشاهده اثرات بستر آب بر خواص هیدرودینامیک تحلیل، مرز زیرین فضای محاسباتی به صورت دیواره جامد در نظر گرفته شده است. هم‌چنین شرط مرزی وجه سمت راست و بالای فضای محاسباتی، فشار خروجی درنظر گرفته شده است. مشخصات هندسی و جریانی مساله مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. به جهت عمومیت بخشی به نتایج تحلیل، ابعاد هندسی مساله با ضخامت پرتابه مستطیلی شکل بی‌بعد شده است. به دلیل وجود گرادیان شدیدتر خواص در نزدیکی سطح آزاد و در مجاورت پرتابه مستطیل شکل ضخیم، شبکه بندی در این قسمت از فضای محاسباتی ریزتر شده است.

استراتژی حل به این صورت است که پس از تولید هندسه و شبکه‌بندی فضای محاسباتی، برای شروع فرایند حل به تمام متغیرهای مساله مقدار اولیه‌ای داده می‌شود و معادلات مومنتوم (۲) و (۳) به صورت عددی حل می‌شود و متغیرهای موجود در آن یعنی U و V به دست آید؛ فشار و سرعت‌های حاصل به نحوی با هم تطبیق می یابند که معادله پیوستگی (۱) با دقت معینی ارضا شود. سپس معادلات آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد یعنی معادلات (۴) و (۵) حل می‌شود و لزجت سینماتیکی مغشوش از رابطه (۶) محاسبه می شود. در ادامه، با استفاده از یک حل تقریبی معادله (۸) حل شده و پس از مشخص شدن تابع حجم سیال F، مرز سطح آزاد ردیابی می‌شود. این روند در تکرارهای مختلف تا ارضای شرط همگرایی ادامه می‌یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱- هندسه مسئله

جدول ۱- مشخصات هندسی و جریانی مساله مورد بررسی

موضوع	اندازه	بدون بعد
ضخامت مستطیل مورد بررسی (D)	۱۰ cm	۱
طول مستطیل مورد بررسی (L)	۱۶۰ cm	۱۶
عرض فضای محاسباتی (Y)	۶۰۰ cm	۶۰
طول فضای محاسباتی (X)	۱۲۰۰ cm	۱۲۰
فاصله سطح بالای مستطیل از سطح آزاد (H)	cm ۱۰،۲۰،۳۰،۲۶،۲۷،۲۸	۱،۲،۳،۲۶،۲۷،۲۸
فاصله مرز پایین تا سطح آزاد	۳۰۰ cm	۳۰
فاصله مرز بالا تا سطح آزاد	۳۰۰ cm	۳۰
فاصله پیشانی مستطیل تا مرز سمت چپ	۴۳۰ cm	۴۳
سرعت جریان ورودی	m/sec ۲۰،۴۴،۵۴،۸۰	-

۴. ارائه نتایج

با توجه به اینکه مبنای ارائه نتایج پژوهش، دو ضریب هیدرودینامیکی پسا و برآ می‌باشد، در ابتدا این دو ضریب به صورت رابطه (۹) و (۱۰) تعریف می شود:

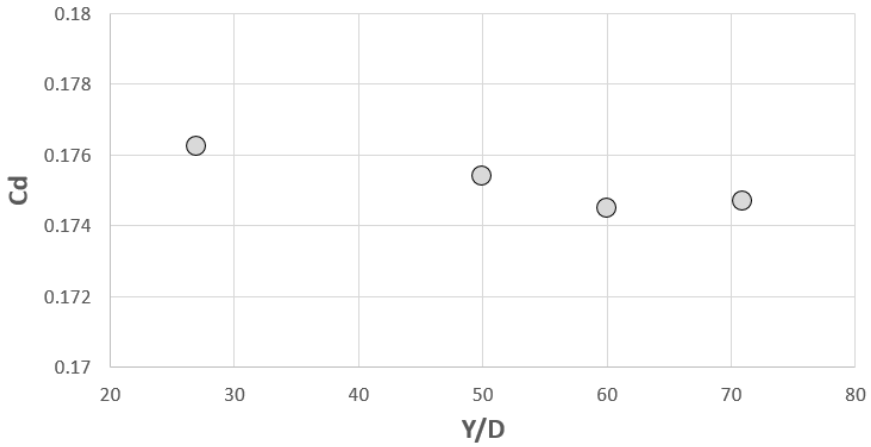
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^2} \quad (۹)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^2} \quad (۱۰)$$

که در این دو رابطه، F_D و F_D به ترتیب نیروی پسا و برآی جسم، ρ چگالی آب، A سطح مقطع در معرض این دو نیرو و U_∞ سرعت ورودی در راستای محور افقی است.

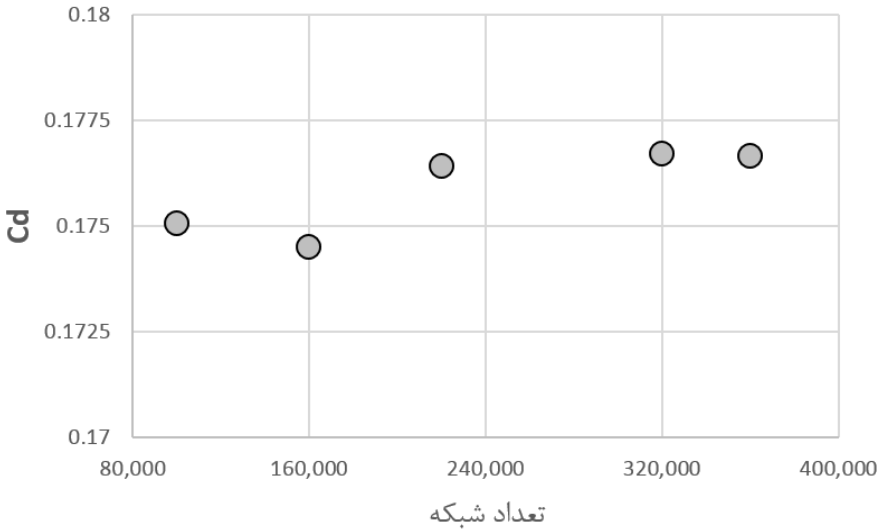
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

جهت اطمینان از صحت این حل عددی، ابتدا می بایست استقلال حل از اندازه فضای محاسباتی و تعداد شبکه‌بندی بررسی شود. بدین منظور، مساله در چهار اندازه مختلفِ فضای محاسباتی حل شده است. مطابق شکل۲، ضریب پسا در نسبت $Y/D = 60$ (D ضخامت مستطیل ضخیم و Y عرض فضای محاسباتی)، مستقل از اندازه فضای محاسباتی شده است و توسعه فضای حل بیش از این مقدار، علاوه بر افزایش هزینه محاسباتی، تاثیری در نتایج حل نخواهد داشت. مطابق شکل ۲، ضریب پسا در $Y/D = 60$ و بالاتر از آن در مقدار تقریبی ۰/۱۷۵ ثابت شده است.



شکل ۲- بررسی استقلال حل از فضای محاسباتی

هم چنین، مطابق شکل ۳، به منظور بررسی استقلال حل از تعداد شبکه‌بندی، این مساله در ۵ اندازه شبکه مختلف و تعداد ۱۰۰۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰۰ شبکه حل شده است. مطابق شکل ۳، شبکه‌بندی با ۱۶۰۰۰۰ مش، تعداد مناسبی برای حل می-باشد و افزودن بیش از این مقدار به تعداد شبکه، علاوه بر افزایش هزینه محاسباتی، خطاهای عددی را نیز افزایش خواهد داد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شبکه‌های ۱۶۰۰۰۰ و بیشتر مقدار ضریب پسا مقداری ثابت و برابر ۰/۱۷۶ می‌باشد.



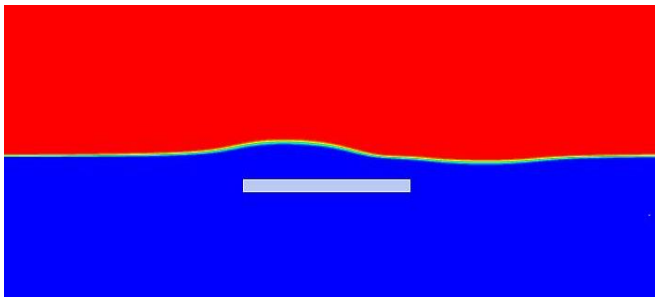
شکل ۳- بررسی استقلال حل از تعداد شبکه

به منظور مشاهده اثر تغییر سرعت پرتابه بر شکل موج ایجاد شده در سطح آزاد آب، در شکل ۴ نمایی از کانتور کسر حجمی هوا در سه سرعت مختلف سیال (۲۰، ۴۴/۵ و ۸۰ متر بر ثانیه) در عمق ثابت $H = 2D = 20\ cm$ ارائه شده است و به منظور مقایسه امواج ایجاد شده، در شکل ۵ نتایج سطح موج در این سه سرعت بر روی یک نمودار نشان داده شده است.

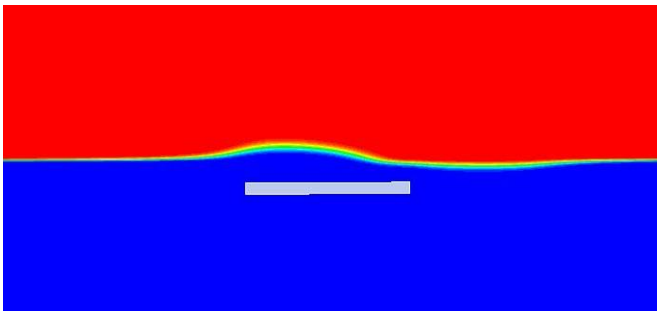
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

همان گونه که شکل ۵ نشان می دهد، با افزایش سرعت جریان، طول موج افزایش یافته است در حالی که در دامنه موج تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد نشده است.

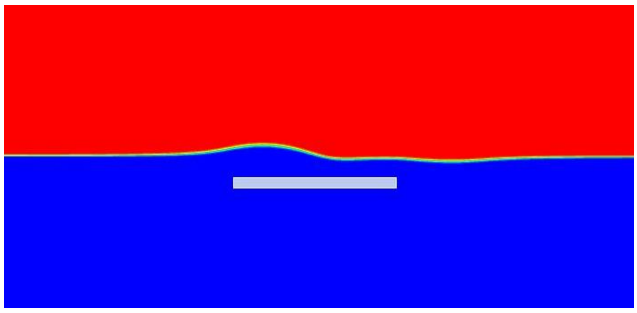
در شکل ۶ و ۷، به ترتیب تغییرات دو ضریب پسا و برآ در سه سرعت مختلف سیال (۲۰، ۴۴/۵ و ۸۰ متر بر ثانیه) و در عمق ثابت $H = 2D = 20\ cm$ ارائه شده است. مطابق شکل۶ با افزایش سرعت سیال از ۲۰ به ۸۰ متر بر ثانیه، ضریب پسای کل و ضریب پسای فشاری در حدود ۱۵درصد کاهش می‌یابد و تغییرات ضریب پسای اصطکاکی در مقابل ضریب پسای کل و فشاری قابل صرف‌نظر است؛ این کاهش ضریب پسا به دلیل متقارن‌تر شدن جریان در سرعت‌های بالاتر است که باعث می شود گرادیان فشار در اطراف صفحه مستطیلی کاهش و درنتیجه ضریب پسای فشاری و ضریب پسای کل کاهش یابد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می شود، سهم بزرگی از ضریب پسای کل مربوط به ضریب پسای فشاری است (حدود ۹۵٪) و ضریب پسای اصطکاکی سهم کمی در ضریب پسای کل دارد (حدود ۵٪). در شکل ۷ نیز مشاهده می شود با افزایش سرعت سیال ضریب برآی منفی (به سمت پایین) کاهش می‌یابد و در سرعت‌های بالاتر به صفر نزدیک می‌شود. با بررسی عددی نتایج حاصل، در مجموع می توان گفت با افزایش سرعت سیال نسبت این دو ضریب هیدرودینامیکی یعنی C_l/C_D کاهش می‌یابد. این نسبت ضرایب یکی از فاکتورهای مهم بررسی عملکرد پرنده ها می‌باشد. به عنوان جمع بندی می توان گفت با افزایش سرعت سیال در یک عمق مشخص از سطح آزاد، عملکرد هیدرودینامیکی پرتابه کاهش یافته است.



الف) $U_\infty = 20\ m/sec$



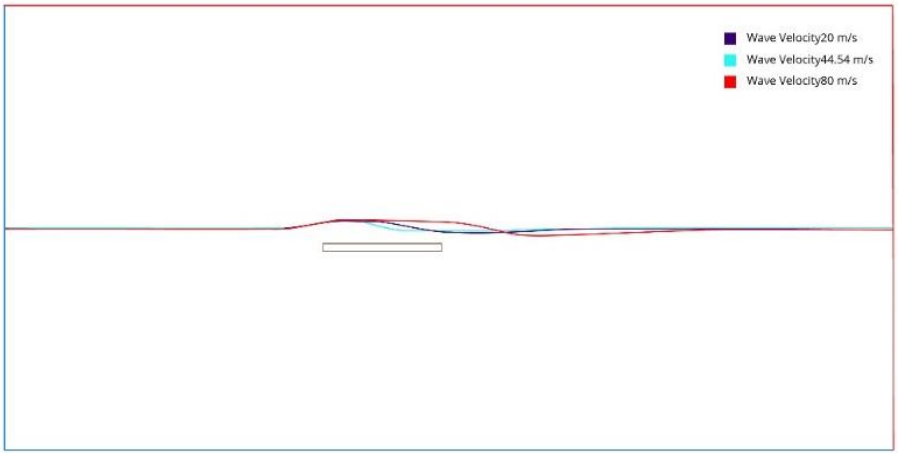
ب) $U_\infty = 44.5\ m/sec$



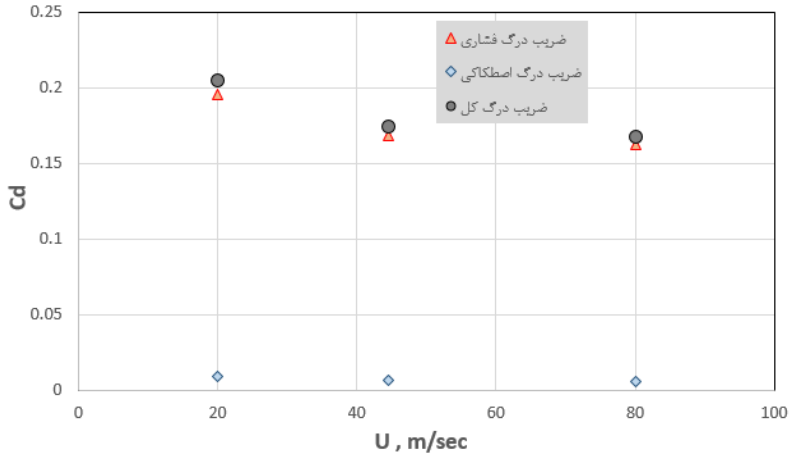
ج) $U_\infty = 80\ m/sec$

شکل ۴- نمایی از کانتور فاز هوا در اثر حرکت سیلندر در عمق $H/D = 2$ در سه سرعت مختلف.

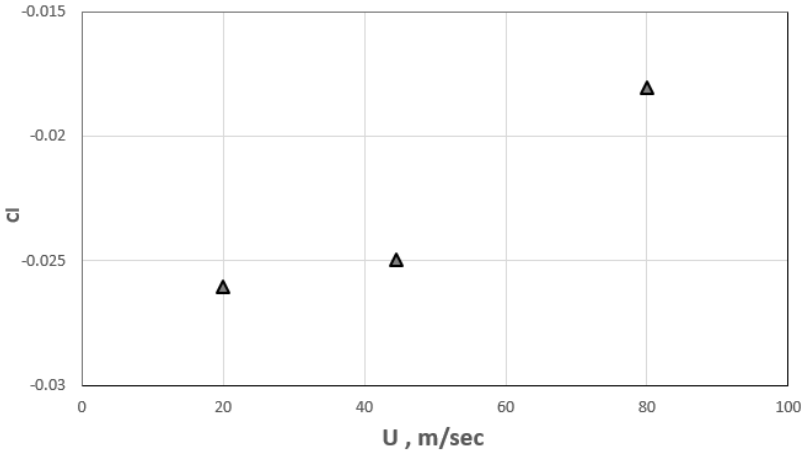
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۵- موج ایجاد شده بر سطح آزاد آب در اثر حرکت سیلندر در عمق $H/D = 2$ از سطح آب در سه سرعت مختلف.



شکل ۶- نمودار تغییرات ضریب پسای کل، فشاری و اصطکاکی در اثر حرکت سیلندر در عمق $H/D = 2$ از سطح آب در سه سرعت مختلف

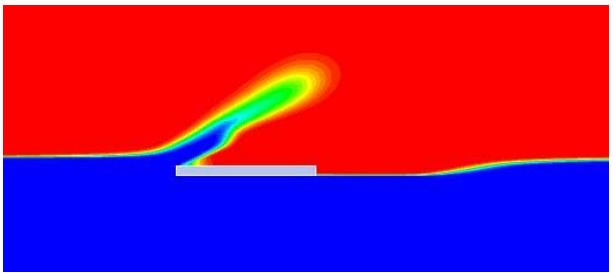


شکل ۷- نمودار تغییرات ضریب برآ در اثر حرکت هندسه مستطیلی در عمق $H/D = 2$ از سطح آب در سه سرعت مختلف.

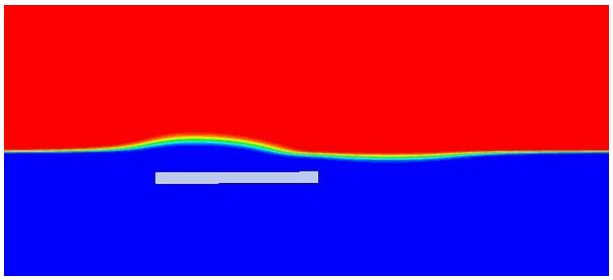
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

در شکل ۸ اثر تغییر عمق صفحه مستطیلی از سطح آزاد آب بر شکل موج نشان داده شده است. مطابق شکل، با افزایش عمق (H) در یک سرعت مشخص ($U_\infty = 44.5\, m/sec$)، دامنه موج کاهش و طول موج افزایش یافته است. در شکل ۶-الف، جدایش و گسیختگی سطح آزاد زمانی که صفحه مستطیلی در عمقی بسیار نزدیک از سطح آزاد آب حرکت می کند ($H = D$) مشهود است. هم‌چنین بررسی پژوهش حاضر نشان می دهد با افزایش عمق به بیش از $H/D = 19$، سطح آزاد آب از حضور صفحه مستطیلی شکل متاثر نخواهد شد و عملاً در این شرایط موجی بر سطح آب ایجاد نمی شود.

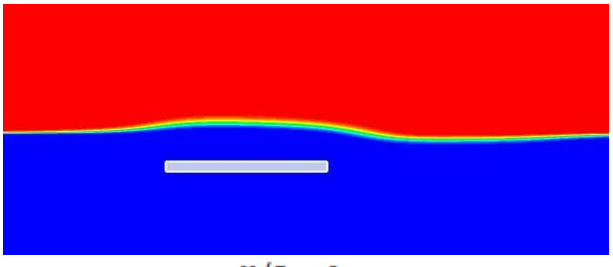
در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب تغییرات دو ضریب پسا و برآ در سه عمق مختلف سیال از سطح آزاد ($H/D = 1,2,3$) و در یک سرعت مشخص $U_\infty = 44.5\, m/sec$ ارائه شده است. مطابق این دو شکل، با افزایش عمق صفحه مستطیلی از سطح آزاد، ضریب پسا افزایش و ضریب برآی منفی کاهش و به سمت صفر میل می کند (با افزایش عمق غوطه‌وری از ۱ به ۳، مقدار ضریب پسا حدود ۱۷درصد افزایش می‌یابد). بررسی عددی نتایج حاکی است با کاهش عمق صفحه مستطیلی و نزدیک شدن به سطح آزاد، نسبت دو ضریب هیدرودینامیکی یعنی C_l/C_D افزایش می‌یابد؛ لذا به طور خلاصه می‌توان گفت با کاهش عمق و نزدیک شدن به سطح آزاد، عملکرد هیدرودینامیکی پرتابه افزایش می‌یابد. همان‌گونه که شکل ۱۰ نشان می‌دهد با دور شدن از سطح آزاد، هندسه مستطیلی اثرات سطح را احساس نمی‌کند و با توجه به اینکه زاویه حمله پرتابه صفر است، جریان حول آن متقارن‌تر و درنتیجه ضریب برآ به سمت صفر میل می‌کند. مطابق شکل، در این شرایط اثرات سطح آزاد در عمق‌های غوطه وری بیش از ۳ توسط سیال قابل احساس نیست.



الف) $H/D = 1$



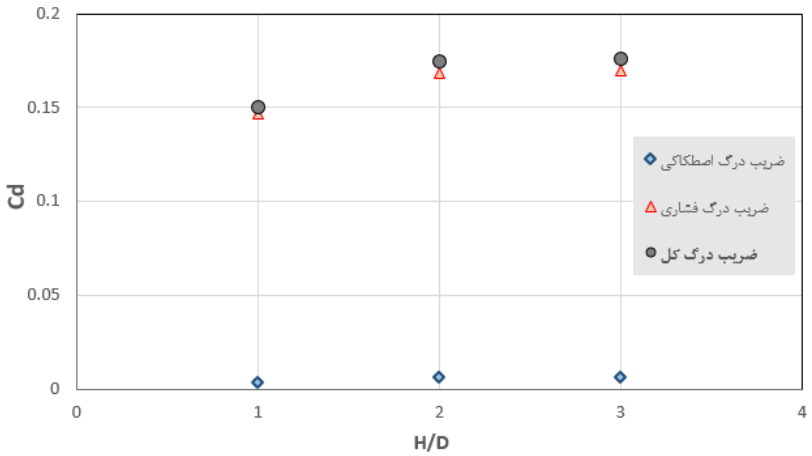
ب) $H/D = 2$



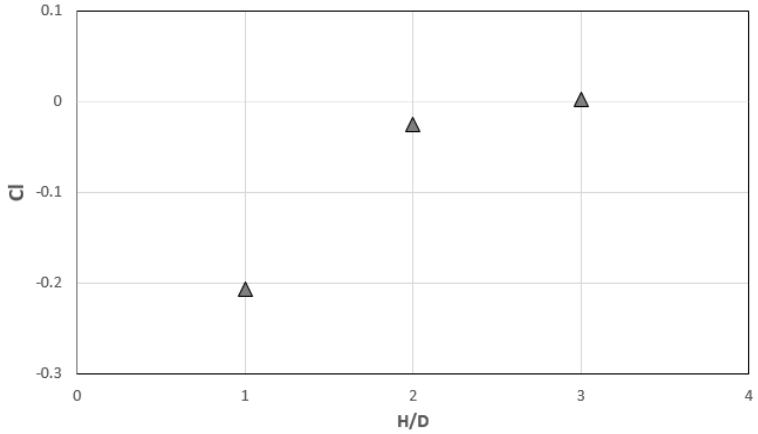
ج) $H/D = 3$

شکل۸- نمایی از کانتور فاز هوا در اثر حرکت صفحه مستطیلی در سرعت ثابت $U_\infty = 44.5\, m/sec$ و در سه عمق مختلف از سطح آزاد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل۹- نمودار ضریب پسای اصطکاکی، فشاری و کل حول صفحه مستطیلی در سه عمق مختلف از سطح آزاد و در سرعت ثابت $U_{\infty} = 44.5\ m/sec$

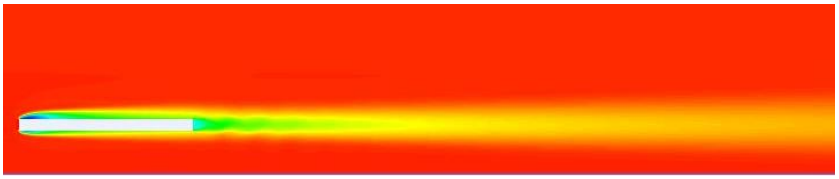


شکل۱۰- نمودار ضریب برآ حول صفحه مستطیلی در سه عمق مختلف از سطح آزاد و در سرعت ثابت

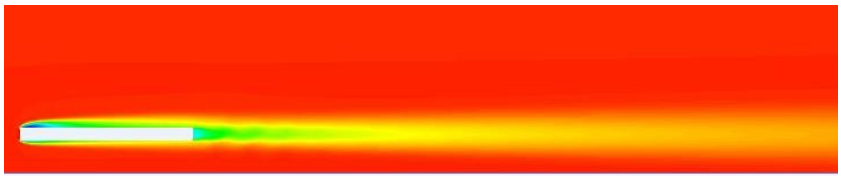
$U_{\infty} = 44.5\ m/sec$

در شکل۱۱ کانتور فشار در سه ارتفاع نزدیک کف آب ($H/D = 25,26,28$) در سرعت مشخص $U_{\infty} = 80\ m/sec$ باهم مقایسه شده است. مبنای اندازه گیری ارتفاع سطح آزاد است، لذا هرچه H/D عدد بزرگتری داشته باشد به کف نزدیک تر است. همان گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن پرتابه به کف آب، کانتور فشار در سطح بالایی و زیرین صفحه مستطیلی دارای عدم تقارن بیشتری شده و این عدم تقارن بیشتر باعث افزایش تولید برآ در ارتفاع‌های نزدیک‌تر به کف آب می شود (در شکل های ۱۱-الف، ۱۱-ب و ۱۱-ج، کانتور فشار در سطح بالایی صفحه مستطیلی تقریباً مشابه یکدیگر است اما کانتور فشار در سطح زیرین این سه شکل با هم متفاوت است). شکل های ۱۲ و ۱۳ به ترتیب ضرایب هیدرودینامیکی پسا و برآ را برا شرایط شکل ۱۱ نشان می‌دهد. شکل ۱۲ گویای این مطلب است که ضریب پسای اصطکاکی، فشاری و کل در این سه شرایط تقریباً مقدار ثابتی دارند اما مطابق شکل ۱۲ می توان گفت با نزدیک شدن به کف آب (کف آب در $H/D = 30$ قرار دارد)، اثرات کف باعث افزایش ضریب برآ (تا حدود ۶۰ درصد) می‌شود و در مجموع نسبت ضریب برآ به پسا با نزدیک شدن به کف آب افزایش و عملکرد هیدرودینامیکی در این شرایط افزایش می‌یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



الف) $H/D = 25$ (فاصله 5D از کف)

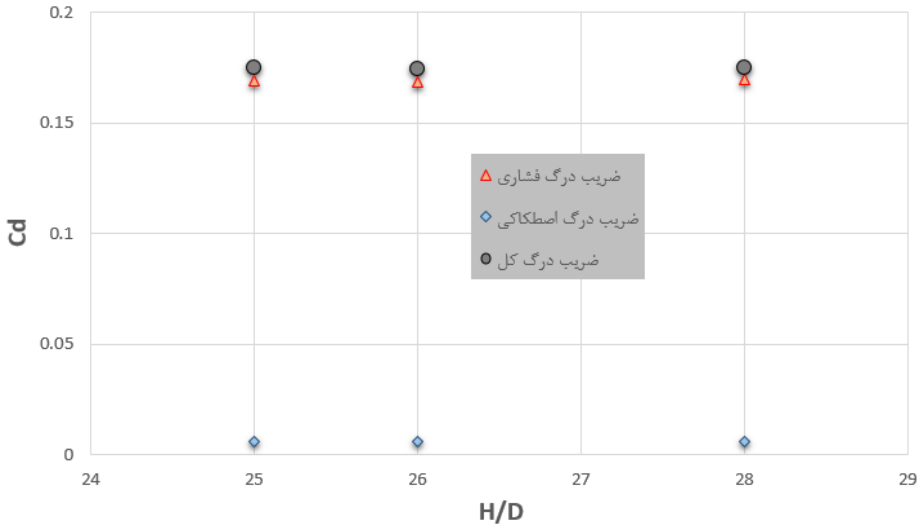


ب) $H/D = 26$ (فاصله 4D از کف)



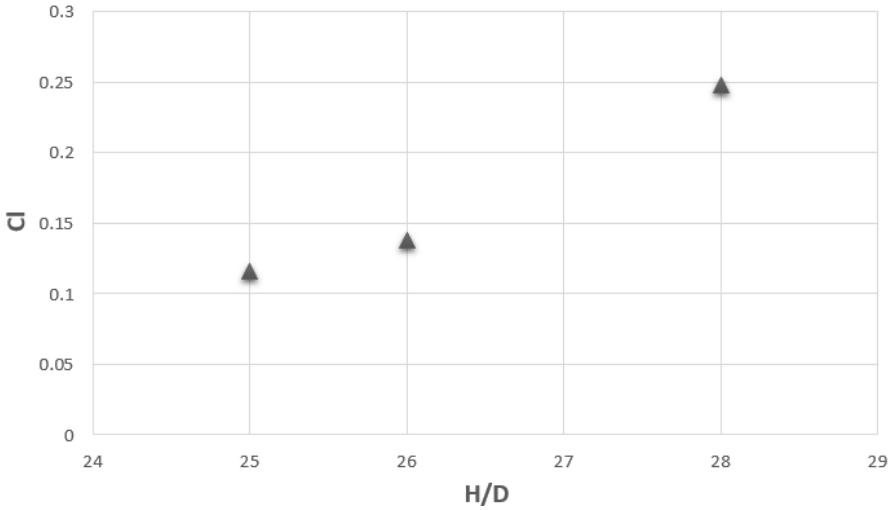
ج) $H/D = 28$ (فاصله 2D از کف)

شکل۱۱- نمایی از کانتور فشار حول صفحه مستطیلی در سرعت ثابت $U_\infty = 80\ m/sec$ و در فواصل مختلف از کف



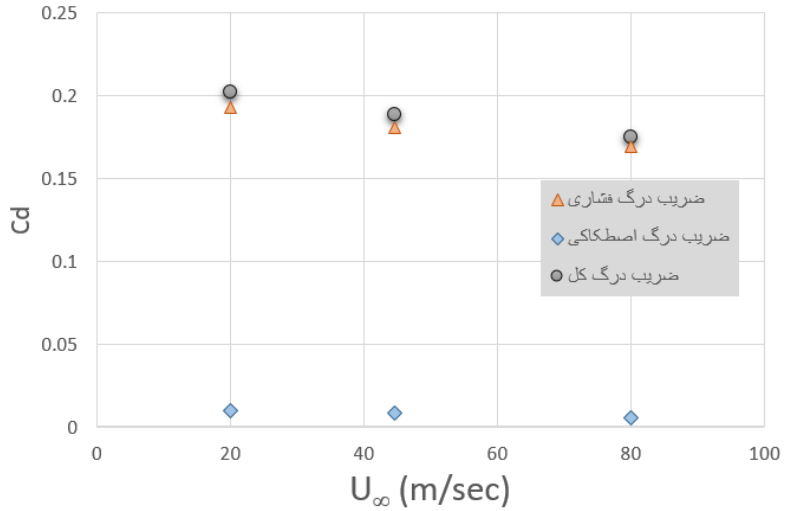
شکل۱۲- نمودار ضریب پسای اصطکاکی، فشاری و کل حول صفحه مستطیلی در سه فاصله مختلف از کف و در سرعت ثابت $U_\infty = 80\ m/sec$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



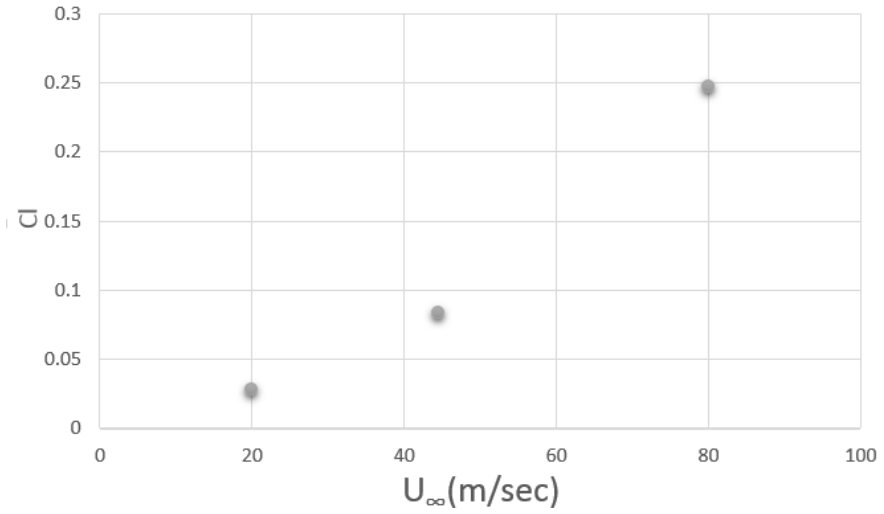
شکل۱۳- نمودار ضریب برآ صفحه مستطیلی در سه فاصله مختلف از کف و در سرعت ثابت $U_\infty = 80\ m/sec$

در شکل ۱۴ نمودار تغییرات ضریب درگ فشاری، اصطکاکی و کل در سرعت‌های مختلف هندسه غوطه‌ور در آب در یک ارتفاع مشخص ($H/D = 28$) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشهود است با افزایش سرعت مقادیر نیروی پسا روند کاهشی خواهد داشت و با افزایش سرعت از ۲۰ به ۸۰ متربرثانیه، ضریب پسا در حدود ۱۵درصد کاهش می‌یابد. علت این روند کاهشی را می‌توان به کاویتی ایجاد شده در اطراف مستطیل و قرار گرفتن سطح صفحه مستطیلی در تماس با یک منطقه کم‌فشار در سرعت‌های بالاتر نسبت داد. همچنین در شکل ۱۵ نمودار تغییرات ضریب برآ در سرعت‌های مختلف هندسه غوطه-ور در آب در یک ارتفاع مشخص ($H/D = 28$) ارائه شده است. مطابق شکل، افزایش سرعت در یک ارتفاع مشخص از کف باعث افزایش مقدار ضریب برآ شده است. نتایج به دست آمده از دو شکل ۱۴ و ۱۵ (کاهش ضریب پسا و افزایش ضریب برآ در سرعت های بالاتر) نشان می‌دهد افزایش سرعت باعث بهبود قابل توجه عملکرد هیدرودینامیکی پرتابه مستطیلی شکل شده است.



شکل۱۴- نمودار ضریب پسای فشاری، اصطکاکی و کل صفحه مستطیلی در سرعت‌های مختلف ۲۰، ۴۴/۵ و ۸۰ متر بر ثانیه در فاصله $2D$ از کف ($H/D = 28$)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل۱۵- نمودار ضریب برآ صفحه مستطیلی در سرعت‌های مختلف ۲۰، ۴۴/۵ و ۸۰ متر بر ثانیه در فاصله $2D$ از کف ($H/D = 28$)

۵. جمع بندی

در پژوهش حاضر، جریان حول یک صفحه تخت مستطیلی غوطه‌ور در نزدیکی سطح آزاد و کف آب با استفاده از روش حجم سیال (VOF) و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد در محدوده سرعت ۸۰-۲۰ متربرثانیه و عمق بدون‌بعد غوطه‌وری ۱-۲۸ شبیه سازی شد. بررسی‌های این تحلیل نشان می‌دهد با دور شدن صفحه مستطیلی غوطه‌ور از سطح آزاد (افزایش عمق) در یک سرعت مشخص آب، ضریب پسا و برآی منفی افزایش و در مقابل، با افزایش سرعت سیال در یک عمق مشخص از سطح آزاد، عملکرد هیدرودینامیکی سیستم افزایش می‌یابد. همچنین با نزدیک شدن هندسه به بستر (کف) آب عملکرد هیدرودینامیکی (تا حدود ۶۰ درصد) بهبود یافته و در حالی که در ضریب پسا تغییر قابل توجهی ایجاد نمی‌شود. به علاوه، در یک عمق مشخص از کف، با افزایش سرعت سیال عملکرد هیدرودینامیکی (برآ) به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش و به دلیل ایجاد کاویتاسیون بر روی سطح پرتابه نیروی پسا (تا حدود ۱۵درصد) کاهش می‌یابد.

۶. مراجع

[1]Sukruth, S., Francisco, J. and Huera-Huarte (2019), "Effect of free surface on a flat plate translating normal to the flow", Ocean Engineering, 171, pp 458–468.

[2]Qiulin, Q. and Wei, W. (2014)," Numerical Simulation of the Flow field of an Airfoil in Dynamic Ground Effect", Journal of Aircraft, **51**(5), pp 1659-1662, USA.

[3]Chen, Y. S. and Schweikhard, W. G. (1985), "Dynamic Ground Effects on a Two-Dimensional Flat-Plate", Journal of Aircraft, **22**(7), pp 638–640, USA.

[4]Nuhait, A. O. and Zedan, M. F. (1993), "Numerical Simulation of Unsteady Flow Induced by a Flat Plate Moving Near Ground", Journal of Aircraft, **30**(5), pp 611–617, USA.

[5]Nishino, T. Roberts, G.T., Zhang, X. (2008), "Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect", Journal of Fluids and Structures, 24, pp 18–33.

[6]Nishino, T., Roberts, G.T. (2008), "Absolute and convective instabilities of two-dimensional bluff body wakes in ground effect", European Journal of Mechanics B/Fluids, 27, pp 539-551.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[7]Matsuzaki, T., Yoshioka, S., Kato, T., and Kohama, Y. (2008), "Unsteady Aerodynamic Characteristics of Wings in Ground Effect", Proceedings of the 40th JAXA Workshop on Investigation and Control of Boundary-Layer Transition, Japan Aerospace Exploration Agency, pp 53–56, Japan.

[8]Yang, Z. G., and Yang,W. (2010), "Complex Flow for Wing-in-Ground Effect Craft with Power Augmented Ram Engine in Cruise", Chinese Journal of Aeronautics, **23**(1), China.

[9]Jagadeesh P., Murali K. (2010), "Rans Predictions of Free Surface Effects on Axisymmetric Underwater Body", Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, **4**(2), 301-313, DOI: 10.1080/19942060.2010.11015318, UK.

[10] Doig, G., and Barber, T. J. (2011), "Considerations for Numerical Modeling of InvertedWings in Ground Effect", AIAA Journal, **49**(10), 2011, pp. 2330–2333, USA.

[11] Mansoorzadeh Sh., Javanmard E. (2014), "An investigation of free surface effects on drag and lift coefficients of an autonomous underwater vehicle (AUV) using computational and experimental fluid dynamics methods", Journal of Fluids and Structures, **51**, pp. 161–171, USA.

[12]Nematollahi A., Abdolrahman Dadvand A., Dawoodian M. (2015), "An axisymmetric underwater vehicle-free surface interaction: A numerical study", Ocean Engineering, 96, pp. 205–214, UK.

[13]Ben-Hamza S., Sabra H. , Mahjoub-Saïd N., Bournot H., and Le-Palec G. (2015), "Numerical Simulation of Wave-Structure Interaction around an Obstacle", Design and Modeling of Mechanical Systems - II, pp 683-691, Switzerland.

[14]Bouscasse, B., Colagrossi, A., Marrone, S., Souto-Iglesias, A. (2017), "SPH modelling of viscous flows past a circular cylinder interacting with a free surface", Comput. Fluids, 146, pp 190–212.

[15]Lo D.C., Wang K.H., Hsu T.W. (2020), "Two-Dimensional Free-Surface Flow Modeling for Wave-Structure Interactions and Induced Motions of Floating Bodies", Water, **12**(2):543, China.

[۱۶] ملتانی شاهرخت ع.، پسندیده فرد م.، مغربی م.ج. (۱۴۰۱)، «بررسی مشخصات موج و مقاومت موجی یک جسم زیرسطحی به همراه سطح کنترل در نزدیکی سطح آزاد»، مکانیک سازه ها و شاره ها، **۱۲**(۲)، صص. ۶۵-۷۹، ایران.

[17]Shen Y. M., Chiu-On Ng and Zheng Y. H. (2004),"Simulation of wave propagation over a submerged bar using the VOF method with a two-equation k-turbulence modeling", Ocean Engineering, **31**(1), pp 87-95.

[18]Rodi, W. (1993), "Turbulence models and their application in hydraulics", third edition, . IAHR Monograph, Netherlands.

[19] Cyril W. Hirt C. W. and Nichols B. (1981), "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, 39, pp 201-225.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

چکیده انگلیسی:

Investigating the hydrodynamic effects of the free surface and water bed on the flow around a submerged rectangular geometry using VOF

Mahdi Norouzi[1], Seyyede Zohreh Ayatollahi[2]

[1]Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Larestan University, Lar, Iran
norozi347@yahoo.com
[2] Graduated, Department of Mechanical Engineering, Larestan University, Lar, Iran
ayatollahi.Z10@gmail.com

Received: November 2023 Accepted: February 2024

Abstract

In this research, the hydrodynamic effects of the flow around a submerged rectangular surface near the bed and the free surface of water has been investigated. This analysis was done using FLUENT and the multiphase method of volume of fluid (VOF) and the standard k-ε model was used to simulate turbulence. After checking the mesh and computational space independency, first the effects of changing the depth of the geometry immersed in water from the free surface and also changing the velocity of the fluid flow on the waveform of the free surface and hydrodynamic coefficients were investigated and then the effects of close This geometry has been evaluated on the floor. The results of the present research show that as the submerged rectangular plate moves away from the free surface (increasing the depth) at a specific water velocity, the drag coefficient and negative effect increase, and on the contrary, with the increase of the fluid velocity at a specific depth from the surface, the performance The hydrodynamics of the system increases. Also, as the geometry approaches the water bed (floor), the hydrodynamic performance is improved, while there is no significant change in the drag coefficient. In addition, at a certain depth from the floor, the hydrodynamic performance increases significantly with the increase in fluid velocity.

Keywords: Immersed rectangular geometry, free surface effect, ground effect, VOF

*corresponding author:norozi347@yahoo.com

Cite this article as Mahdi Norouzi, Seyyede Zohreh Ayatollahi. Investigating the hydrodynamic effects of the free surface and water bed on the flow around a submerged rectangular geometry using VOF. Journal of Energy Conversion, 2024, 10(4), 43-57.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]