مطالعه آزمایشگاهی اسکوات کشتی‌ها در کانال

حمید زراعتگر[1*]، روزبه پناهی[2]، کریم اکبری[3]، محسن اصغری[4]، آزاده عزیزجلالی[5]

۱- استادیار، عضو هیات علمی صنعتی امیرکبیر
۲- استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳- دانشجوی دکترا، داشگاه صنعتی امیرکبیر
۴- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۵- کارشناسی ارشد فیزیک دریا

چکیده

آبراهه‌ها و کانال‌های دسترسی، محدود کننده سرعت کشتی بوده و همواره مورد توجه محققین بوده است. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار در این زمینه، تغییر دینامیکی آبخور کشتی به هنگام ورود به عمق‌های محدود است که اصطلاحاً اسکوات نامیده می‌شود. در این مطالعه، اسکوات کشتی‌ها به کمک تست سیستماتیک مدل در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو مدل از سری ۶۰ در شرایط مختلفی از عمق و عرض کانال و عدد فرود تست گردیده و مقدار تغییر آبخور در سینه و پاشنه کشتی ثبت گردید. پس از دسته‌بندی نتایج آزمایش و اعتبار سنجی آن، یک رابطه رگراسیونی برای اسکوات در سینه کشتی‌های تجاری ارائه می‌شود. محاسبات انجام شده بر پایه رابطه رگراسیونی مذکور برای چند نمونه کشتی، تطبیق مناسب با دیگر روابط موجود را نشان می‌دهد. از مزیت‌های این رابطه، پوشش دامنه وسیع‌تری از پارامترها می‌باشد.

کلمات کلیدی: اسکوات، کانال، رابطه رگراسیونی، تست مدل

A Study on Ship Squat in Canal by Model Testing

H. Zeraatgar[1], R. Panahi[2], K. Akbari[3], M. Asghari[4], A. Azizjalali[5]

1-Assistant Professor, Amirkabir University of Technology
2- Assistant Professor, Iran University of Science and Technology
3-Phd Candidate, Amirkabir University of Technology
4-MSc in Naval Architecture, Amirkabir University of Technology
5- MSc in Marine Physics

Abstract

In canal and seaway the ship speed must be reduced and it has been a subject for many research studies. One of the most important phenomena connected to this issue is the increasing of ship draught when passing in the restricted water which is called squat. This study deals with the squat thorough systematic model testing. Two models from Series60 body form have been tested in a set of canal depth, width as well as different model speed. The change on their draught has been recorded at fore and aft of the model. The test results have been manipulated, validated and regression formula has been developed for prediction of squat at ship fore perpendicular. The formula has been compared with the other existing formula where a good agreement achieved. The advantage of the new formula is the coverage on wider range of parameters affecting the ship squat.

Keywords: squat, canal, regression, model testing

* نویسنده مسئول مقاله: hamidz@aut.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

۱-مقدمه

کانال‌ها، آب‌های کم عمق و آبراهه‌ها نقشی مهم و انکارناپذیری در دریانوردی داشته و بر مبنای دستیابی به بالاترین ظرفیت تردد ایمن کالا و مسافر و با توجه به ملاحظات اقتصادی طراحی می‌شوند. دستیابی به عمق ایمن در طراحی این سازه، تحت تأثیر عوامل متعددی بوده و از جمله آن‌هامی‌توان به اسکوات کشتی‌ها اشاره نمود. به هنگام حرکت کشتی با سرعت معین در آب‌های کم عمق، جریانی ازسیال در زیر کشتی در جهت مخالف حرکت کشتی به وجود می‌آید تا سطح آب در پایین دست و بالا دست کشتی یکسان بماند. در اینحالت، به علت افزایش سرعت سیال در زیر کشتی، فشار افت نموده و در نتیجه نیروی بویانسی کاهش می‌یابد. در ادامه آبخور کشتی تا هنگامی که نیروی بویانسی با نیروی وزن برابر شود، افزایش می‌یابد. به این پدیده افزایش دینامیکی آبخور"اسکوات" می‌گویند که در حالت حاد ممکن است منجر به گل نشستن کشتی شود. اسکوات میتواند در قالب افزایش آبخور شناور در سینه شناور، در وسط طولی شناور و یا تغییر تریم شناور تعریف گردد. متداول‌ترین تعریف اسکوات افزایش آبخور در سینه شناور است که در این تحقیق نیز از این تعبیر استفاده میگردد.

محققان برای تعیین دقیق اسکوات، روش‌های مختلفی را بکار می‌گیرند. استفاده از مدل ریاضی و حل آن، استفاده از تست مدل و اخیراً اندازه‌گیری میدانی این پدیده، از مهم‌ترین روش‌های متداول می‌باشد. روش‌های محاسباتی و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده همراه با روش‌های رگراسیونی منجر به توسعه روابط تجربی گردیده است که جایگاه موثری در طراحی کانال دارند. علی‌رغم مطالعات زیاد صورت گرفته بر روی اسکوات، اختلافات قابل توجه در برآورد اسکوات وجود دارد. مطالعات انجام شده در رابطه با اسکوات بسیار گسترده بوده و در ادامه، برخی از مهم‌ترین این تحقیقات مرور می‌شود.

بررسی پدیده فرورفتگی کشتی‌ها ابتدا در سال ۱۹۳۹ توسط هاولاک [۱] آغاز گردید که ایشان پدیده فرورفتگی را در سرعت‌های پایینبررسی نمودند. ویکر در سال ۱۹۶۵ روابط و نمودارهایی را جهت محاسبه اسکوات در کشتی‌ها ارائه نمود که به عنوان مبنای محاسباتی در توصیه‌های مهندسی برای زیرساخت‌های نظامی آمریکا [۲] مورد استفاده قرار می‌گیرد. داند و فرگوسن[۳] در سال ۱۹۷۳ اسکوات یک کشتی واقعی را در آب کم عمق اندازه گیری نمودند. هوسکا [۴] در سال ۱۹۷۶ میزان فاصله مجاز در زیر کشتی‌های عبوری از آبراهه های فنلاند را بروش تست مدل بدست آورد. این برای اولین بار بود که یک رابطه تجربی برای تعیین اسکوات کشتی‌ها در هنگام عبور از آبراهه‌ها استخراج می‌گردید. پس از آن، باراس [۵] در سال ۱۹۷۸ تحقیق همه جانبه‌ایبر روی اسکوات انجام داده و کتابچه‌ای تحت عنوان اسکوات کشتی منتشر می‌نماید. باراس [۶] در سال ۱۹۷۹ روشی برای محاسبه اسکوات کشتی‌ها ارائه نمود. میلوارد [۷] در سال ۱۹۹۰ روشی را برای محاسبه اسکوات در آب‌های کم عمق در مرحله طراحی مقدماتی بکار برد. میلوارد [۸] در سال ۱۹۹۲ مقایسه‌ای را بین روش‌های تجربی و تئوری جهت تعیین اسکوات در آب‌های کم عمق انجام داد. وب و وولی [۹] در سال ۱۹۹۸ با استفاده از DGPS تغییرات موقعیت عمودی و افقی سینه و پاشنه کشتی را با دقت یک سانتیمتر اندازه‌گیری نمودند. گورلی و تاک [۱۰] در سال ۲۰۰۱ رابطه‌ای را جهت تعیین حداکثر اسکوات کشتی‌ها ارائه نمودند. دانکر و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۲ روش‌های اندازه‌گیری اسکوات را مقایسه و آنالیز نمودند. انستیتو توسعه سرزمین ساحلی ژاپن در سال ۲۰۰۲ تعدادی رابطه تجربی برای محاسبه اسکوات ارائه نمود. باراس [۱۲] در سال ۲۰۰۴ تحقیقات ۳۲ ساله ارائه شده پیرامون اسکوات کشتی‌ها را ارائه نمودند. گاسما [۱۳] در سال ۲۰۰۵ مدلی تصادفی را برای ارزیابی فاصله مجاز بین کف کشتی و بستر دریا ارائه داد. تیم گورلی [۱۴] در سال ۲۰۰۷ رواداری بین بستر دریا و کف کشتی را در موج مورد بررسی قرار می‌دهد. زراعتگر و همکاران [۱۵] با محاسبه اسکوات با رابطه‌های رگراسیونی مختلف برای کشتی‌های تجاری نمونه نشان دادند که اصولاً رابطه‌های تجربی ارائه شده

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

برای محاسبه اسکوات، مقادیر بسیار متفاوتی را ارائه می‌کنند.

روش آزمایشگاهی با کمک تست مدل یکی از روش‌های اساسی برای تحقیق اسکوات کشتی در کانال می‌باشد که این تحقیق آنالیز اسکوات بروش مدل تست پرداخته می‌شود.

بدین منظور پس از بررسی تعریف و تاریخچه اسکوات در مقدمه در بخش دوم نحوه تجهیز آزمایشگاه و انجام تست مدل ارائه می‌گردد. مشخصات دو مدل از بدنه کشتی و ده‌ها مشخصات کانال مورد استفاده در تست ارائه می‌گردد. تجهیزات تست اسکواتو وسایل اندازه-گیری ارائه و نحوه کالیبراسیون آنبحث می‌گردد. در بخش سوم نتایج اسکوات ثبت شده و اعتبارسنجی تست‌ها ارائه می‌گردد. در بخش چهارم نتایج تست‌ها به صورت رابطه رگراسیونی استخراج گردیده و با دیگر رابطه‌ها مقایسه می‌گردد. در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این تحقیق ارائه می‌گردد.

۲- اصول تست مدل، تجهیز آزمایشگاه و انجام تست

۲-۱- اصول تشابه در تست مدل اسکوات

اساس تست مدل اسکوات بر پایه تشابه فرود است. در این روش فرض میگردد که سهم نیروهای ویسکوز در مقایسه با سهم نیروهای ثقلی برای ایجاد اسکوات در کانال ناچیز است. بدین منظور لازم است عدد رینولدز مدل بزرگتر از عدد رینولدز بحرانی باشد. بنابراین، مدلی مشابه با کشتی از نظر هندسی با اشل مشخص ساخته میشود (تشابه هندسی مدل) و مدلی از کانال مشابه با کانال اصلی با همان اشل ساخته میگردد (تشابه هندسی کانال). مدل با سرعت معینی بطوریکه عدد فرود مدل برابر عدد فرود کشتی باشد (تشابه سینماتیکی مدل) در کانال به حرکت در میآید که نتیجتا عدد فرود هیدرولیکی مدل کانال و کانال اصلی مساوی میگردد. تشابه سینماتیکی کانال). آنگاه تشابه دینامیکی بین رفتار مدل در مدل کانال و کشتی در کانال اصلی برقرار است. بعبارت دیگر مقدار بدون بعد نیروی اسکوات کشتی و مدل یکسان است که نتجتا اندازه اسکوات مدل و کشتی برابر است.

تشابه هندسی مدل:

$$\frac{L_s}{L_m}=\frac{B_s}{B_m}=\frac{T_s}{T_m}=\lambda,\ \frac{A_s}{A_m}=\lambda^2,\ \frac{\nabla_s}{\nabla_m}=\lambda^3 \qquad (۱)$$

که:

T,B,L بترتیب طول، عرض و آبخور کشتی

اندیسهای m,s بترتیب مربوط به کشتی و مدل

A,∇ بترتیب جابجایی جرمی و سطح کشتی

و λ اشل میباشد.

تشابه هندسی کانال:

$$\begin{aligned} B_{cs} &= \lambda.B_{cm} \\ h_{cs} &= \lambda.h_{cm} \end{aligned} \qquad (۲)$$

که B,h بترتیب ارتفاع کانال و عرض کانال می‌باشند.

تشابه سینماتیکی مدل:

$$V_s=\sqrt{\lambda}.V_m \qquad (۳)$$

که V سرعت پیشروی کشتی میباشد.

تشابه سینماتیکی کانال:

$$F_{nhs}=F_{nhm} \qquad (۴)$$

که F_{nh} عدد فرود هیدرولیکی میباشد.

تشابه دینامیکی:

$$\overset{*}{S}_{bows}=\overset{*}{S}_{bowm}=\frac{\delta T}{h} \qquad (۵)$$

۲-۲- تجهیز آزمایشگاه و انجام تست

با توجه به تجربیات پیشین نویسندگان جهت مطالعه رفتار کشتی در آب کم عمق [۱۹]، گام‌هایزیر در انجام تحقیق حاضر بکار گرفته شده است:

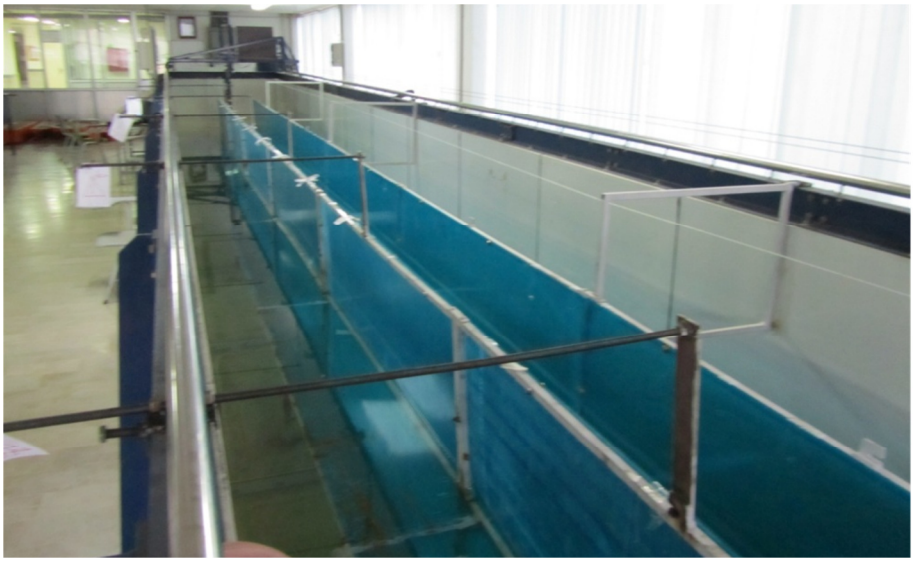
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

- تعیین حوضچه مناسب تست
- طراحی و ساخت چندین مدل بدنه به کمک ماشین CNC
- طراحی و ساخت کف کاذب و دیواره کاذب قابل تنظیم
- طراحی و ساخت سیستم آلتراسونیک اندازه-گیری آبخور مدل به همراه نرم‌افزار مربوطه
- کالیبراسیون سرعت ارابه حوضچه
- نصب و کالیبراسیون کانال قابل تنظیم (قابلیت تغییر در ابعاد کانال) در داخل حوضچه
- کالیبراسیون سیستم آلتراسونیک اندازه‌گیری آبخور کشتی
- آماده‌سازی مدل‌ها، آبخور و مرکز ثقل آن‌ها
- نصب مدل، نصب سیستم اندازه‌گیری آبخور و راه‌اندازی کلیه سیستم‌ها به صورت همزمان
- آبگیری حوضچه در عمق مدنظر و شروع تست‌های اولیه
- بازنگری کیفیت و صحت هر آزمایش با استفاده از فیلم‌برداری
- آغاز تست‌های اصلی

مطالعات در حوضچه کشش آزمایشگاه مهندسی کشتی دانشگاه نوشهر انجام شد. در این حوضچه از یک سیستم کشش، که کنترل آن و ثبت داده به کامپیوتر انجام میشود، استفاده گردیده و به کمک نرم افزار موجود می‌توان مقاومت بدنه مدل‌های مورد آزمایش را استخراج نمود. شکل ۱ و ۲ نمایی از حوضچه و دیواره-های کاذب و همچنین نصب مدل را نشان می‌دهد. ابعاد حوضچه کشش به شرح جدول۱می‌باشد.

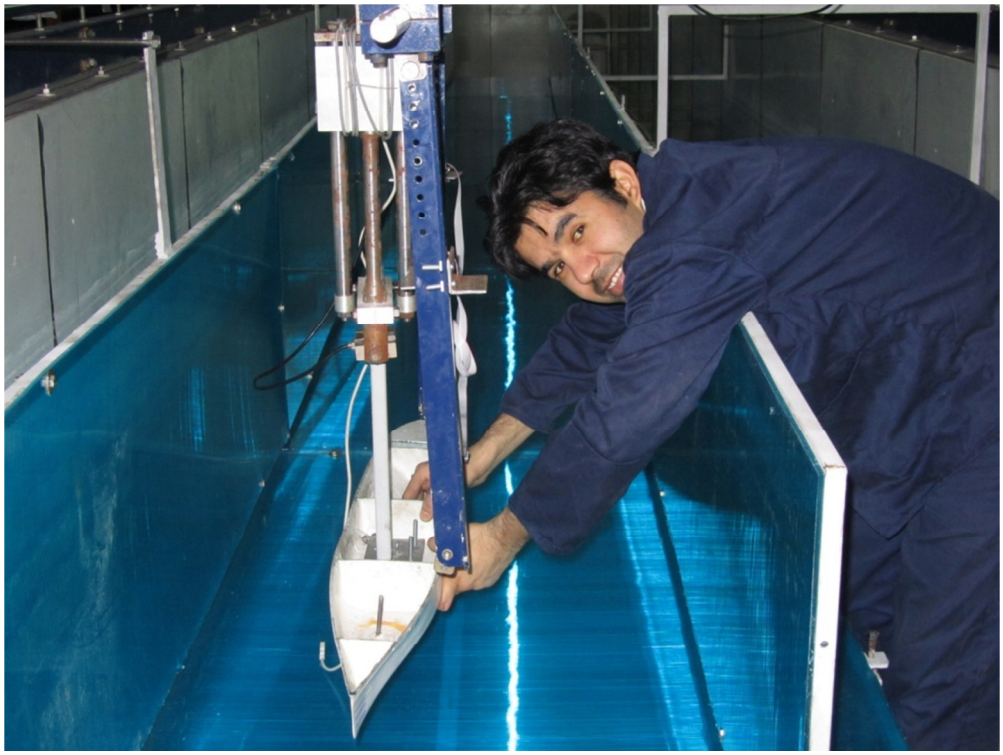
جدول۱: مشخصات حوضچه تست

عنوان	مقدار	واحد
طول	۱۶	متر
عرض	۲	متر
ارتفاع	۱.۵	متر
سرعت	۲	متربرثانیه



شکل ۱: نمایی از حوضچه و دیواره کاذب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

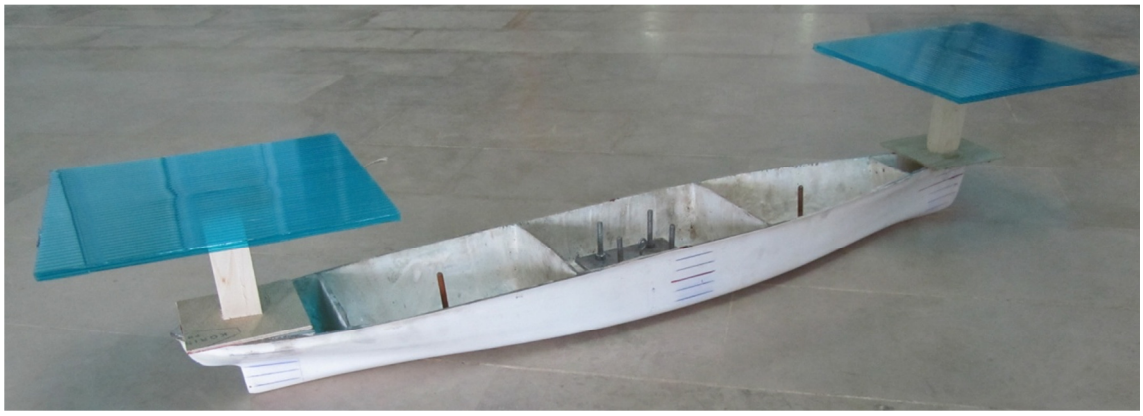


شکل ۲- تصویری از نصب مدل در حوضچه

برای اینکه بتوان نتایج بدست آمده از انجام آزمایشات را فراگیر نمود، بایستی از مدل‌های مختلف در انجام آزمایشات استفاده نمود. برای این منظور از دونوع کشتی با فرم سری ۶۰ استفاده گردید. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. تصویری از یک مدل در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- خصوصیات هندسی مدل‌های مورد آزمایش

نام مدل	LOA (مم)	LBP (مم)	عرض خیس (مم)	آبخور (مم)	ارتفاع (مم)	ضریب ظرافت بدنه	جابجایی (کیلوگرم)	موقعیت طولی مرکز غوطه‌وری (نسبت به مقطع میانی)
سری ۱-۶۰	۱۵۵٤	۱۵۰۰	۱۹۹	۸۰	۱۲۷	۰/۸	۱۹/۱	+۲۲/۵
سری ۲-۶۰	۹۲۰	۸۸۰	۱٤۵	٤۳	۷۷	۰/٦	۳/۲۹	-۱۳/۲



شکل ۳- تصویر مدل سری ٦۰ با ضریب ظرافت بدنه ۰/٦

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

کانال کاذب با دیواره و کف قابل تنظیم در داخل حوضچه کشش تعبیه گردید. سه پارامتر سرعت مدل، عرض کانال و عمق کانال به عنوان متغیرهای تست برای دو مدل انتخاب گردیدند و ترکیب متنوعی را ایجاد نمودند که در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. باید توجه داشت که در سرعت‌های زیاد، مدل به بستر کانال برخورد می‌نماید؛ بنابراین تعداد تست سرعت در حالت‌های مختلف متفاوت است.

در فرآیند انجام تست، ابتدا عرض کانال و عمق کانال توسط صفحات کاذب به مقدار تعیین شده تنظیم گردید. سپس مدل در آبخور مورد نظر در حالت بدون تریم تنظیم‌گردید. بدین منظور از وزنه‌های اضافی استفاده شده است. سپس بر اساس سرعت از پیش تعیین شده، مدل توسط ارابه رانده شد. پس از رسیدن مدل به سرعت ثابت (حالت دائم)، تغییر آبخور کشتی در دو نقطه (با طول متفاوت) از کشتی (اسکوات) در بازه زمان اندازه‌گیری شده است. از این تغییر آبخور، دو پارامتر فرورفتگی زاویه تریم محاسبه می‌گردد. برای اندازه‌گیری تغییر آبخور از یک سیستم اندازه‌گیری آلتراسونیک استفاده شده است. بدین منظور سیستم ایجاد امواج آلتراسونیک بر روی ارابه نصب و بر روی دو نقطه در دو سر مدل صفحاتی جهت انعکاس امواج، متصل شده بود (شکل ۳ را ببینید). بر اساس زمان لازم برای انعکاس امواج، فاصله حسگر تا نقطه مورد نظر اندازه‌گیری گردید. این سیستم کالیبره شده و دقت آن ۰.۵ میلی‌مترمی‌باشد.

۳- نتایج تست و اعتبارسنجی

تستهای زیادی انجام و هر تست سه بار تکرار شده است. نتایج تست پس از بازیابی با فرمولهای موجود رگراسیونی مقایسه گردید.

۳-۱- برخی فرمولهای رگراسیونی موجود

نمونه رابطه‌های محاسبه اسکوات که در این تحقیق نیز از آن‌ها برای مقایسه استفاده می‌شوند عبارتند از: باراس[۶] رابطه زیر را برای اسکوات سینه کشتی بر اساس سرعت پیشروی V_k، ضریب انسداد S_2 [۲] و ضریب ظرافت بدنه ارائه نمود.

$$S_{b_H} = \frac{C_B S_2^{2/3} V_K^{2.08}}{30} \quad (۶)$$

هوسکا [۴] بر پایه رابطه گولیو [۱۶] برای کانالی با محدودیت عرضی با اضافه نمودن ضریب تصحیح عرض کانال K_s رابطه زیر برای اعداد فرود عمقی بزرگ‌تر از ۰/۷ ارائه نمود.

$$S_{b_H} = 2.4 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} K_s \quad (۷)$$

$$K_s = \begin{cases} 7.45 S_1 + 0.76, & S_1 > 0.03 \\ 1.0, & S_1 \le 0.03 \end{cases}$$

که S1 ضریب تصحیح انسداد می‌باشد.

انستیتو توسعه سواحل خارجی ژاپن [۱۷] نیز رابطه زیر را برای اسکوات سینه کشتی در آبراهه‌های ژاپن ارائه نمود:

$$S_{b_j} = \left[\left(0.7 + 1.5 \frac{1}{h/T}\right)\left(\frac{C_B}{L_{pp}/B}\right) + 15 \frac{1}{h/T}\left(\frac{C_B}{L_{pp}/B}\right)^3 \right] \frac{V_s^2}{g} \quad (۸)$$

رومیش [۱۸] رابطه اسکوات سینه رابه کمک انجام آزمایشات به صورت زیر ارائه می‌نماید:

$$S_b = C_V C_F K_{\Delta T} T \quad (۹)$$

که C_V ضریب تصحیح سرعت کشتی، C_F ضریب تصحیح هندسه کشتی و $K_{\Delta T}$ ضریب تصحیح اسکوات در سرعت بحرانی کشتی است.

۳-۲- نتایج تست و مقایسه با فرمولهای رگراسیونی موجود

جداول ۳ و ۴ خلاصه ماتریس پارامترهای تست‌ها را برای سرعت‌های مختلف، نسبت عرض کانال به عرض مدل W/B، نسبت عمق آب به آبخور کشتی h/T و عدد فرود هیدرولیکی Fnh متفاوت نشان می‌دهد. تغییر آبخور در سینه و پاشنه کشتی بر اساس خروجی سنسورها اندازه‌گیری شده است. شکل ۴ نمونه‌ای از این نتایج را نشان می‌دهد.

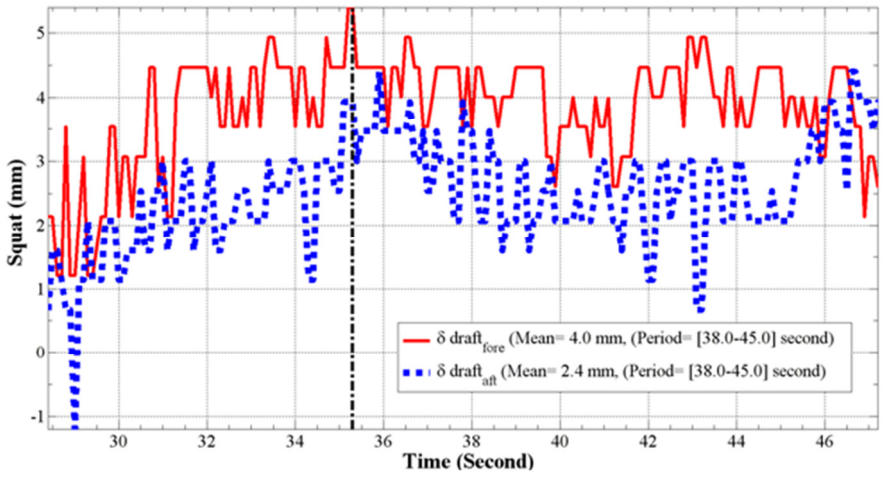
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

جدول ۳- ماتریس پارامترهای تست برای مدل با آبخور$T=80$میلیمتر و ضریب ظرافت بدنه $C_B=0.8$ (عمق حوضچه به میلیمتر میباشد)

W/B= ۲/۱			W/B= ۲/۹۱			W/B= ۳				
h=۱۲۰	h=۱۸۰	h=۲۴۰	h=۱۲۰	h=۱۸۰	h=۲۴۰	h=۱۲۰	h=۱۷۱/۲	h=۲۴۰		
h/T=۱/۵	h/T=۲/۲۵	h/T= ۳	h/T=۱/۵	h/T=۲/۲۵	h/T= ۳	h/T=۱/۵	h/T=۲/۱۴	h/T= ۳		سرعت (m/s)
۰/۱۴۲	۰/۱۱۶	۰/۱۰۱	۰/۱۴۲	۰/۱۱۶	۰/۱۰۱	۰/۱۴۲	۰/۱۱۹	۰/۱۰۱	Fnh	۰/۱۵
۰/۲۰۸	۰/۱۷	۰/۱۴۷	۰/۲۰۸	۰/۱۷	۰/۱۴۷	۰/۲۰۸	---	۰/۱۴۷	Fnh	۰/۲۳
۰/۲۷۳	۰/۲۲۳	۰/۱۹۳	۰/۲۷۳	۰/۲۲۳	۰/۱۹۳	۰/۲۷۳	۰/۲۲۹	۰/۱۹۳	Fnh	۰/۳
۰/۳۳۹	۰/۲۷۷	۰/۲۴	۰/۳۳۹	۰/۲۷۷	۰/۲۴	۰/۳۳۹	۰/۲۸۴	۰/۲۴	Fnh	۰/۳۷
۰/۴۰۵	۰/۳۳	۰/۲۸۶	۰/۴۰۵	۰/۳۳	۰/۲۸۶	۰/۴۰۵	۰/۳۳۹	۰/۲۸۶	Fnh	۰/۴۴
۰/۴۷	۰/۳۸۴	۰/۳۳۳	۰/۴۷	۰/۳۸۴	۰/۳۳۳	۰/۴۷	۰/۳۹۴	۰/۳۳۳	Fnh	۰/۵۱
	۰/۴۳۸	۰/۳۷۹		۰/۴۳۸	۰/۳۷۹		۰/۴۴۹	۰/۳۷۹	Fnh	۰/۵۸
		۰/۴۷۲			۰/۴۷۲			۰/۴۷۲	Fnh	۰/۶۵

جدول ٤- ماتریس پارامترهای تست برای مدل با آبخور $T=43$ میلیمتر و ضریب ظرافت بدنه $C_B=0.6$ (عمق حوضچه به میلیمتر میباشد)

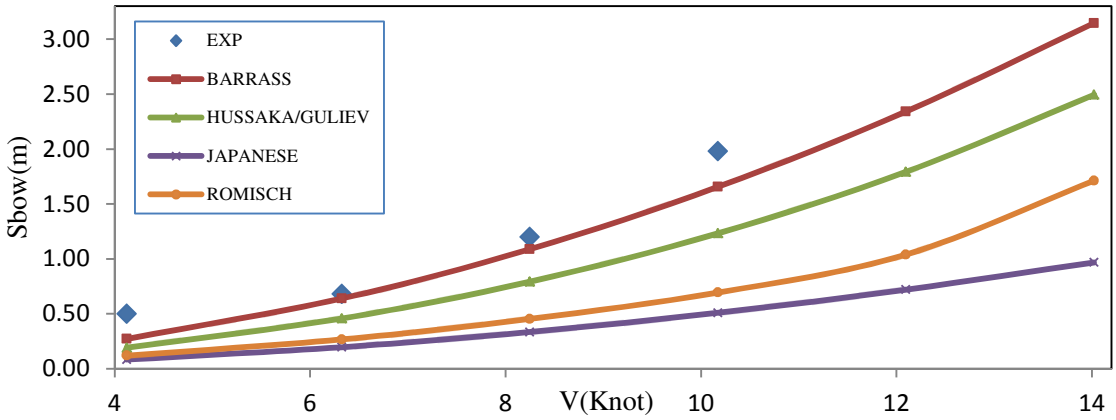
W/B= ۲/۹			W/B= ۳/۹۹			W/B= ۵/۱۲				
h=۶۴/۵	h=۹۶/۷۵	h=۱۲۹	h=۶۴/۵	h=۹۶/۷۵	h=۱۲۹	h=۸۶	h=۱۰۷/۵	h=۱۲۹	h=۱۷۱/۱۴	
h/T=۱/۵	h/T=۲/۲۵	h/T=۳	h/T=۱/۵	h/T=۲/۲۵	h/T=۳	h/T=۲	h/T=۲/۵	h/T=۳	h/T=۳/۹۸	سرعت (m/s)
۰/۱۹۴	۰/۱۵۸	۰/۱۳۷	۰/۱۹۴	۰/۱۵۸	۰/۱۳۷	۰/۱۶۸	---	---	۰/۱۱۹	۰/۱۵
۰/۳۷۳	۰/۳۰۴	۰/۲۶۴	۰/۳۷۳	۰/۳۰۴	۰/۲۶۴	۰/۳۲۳	۰/۲۸۸	۰/۲۶۴	۰/۲۲۹	۰/۳
۰/۴۶۲	۰/۳۷۷	۰/۳۲۷	---	---	---	---	---	۰/۳۲۷	---	۰/۳۷
---	۰/۴۵	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۳۹		۰/۴۷۸	۰/۴۲۷	۰/۳۹	۰/۳۳۹	۰/۴۴
		۰/۴۵۴			۰/۴۵۴	---	---	۰/۴۵۴	---	۰/۵۱
									۰/۴۴۹	۰/۵۸



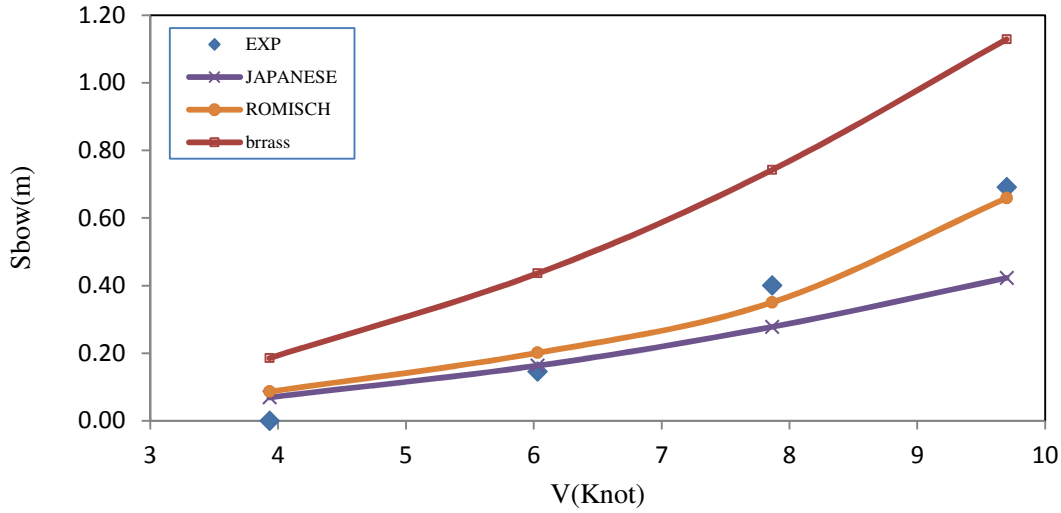
شکل ٤- نمونه اندازه‌گیری تغییر آبخور در سینه و پاشنه کشتی با ضریب ظرافت بدنه $C_B=0.8$ در $Fnh=0.223$، $h/T=2.25$ و $W/B=2.91$

برای حصول اطمینان از صحت نتایج تست‌ها، مقایسه محدودی صورت گرفته است. شکل‌های ۵ و۶ مقایسه اسکوات در سینه کشتیهای مختلف اندازه‌گیری شده را با نتایج رابطه‌های تجربی نشان می‌دهد. با یک نگاه اجمالی می‌توان گفت که نتایج تست‌ها و نتایج رابطه Barrass و Romisch بیشتر بهم نزدیک هستند. البته نباید فراموش کرد که اگرچه روند کلیه رابطه‌ها در ارائه اسکوات مشابه است ولی تفاوت بین رابطه‌ها بسیار چشمگیر می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]



شکل ۵- مقایسه مقدار اسکوات در سینه شناور محاسبه شده از نتایج تست با رابطه‌های مختلف برای کشتی به طول ۳۰۰ متر، عرض ۴۰ متر، آبخور ۱۶ متر و C_B=0.8 در BR=0.227



شکل ٦- مقایسه مقدار اسکوات در سینه شناور محاسبه شده از نتایج تست با رابطه‌های مختلف برای کشتی به طول ۱٦۰ متر، عرض ۲٦ متر و آبخور ۷.۸۲ متر و C_B=0.6 در BR=0.2247

۴- استخراج رابطه تجربی با روش رگراسیون

برای اینکه بتوان یک رابطه رگراسیونی فراگیر استخراج نمود بهتر آنست که پارامترهای بکار رفته در رابطه بی بعد باشند. برای این منظور پارامترهای بی بعد به شرح جدول۵ در این تحقیق تعریف شده است تا در صورت لزوم از آن‌ها استفاده شود.

اسکوات کشتی به عمق و عرض کانال، سرعت مدل، ضریب ظرافت بدنه کشتی و ضریب انسداد وابسته بوده و می‌توان برای آن روابط زیر را پیشنهاد نمود که به صورت تقریبی داده‌های استخراج شده از آزمایشات را نتیجه می‌دهد. ضریب انسداد را می‌توان با دو پارامتر بی‌بعد جداگانه $\frac{W}{B}$ و $\frac{h}{T}$ نیز تعریف نمود. با عنایت به این موضوع، رابطه (۵) مبنای استخراج رابطه تجربی در این تحقیق قرار داده شد.

$$S^* = f_1(\frac{W}{B}).f_2(F_n).f_3(C_B).f_4(\frac{h}{T}) \quad (۱۰)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

جدول ۵- معرفی پارامترهای بی بعد

پارامتر بی بعد	توضیح
W/B	نسبت عرض کانال به عرض کشتی
S*=S/h	اسکوات مقطع میانیکشتی نسبت به عمق کانال
t*=t/h	نسبت تریم به عمق کانال
S^*_{bow}=δTF*=DeltaTFore/h	نسبت تغییر آبخور در سینه به عمق کانال
BR	ضریب انسداد
h/T	نسبت عمق کانال به آبخور
F_{nh}	عدد فرود هیدرولیکی

فرآیند تعیین رابطه رگراسیونی بر مبنای آمار تست‌ها است لذا استفاده از نتایج تست بیشتر ودقیق‌تر موجب ارائه تابع تقریب دقیق‌تر می‌شود وشباهت هر چه بیشتر تابع به آمار تجربی اساس تعیین آن است. در نتیجه در صورت وجود تعدادی آمار غیر واقعی در کل مجموعه آمار، از دقت رگراسیون کاسته می‌گردد. فیلتر سازی آمار بعد از تست در دو مرحله صورت گرفته است. در ابتدایی‌ترین گام، فیلم‌های هر آزمایش به دفعات مورد بازبینی قرار گرفته و در صورت وجود نقص یا تردید در مورد صحت آزمایش، آن داده از مجموعه کنار گذاشته شد. البته این امر شامل برخورد سینه یا پاشنه مدل با کف کانال نیز می‌باشد. در گام بعدی این آمار با سایر روابط تجربی مقایسه شد.

برای هر یک از مدل‌های مورد آزمایش یک رابطه مستقل رگراسیونی استخراج و ارائه گردید. یعنی ابتدا با فرض ضریب ظرافت بدنه ثابت نسبت به استخراج رابطه برای هر مدل اقدام گردیده است. بر این اساس ابتدا یک فرم مناسب تابع رگراسیونی (که در اینجا رابطه (۵) ترجیح داده شد) انتخاب گردید. یک محدوده مناسب برای ضرایب f_1 تا f_4 حدس زده می‌شود و یک گام تغییرات کوچک به هر یک از آن‌ها نسبت داده می‌شود. هر ضریب فرض شده منجر به یک تابع تخمین می‌شود. در عمل در یک اجرا برنامه صدها هزار تابع تقریب فرض می‌شود و هر یک با نتایج تست‌ها به صورت مجزا مقایسه می‌شود. تابع تخمینی که شباهت و نزدیکی بیشتری به کل مجموعه آمار آزمایشگاهی داشته باشد به عنوان تابع تخمین نهایی انتخاب می‌شود. معیاری که با آن تابع تقریب‌ها ارزیابی می‌شوند، مجموع مربع تفاضل آمار آزمایشگاهی بامقدار نظیر تابع تخمین است. هرچه این مقدار برای یک تابع تخمین مشخص کمتر باشد مقادیر آن تابع به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تری باشد. نکته برجسته در استخراج رابطه رگراسیونی مناسب، انتخاب فرم مناسب برای تابع تخمین و محدوده مناسب برای ضرایب است. برنامه‌ای کامپیوتری در قالب نرم افزار MATLAB تدوین گردید. بر اساس معیار مجموع مربع تفاضل آمار آزمایشگاهی با مقدار نظیر رابطه رگراسیونی، دو پارامتر واریانس[۳] RMSE و فاکتور رگراسیونی[۴] R-square برای تابع تقریب نهایی محاسبه شد. در حالت ایده‌آل RMSE=0 و R-square=1 تابع تقریب دقیقاً از آمار آزمایشگاهی عبور می‌کند.

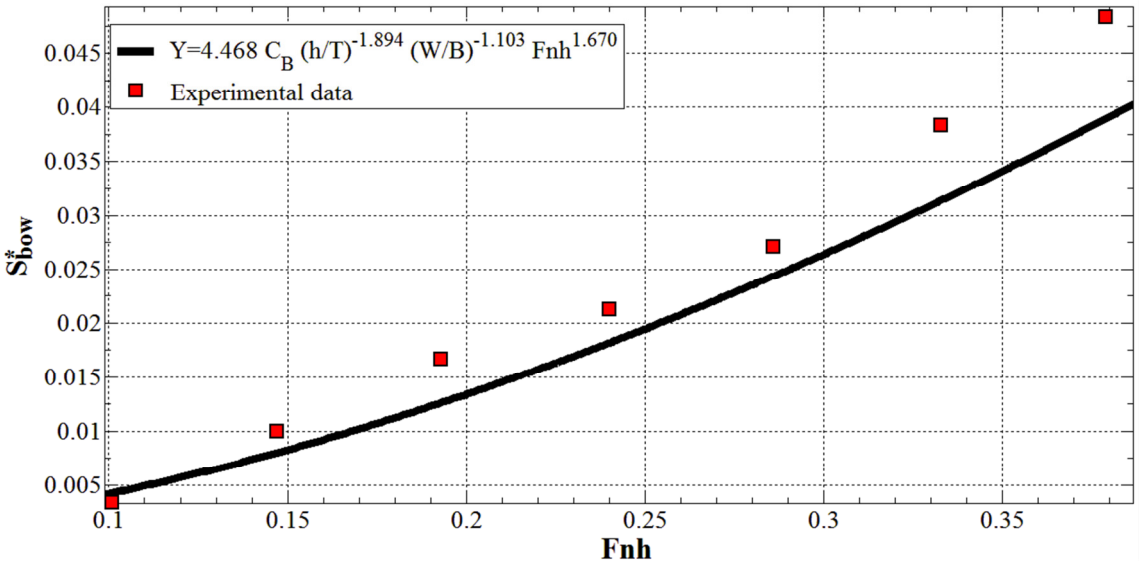
۴-۱- رابطه برای مدل C_B=0.8

نتیجه خروجی برنامه رابطه رگراسیونی زیر با دقت RMSE=0.0074 و R-Square=0.9554 می‌باشد:

$$S^* = 4.468C_B(\frac{h}{T})^{-1.894}(\frac{W}{B})^{-1.103}F_{nh}^{1.67} \quad (۱۱)$$

شکل ۷ رابطه (۱۱) را با نتایج تست برای یک کشتی مشخص نشان می‌دهد که به نظر قابل قبول می‌رسد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]



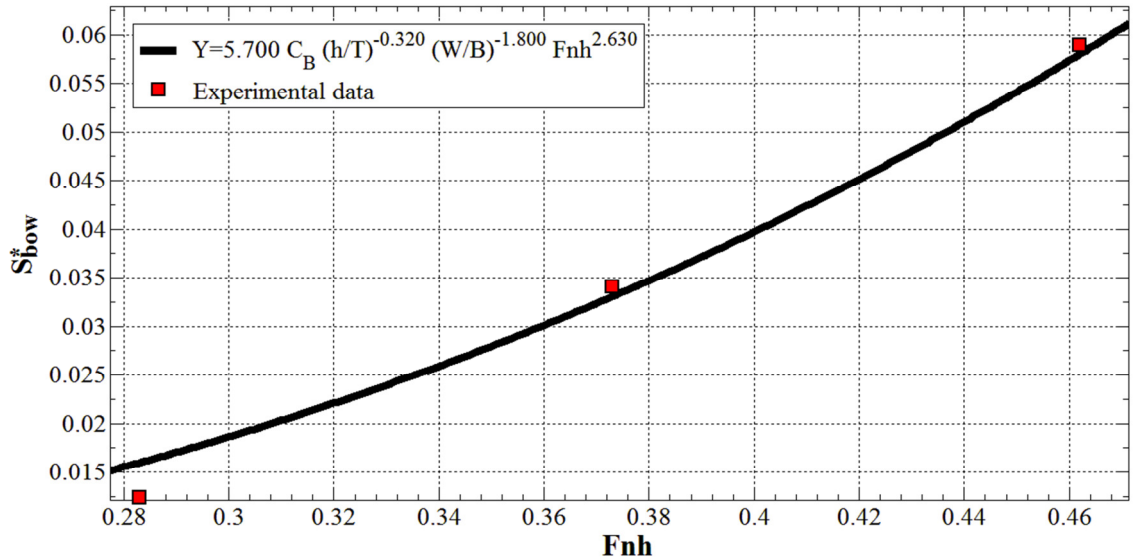
شکل ۷- مقایسه اسکوات بی‌بعد در سینه شناور از نتایج آزمایش با تابع تقریب محاسبه شده برای مدل C_B=0.80 با BR=0.157، h/T=3.0 و W/B=2.10

۴-۲- رابطه برای مدل C_B=0.6

نتیجه خروجی برنامه رابطه رگراسیونی زیر با دقت RMSE=0.0059 و R-Square=0.9196 می‌باشد:

$$S^* = 5.7C_B(\frac{h}{T})^{-0.32}(\frac{W}{B})^{-1.8}F_{nh}^{2.63} \qquad (۱۲)$$

شکل ۸ رابطه(۱۲) را با نتایج تست را برای یک کشتی معین مورد مقایسه قرار می‌دهد که نسبتاً قابل قبول می‌باشد.



شکل ۸- مقایسه اسکوات بی‌بعد در سینه شناور از نتایج آزمایش با رابطه رگراسیونی محاسبه شده برای مدل CB=0.60 با BR=0.225، h/T=1.5 و W/B=2.90

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

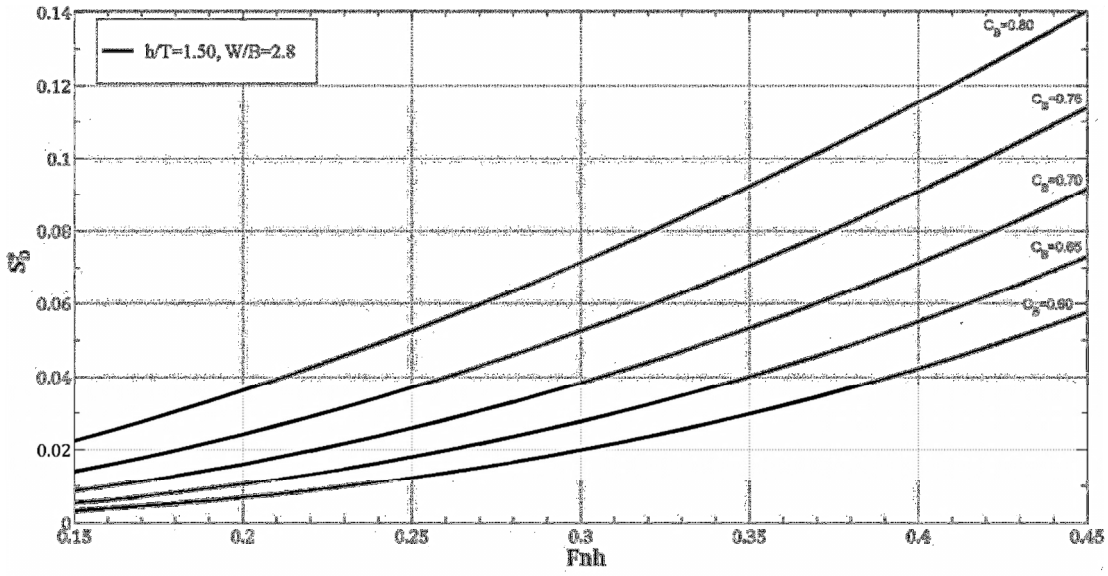
۴-۳- رابطه عام برای کلیه ضرایب ظرافت بدنه

از آنجا که مدل‌های سری ۶۰ موردآزمایش دارای فرم بدنه تجاری می‌باشند، با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) تلاش شد برای تخمین اسکوات کشتی‌های تجاری با ضریب ظرافت بدنه در بازه$0.6 \leq C_B \leq$ 0.8یک رابطه رگراسیونی تعیین شود. البته لازم است تا تست‌ها برای ضرایب ظرافت بدنه بیشتری انجام شود تا بتوان رابطه رگراسیونی با قابلیت اعتماد بیشتری استخراج نمود.با توجه به محدودیت هندسی کانال و روابط (۱۱) و (۱۲) رابطه رگراسیونی زیر برای تخمین اسکوات سینه کشتی پیشنهاد می‌گردد.

$$S^* = (-6.16\,C_B + 9.396) C_B \left(\frac{h}{T}\right)^{-7.87\,C_B+4.4} \left(\frac{W}{B}\right)^{3.485\,C_B-3.891} F_{nh}{}^{-4.8\,C_B+5.51} \qquad (۱۳)$$

برای اینکه رابطه فوق نتایج درون‌یابی روابط مذکور را نشان دهد، محدوده اعتبار رابطه فوق در بازه عدد فرود هیدرولیکی $0.15 \leq F_{nh} \leq 0.45$، نسبت عرض کانال به عرض کشتی$2.8 \leq W/B \leq 3.8$، نسبت عمق کانال به آبخور $1.5 \leq h/T \leq 3$ در نظر گرفته شده است. در غیر این صورت این رابطه جنبه برون یابی پیدا کرده و احتمالاً نتایج رضایت بخشی را نخواهد داد.

رابطه (۱۳) در بازه ضریب ظرافت بدنه$0.6 \leq C_B \leq$ 0.8 برای یک نمونه کانال در شکل ۷ ترسیم شده است. در این شکل افزایش اسکوات با افزایش ضریب ظرافت بدنه و همچنین افزایش شدید اسکوات با افزایش عدد فرود هیدرولیکی دیده می‌شود.



شکل ۹- نمونه نتایج رابطه رگراسیونی برای اسکوات سینه در کانالی با $W/B = 2.8$ و $h/T = 1.5$ برای کشتی‌هایی با ضریب ظرافت بدنه مختلف

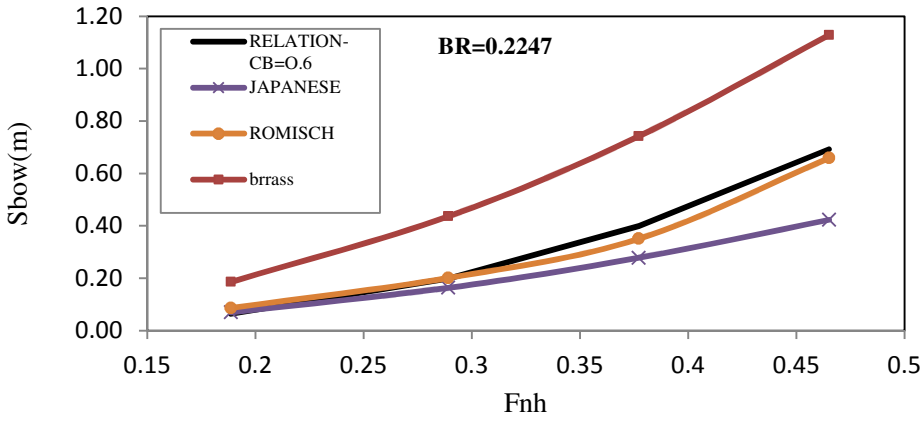
۴-۴- اعتبار سنجی رابطه تجربی

برای مقایسه روابط استخراج شده از این تحقیق با نتایج دیگر محققین لازم است مسئله یکسانی طرح گردد. سپس مقادیر پیشنهادی روش حاضر با نتایج محاسبه شده با دیگر روش‌ها مقایسه گردد. شکل۱۰مقایسه رابطه استخراج شده از این تحقیق برای کشتی در کانالی با h=11.729 متر، BR=0.2247، W/B=2.9 و h/T=2.9 برای کشتی با ضریب ظرافت بدنه ۰/۶ را با دیگر روابط نشان می‌دهد.

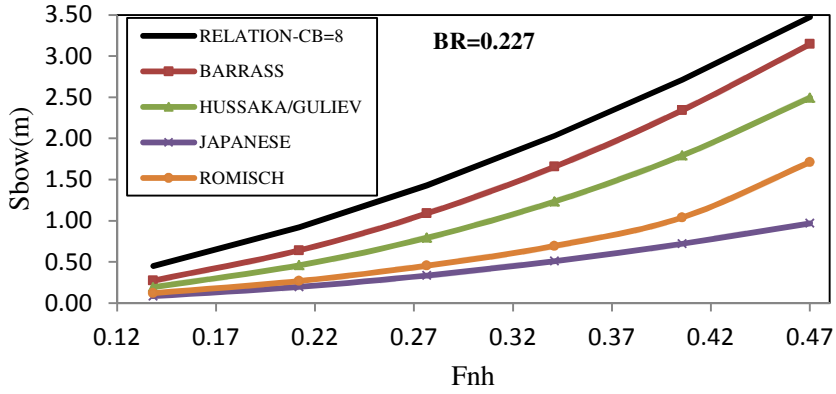
بطور کلی گرایش کلیه رابطه‌ها شبیه به یکدیگر است به طوریکه با افزایش عدد فرود هیدرولیکی اندازه اسکوات افزایش می‌یابد. ولی، اختلاف بین رابطه‌های مختلف قابل توجه می‌باشد. در حال حاضر رابطه ارائه شده به رابطه رومیش نزدیک‌تر است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

شکل ۱۱رابطه استخراجی از این تحقیق را برای یک کشتی با ضریب ظرافت بدنه ۰/۸و آبخور ۱۶ متر در عمق کانال ۲۴ متر و BR=0.2247 را با دیگر روابط مقایسه می‌کند. همانند مورد قبلی رفتار عمومی منحنی‌ها شبیه یکدیگر بوده و با افزایش عدد فرود هیدرولیکی اندازه اسکوات سینه کشتی افزایش می‌یابد، ولی تفاوت مقداری قابل توجه‌ای بین منحنی‌ها مشاهده می‌شود. رابطه استخراجی در این تحقیق به رابطه باراس نزدیک‌تر است.



شکل ۱۰- مقایسه رابطه ۸ برای مدل با C_B=0.6 در $W/B = 2.9$، $h/T = 1.5$ و $h = 11.727$



شکل ۱۱- مقایسه رابطه ۹ برایمدل با CB=0.8 در $W/B = 2.9$، $h/T = 1.5$ و $h = 24$

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحقیقی وسیع بر پایه روش مدل تست بر روی اسکوات کشتی انجام گردید. بر پایه این تحقیق رابطه تجربی جدیدی استخراج گردید. در بررسی و مقایسه رابطه استخراجی با دیگر روابط موجود نکات زیر حائز اهمیت است.

- محدوده بکارگیری رابطه استخراجی وسیع‌تر است به طوریکه اعداد فرود هیدرولیکی، نسبت عرض کانال به عرض کشتی و نسبت عمق کانال به آبخور بیشتری را پوشش می‌دهد.
- اگرچه روند کلی اسکوات در کلیه رابطه‌ها شبیه به یکدیگر است ولی تفاوت زیادی بین رابطه‌ها مشاهده می‌شود.
- بی‌تردید در مراحل اولیه طراحی کانال استفاده از رابطه‌های تجربی اجتناب‌ناپذیر است ولی در مراحل نهایی طراحی کانال تست مدل اختصاصی برای کانال تحت طراحی ضروری است. رابطه ارائه شده نیز می‌تواند در مرحله طراحی اولیه کانال در محدوده تعیین شده مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]

۶- کلید واژگان

1- Sinkage
2- Blockage
3- Root Mean Square error
4- Regression factor

۷-منابع و مراجع

1. Havelock, T.H., 1939, Note on the sinkage of a ship at low speeds, Z. Angew. Math. Mech. 19, 202{205}
2. Naval Facilities Engineering Command, 1981, Harbors Design Manual 26.1.
3. Dand, I.W. and Ferguson, A.M., 1973, The squat of full ships in shallow water, Trans. RINA 115, p. 237 – 255.
4. Huuska, O., 1976, On the evaluation of underkeel clearances in Finnish Waterways, Helsinki University of Technology, Ship Hydrodynamics Laboratory, Otaniemi, Report No .9
5. Barrass, C.B., 1978, Ship Squat, Lorne and Maclean Publishers
6. Barrass, C. B., 1979, A unified approach to squat calculations for ships, PIANC Bulletin
7. Millward, A., 1990, A preliminary design method for the prediction of squat in shallow water, Marine Technology 27(1), p. 10-19.
8. Millward, A. 1992, A comparison of the theoretical and empirical prediction of squat in shallow water, International Shipbuilding Progress, 417, 39, 69.
9. Webb, D. W. and Wooley, R. T. 1998. Using DGPS Ship Transit Data for Navigation Channel Design, Proceedings, PORTS '98, ASCE, p. 1325-1332.
10. Gourlay, T. P. And Tuck, E. O., 2001, The maximum sinkage of a ship, Journal of Ship Research, 45, 1, 50.
11. Dunker,S., Gollenstede, A., Harting, A. and Reinking,J., 2002, Analysis and Comparison of Ships – Derived Squat, Proceedings HydroKiel, 2002,p.434–449.
12. Barras, C.B., 2004, Thirty-Two Years of Research into Ship Squat, Squat-WorkshopAspects of Underkeel Clearance in Analysis And Application.
13. Gucma L., 2005, Risk Modelling of Ship Collisions Factors with Fixed Port and OffshoreStructures, Maritime University of Szczecin, Szczecin
14. Gourlay, T., 2007, Ship Underkeel Clearance in Waves, Proc. Coasts and Ports, Melbourne.
۱۵. حمید زراعتگر، روزبه پناهی، شهروز معصومی، محسن اصغری، ۱۳۹۰، مروری بر تحقیقات صورت گرفته در مورد پدیده اسکوات و مقایسه روابط ارائه شده جهت پیش بینی اسکوات، سیزدهمین همایش صنایع دریایی، کیش، ایران
16. Guliev, U. M., 1971, On squat calculations for vessels going in shallow water and through channels, PIANC Bulletin 1(7), p. 17–20.
17. Japanese, Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2002, Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan.
18. Romisch, K., 1989, Empfehlungenzur Bemessung von Hafeneinfahrten. Wasserbauliche Mitteilungen der Technischen Universitat Dresden, Heft 1, p. 39-63.
19. Zeraatgar H., Akbarivakilabadi K., Yousefnejad A., 2011, Parametric Analysis of Ship squat in Shallow water, Brodogradnja, 62-1.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.5.8]