تخمین نیروهای هیدرودینامیکی در اعضای استوانه‌ای با سطح صاف تحت اثر مشترک امواج تصادفی و جریان پایا

مرتضی نقی‌پور* و مسعود رئوفی**

گروه عمران دانشکدهٔ فنی، دانشگاه مازندران

(دریافت مقاله: ۷۷/۸/۳ - دریافت نسخهٔ‌نهایی: ۷۸/۱۰/۲۲)

چکیده - *اغلب آیین نامه‌ها نظیر API و BSI معادلهٔ موریسون را برای تخمین نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر سازه‌های دریایی توصیه می‌کنند. تفاوتهای عمده‌ای که در به کارگیری از این آیین نامه‌ها مشاهده می‌شود عمدتاً ناشی از نحوهٔ محاسبه و تخمین ضرایب نیروست. این تحقیق براساس داده‌های آزمایشها با مقیاس بزرگ برای بررسی اثرات امواج تصادفی و جریان یکنواخت بر پایه‌های استوانه‌ای صاف انجام گرفته است.*

در مقالهٔ حاضر از چهار روش تحلیلی دامنهٔ زمانی و فرکانسی برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و سپس تعیین نیروهای هیدرودینامیکی استوانه‌های صاف، استفاده شده است و ملاحظه شدکه روش تحلیلی تطابق سریهای زمانی نیرو نسبت به سه روش دیگر از دقت بالاتری برخوردار بوده و نیز، خطاهای ناشی از تخمین نیروهای وارد بر پایه‌های صاف بیشتر از پایه‌های زبر است.

Estimation of Hydrodynamic Forces on the Cylinderical Smooth Piles to Random Waves and Currents

M. Naghipour and M. Raoufi

Department of Civil Engineering, Mazandaran University

ABSTRACT- *Most Codes such as API and BSI recommend Morison's equation to estimate hydrodynamic forces on offshore structures. Significant differences exist among these Codes due to using different methods of analysis and estimation of force coefficients. In this paper, data from full scale tests have been used to evaluate random waves and uniform current actions on the smooth piles.*

Four time and frequency domain analysis methods were used to estimate C_d & C_m. Force Time Series Fitting Method (LS-TS) has given better results than the others. Furthermore, the errors from estimating hydrodynamic forces on smooth piles are more than those on rough piles.

---

*- استادیار **- کارشناس ارشد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

فهرست علائم

a_x	شتاب افقی در راستای محور طولی (راستای پیشروی امواج)
C_d	ضریب درگ یا پسا
C_m	ضریب اینرسی
C_{ij}	قسمت موهومی طیفهای ممزوج مربوط به پارامترهای i و j
CS	روش تحلیلی تطابق طیفهای ممزوج تراز سطح - نیرو، سرعت و شتاب افقی ذرات آب
d	عمق آب
D	قطر استوانه
e_i	خطای تخمین پیک نیروی امواج در هر موج منفرد
f	نیروی موریسون، نیروی موج در واحد طول پایه استوانه‌ای
f_e	نیروی پیک تخمینی در هر موج منفرد
f_m	نیروی پیک اندازه‌گیری شده در هر موج منفرد
g	شتاب جاذبهٔ زمین
H	ارتفاع موج
H_{rms}	ارتفاع جذر میانگین مربعات
i,j	مشخصه پارامترهای سرعت افقی، شتاب افقی، نیروی موج و تراز سطح آب
$S_i(\omega)$	طیف مربوط به پارامتر i
$S_{ij}(\omega)$	طیف ممزوج مربوط به پارامترهای i و j
s	تراز سطح آب (پروفیل موج) نسبت به تراز آب در حالت ساکن
t	زمان (ثانیه)
T	پریود موج
T_z	پریود گذر از صفر یک موج منفرد
u	سرعت ذرات آب
$\dot{u}$	شتاب ذرات آب
U	سرعت جریان پایا
WW-TS	روش تحلیلی تطابق موج به موج به شیوهٔ جذر میانگین مربعات
x	مختصهٔ افقی
z	مختصهٔ عمودی
η	پروفیل موج یا تراز سطح آب
ω_i	فرکانس موج ($\omega=2\pi/T$)
∂	علامت مشتق جزئی
θ	kx-ωt
ρ	جرم حجمی آب
σ_u	انحراف معیار
k	عدد موج ($2\pi/l$)
KC	ضریب زبری
K_D	عدد کولگان کارپنتر
K_m	ضریب مربوط به محاسبهٔ ضریب درگ در روش طیفی ممزوج
LS-FS	ضریب مربوط به محاسبه ضریب اینرسی در روش طیفی ممزوج
LS-TS	روش تحلیلی تطابق طیفهای ممزوج تراز سطح - نیرو، سرعت و شتاب افقی ذرات آب
MNE	خطای میانگین
N	تعداد داده‌های مورد نظر در محاسبهٔ ضرایب هیدرودینامیکی
Q_{ij}	قسمت حقیقی در طیفهای ممزوج مربوط به پارامترهای i و j
R	نسبت قابلیت اعتماد
RMSE	خطای جذر میانگین مربعات

۱ - مقدمه

در عصر حاضر آدمی سعی دارد تا حد امکان بر منابع انرژی موجود در زمین تسلط یابد و این هدف با توجه به فن‌آوریهای پیشرفته کنونی امری دور از انتظار نیست. امروزه برای اکتشاف و بهره‌برداری از ذخایر مواد نفتی فراساحل، سازه‌های دریایی متنوعی طراحی شده و به کار برده می‌شود. سکوهای برج مانند[1] و خودبرپاشونده[2] نمونه‌ای از این سازه‌های دریایی‌اند که این سکوها بر روی پایه‌های استوانه‌ای لاغری مستقر می‌شوند. آیین‌نامه‌هایی نظیر API (انستیتوی نفت آمریکا)، BSI (انستیتوی تحقیقات انگلستان) و NPD (راهنمای نفت نروژ) در طراحی چنین سکوهایی معادله موریسون [۱] را برای تخمین نیروی امواج پیشنهاد کرده‌اند. با اینکه معادلهٔ موریسون یکی از متداولترین مدلهای تخمین نیروی امواج است. با این وجود دربردارندهٔ خطاهایی است که از دید طراح نبایستی دور بماند. از جمله این خطاها می‌توان به خطاهای ناشی از تخمین نیروی امواج در استفاده از مدل نیروی موریسون، تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و سینماتیک ذرات آب (سرعت و شتاب) اشاره کرد. هدف از بررسیهای انجام شده در این مقاله تعیین خطاهای ناشی از منابع مختلف است. با تعیین خطاهای ناشی از روشهای مختلف می‌توان پارامترهای بهینه را برگزید.

در طی چنددههٔ گذشته برای تعیین ضرایب C_d و C_m مربوط به معادلهٔ موریسون، آزمایشهای متعددی در مقیاسهای کوچک و بزرگ صورت گرفته است. هر چه در این آزمایشها مقیاس و اندازهٔ مدلهای آزمایشی به ابعاد واقعی نزدیکتر باشد به همان اندازه مقادیر به دست آمده برای ضرایب C_d و C_m خصوصیات طبیعی سازه و امواج را بهتر توصیف می‌کنند. در این راستا در سری آزمایشهایی که در سال ۱۹۹۳ میلادی در آزمایشگاه هیدرولیک دلفت[3] هلند به عمل آمده است، مدلهای با مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. تحقیق حاضر براساس داده‌های مربوط به این سری از آزمایشهاست.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

در آزمایشهای انجام شده توسط ایساکسون و همکارانش چند روش تحلیلی برای تخمین ضرایب نیروی هیدرودینامیکی به کار برده شده است و درنهایت قابلیت این روشها ارزیابی شده است [۳-۵]. در آزمایشهای مذکور، شبیه‌سازی امواج با استفاده از مدلهای رایانه‌ای انجام شده است. از جمله روشهایی که در آزمایشهای اخیر نتایج نسبتاً منطقی داشته‌اند عبارت‌اند از:

۱- روش تحلیلی تطابق موج به موج به روش کمترین مربعات WW-LS

۲- روش تحلیلی تطابق سریهای زمانی نیرو به روش کمترین مربعات LS-TS

۳- روش تحلیلی تطابق طیفهای نیرو به روش کمترین مربعات LS-FS

۴- روش تحلیلی تطابق طیف ممزوج CS

البته چون در آزمایشهای مذکور امواج و پارامترهای مربوط به آن (نظیر تراز سطح، نیرو و سینماتیک افقی ذرات آب) به صورت رایانه‌ای مدل شده‌اند از این رو نتایج به دست آمده بیانگر شرایط واقعی امواج و میدان جریان نخواهد بود. لذا در مورد استوانه‌های صاف موجود، از چهار روش اخیر در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی استفاده شده است تا خطاهای حاصل از تخمین این ضرایب برای هر یک از روشها محاسبه ودقت آنها مورد ارزیابی قرار گیرد. روشهای مزبور در تحلیل داده‌های مربوط به استوانه‌های زبر (در آزمایشگاه دلفت) نیز اعمال شده است. نتایج این بررسیها به عنوان معیاری برای ارزیابی اثرات زبری پایه‌ها قابل استفاده است [۶].

از جمله مزایای مطالعات آزمایشگاهی، می‌توان به قابلیت اندازه‌گیری مستقیم نیروی موج، سرعت و شتاب ذرات آب و همچنین تراز سطح آب اشاره کرد. البته در آزمایشهای حاضر مقادیر شتاب با مشتقگیری از سریهای زمانی سرعت تعیین می‌شود. برای تعیین نیروهای درگ و اینرسی، مقادیر نیروی امواج در ترازهای یکسانی با سرعت افقی اندازه‌گیری می‌شوند. با این حال برای آزمایشهایی که در میدانهای موج واقعی (در دریا) صورت می‌گیرد چنین اندازه‌گیریهایی به سهولت قابل انجام نبوده و اندازه‌گیری پریود و دامنهٔ امواج به راحتی امکانپذیر است. از این رو سینماتیک ذرات آب برای شرایط دور از ساحل بایستی توسط نظریه‌های موج تخمین زده شوند. به دلیل استفاده از نظریه‌های موج، این تخمینها در بردارندهٔ خطا و پراکندگی‌اند.

در داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، دو پارامتر تراز سطح آب و سرعت ذرات آب اندازه‌گیری شده‌اند و بنابراین شرایط برای مقایسهٔ مابین سینماتیکهای اندازه‌گیری شده و همچنین مقادیر به دست آمده از نظریه موج خطی و نظریه مرتبهٔ پنجم استوکس (به روش فنتون) امکانپذیر شده است.

از طرفی لازم است برای تعیین صحت تخمینهای به عمل آمده معیاری در اختیار داشت تا به بررسی چگونگی تخمین نیروی موج با روشهای مختلف پرداخت. برای این منظور جذر میانگین مربعات خطاهای نرمال به عنوان اولین معیار صحت تخمین استفاده شده است. میانگین خطاهای نرمال نیز دومین معیار برای ارزیابی دقت تخمین نیرو و ضرایب است.

در ادامه مطالب بیان شده در بخش دوم پیرامون آزمایشهایی که در آزمایشگاه دلفت هلند انجام گرفته است توضیحاتی داده شده است. در بخش سوم روشهای تحلیلی به کار برده شده در این تحقیق، برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی بیان می‌شود. بخش چهارم به توضیحاتی در مورد روشهای تخمین سینماتیک ذرات آب اختصاص یافته است. معیارهای تعیین صحت تخمین پارامترها در بخش پنجم ارائه شده است. در بخش ششم نتایج حاصل از پردازشهای انجام شده را بیان کرده و بحث و بررسی بر روی این نتایج نیز در بخش هفتم شرح داده شده است. خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده در بخش هشتم بیان شده است.

۲- بیان آزمایشها

در ماههای سپتامبر و اکتبر سال ۱۹۹۳ میلادی یک سری از آزمایشها در مقیاس بزرگ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه دلفت هلند انجام پذیرفت. این آزمایشها با مشارکت برخی از مراکز تحقیقاتی و همچنین چند دانشگاه معتبر صورت گرفته است [۲]. هدف از انجام این آزمایشها بررسی نیروهایی است که از جانب امواج و نیز جریانهای دریایی بر روی پایه‌های استوانه‌ای سازه‌های دریایی وارد می‌شود. این آزمایشها در کانال موج دلتا به انجام رسیده است. مقطع کانال U شکل بوده و طول آن ۲۵۰ متر، عرض و ارتفاع آن به ترتیب 5 و 7 m است. عمق آب در تمامی آزمایشها در حدود

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

5 m تنظیم شده و امواج منظم و تصادفی با حرکات برنامه‌ریزی شده یک مولد موج ایجاد شده است. برای مستهلک ساختن انرژی امواج از سطح شیبدار بتنی (ساحل بتنی) که در انتهای دیگر کانال تعبیه شده بود استفاده شده است. امواج تولید شده دارای پریودهایی در حدود 3 تا 10 sec بوده و ارتفاع امواج در این محدوده از پریودها بالغ بر 2 m است.

برای آزمایشهای موج تصادفی، از طیف پروژهٔ مشترک موج دریای شمال[۴] استفاده شده است [۷]. نتایج به دست آمده در این مقاله برای آزمایشهایی است که امواج تصادفی با تاجهای طویل و با ارتفاع مشخصهٔ 1.5 m و پریود پیک 5.9 sec صورت گرفته است.

در قسمتهای فوقانی دودیواره کانال ریلهای طولی نصب شده است که امکان حرکت ماشین یدک‌کش را فراهم می‌سازد. این یدک‌کش دارای ابعاد 6 m در 8 m بوده و استوانهٔ متحرک به آن متصل شده است. حرکت استوانه در طول کانال به غیر از فواصل ابتدایی و انتهایی حرکت یدک‌کش، در سرعتهای ثابتی صورت گرفته است. در داده‌های به کار برده شده، سرعت حرکت استوانه برابر ±0.5 m/s است. لازم به ذکر است شبیه سازی جریان دریایی در دو حالت مثبت ومنفی، با حرکت دادن پایه‌ها صورت گرفته است. به طوری که هرگاه یدک‌کش در جهت پیشروی امواج حرکت داده شود جریان مثبت و اگر حرکت در خلاف جهت حرکت امواج باشد در این حالت جریان منفی خواهد بود.

بیشترین فاصلهٔ حمل استوانه‌ها با استفاده از یدک‌کش برابر 110 m است. در شکل (۱) مقطع طولی و پلان کانال موج به همراه مقطع عرضی کانال موج نشان داده شده است. در این شکل موقعیت ساحل بتنی، مولد موج و استوانهٔ ثابت به همراه وضعیت استوانه متحرک قابل مشاهده است. برای فراهم کردن سریهای زمانی پارامترهای اندازه‌گیری شده به ازای چند دقیقه (مثلاً 10 min) لازم است چندین بار حرکت رفت و برگشت یدک‌کش تکرار شود. در این آزمایشها از دو نوع استوانه ثابت و متحرک استفاده شده است. استوانه‌های مورد آزمایش در دو نوع صاف و زبر بودند که زبری نسبی آنها به ترتیب برابر K/D=0.00012 و K/D=0.038 است (به طوری که K ضخامت متوسط زبری سطح پایه‌ها و D قطر پایه‌ها است). لازم به ذکر است در مورد استوانه‌های با قطر 21 cm که با یک پوشش مجازی به صورت زبر در آورده شده‌اند، قطر مؤثر پایه‌ها به 21.5 cm افزایش یافته است.

در تحلیل حاضر شرایط جریانی که سرعت جریان یکنواخت در آنها برابر U=0 m/s، U=+0.5 و U=-0.5 m/s باشد، به ترتیب به اجراهای (۱)، (۲) و (۳) موسوم شده است. در جدول (۱) جزییات مربوط به هر یک از این اجراها از قبیل سرعت جریان یکنواخت، قطر پایه، تعداد امواج و همچنین محدودهٔ تغییرات پارامترهای R (نسبت قابلیت اعتماد [۱۲]) و KC (عدد کولگان-کارپنتر) نشان داده شده است.

۳- تخمین ضرایب نیروی هیدرودینامیکی

همچنان که قبلاً بیان شد معادلهٔ موریسون یکی از معادله‌های کارامد در تخمین نیروی امواج است. شکل عمومی این معادله به صورت زیر است:

$$f = 0.5\rho D C_D u\,|\,u\,| + \frac{\pi D^2}{4}\rho C_M \dot{u} \qquad (۱)$$

که در آن ρ، D، C_d و C_m به ترتیب جرم حجمی آب، قطر پایه استوانه‌ای و ضریب درگ و ضریب اینرسی‌اند. u و $\dot{u}$، سرعت و شتاب افقی ذرات آب و f مقدار نیروی حاصل از امواج در واحد طول پایه استوانه‌ای است. ضرایب هیدرودینامیکی موجود در این معادله بایستی از طریق آزمایشها و همچنین انجام بررسیهایی بر روی نتایج این آزمایشها تعیین شود [۱]. این بررسیها در حقیقت براساس روشهای تخمین ضرایب درگ، C_d و ضریب اینرسی، C_m، بنا شده است. در این قسمت از بیان مفصل چهار روش تحلیلی که برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی به کار برده شده‌اند صرف نظر کرده و صرفاً به توضیح اجمالی هر یک از آنها می‌پردازیم.

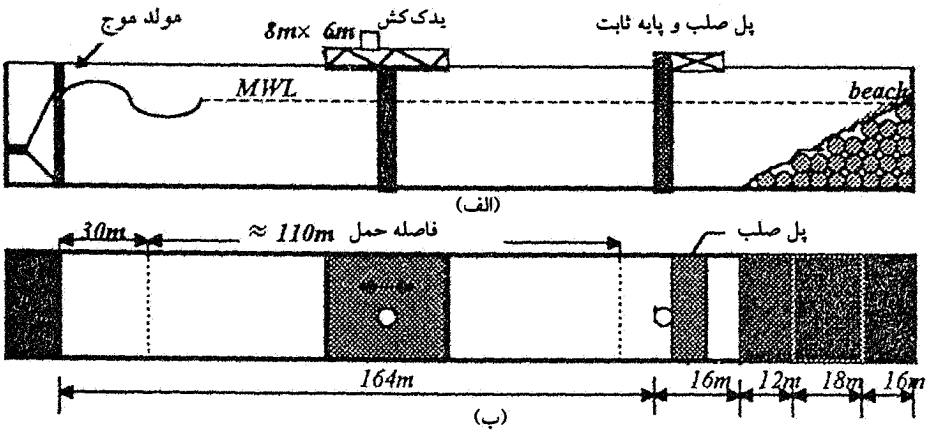
۳-۱- روش تحلیلی تطابق موج به موج با روش کمترین مربعات (WW-LS)

در روش تحلیل موج به موج، فرض بر این است که ضرایب C_d و C_m در طول هر یک از تک‌موجهای مربوط به کل تاریخچه‌های زمانی ثابت باشند. در این صورت به ازای هر تک موجی یک زوج ضریب C_d و C_m به دست می‌آید که در نهایت با محاسبهٔ میانگین این مقادیر ضرایب C_d و C_m متوسط به دست خواهند آمد. البته برای استفاده از این روش لازم است سریهای زمانی اندازه‌گیری شده

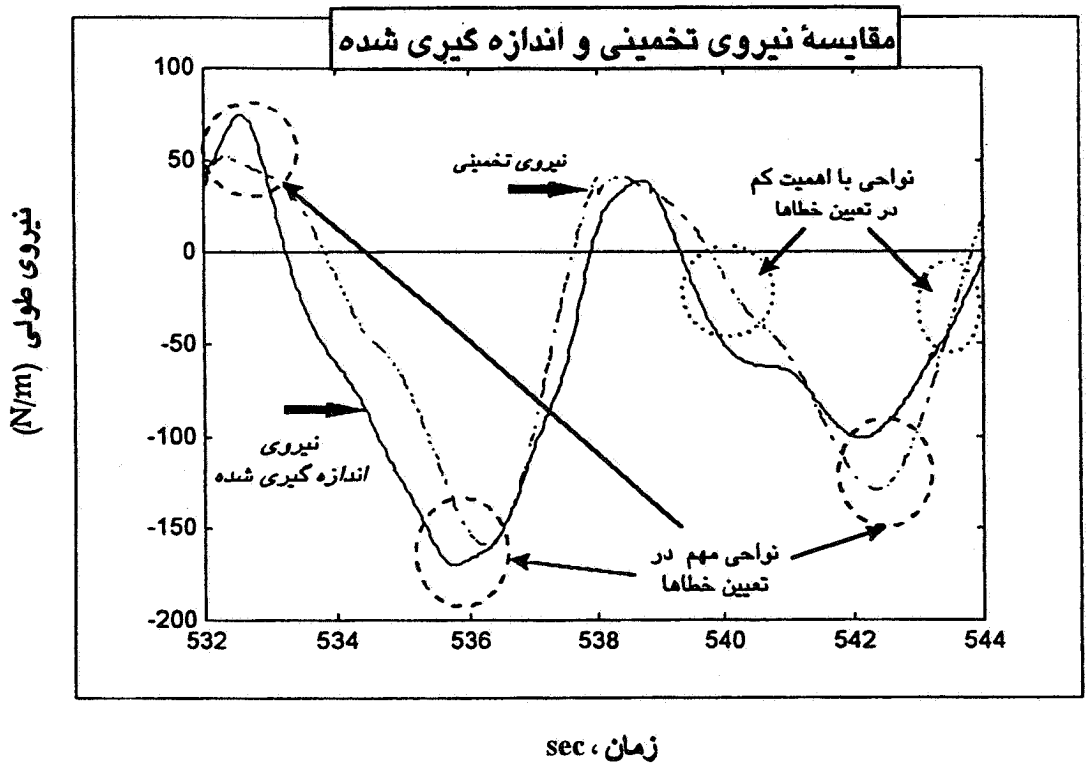
[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

جدول ۱- جزییات تمامی داده‌های آزمایشگاهی که مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

شمارهٔ اجرا	عنوان داده‌ها	سرعت‌جریان (m/s)	قطر پایه (mm)	تعداد نقاط داده‌ها	تعداد امواج	R			KC		
						max	mean	min	max	mean	min
اجرای ۱	v2fs0li	۰	۲۱۰	۲۴۰۸۰	۱۲۴	۴/۰	۱/۰۷۳	۰/۰۶	۲۷/۳۱	۹/۹۹	۰/۱۶
اجرای ۲	v20s0li	+۰/۵	۲۱۰	۲۴۱۱۷	۱۱۷	۱۱/۹۶	۴/۹۰	۱/۳۷	۳۴/۵۶	۱۲/۵۴	۰/۱۷
اجرای ۳	v20s0li	-۰/۵	۲۱۰	۲۴۰۵۰	۱۴۰	۹/۷۷	۳/۷۲	۰/۶۸	۲۱/۴۰	۱۲/۰	۲/۲۸



شکل ۱- مقطع طولی و پلان کانال موج دلتا (در آزمایشگاه هیدرولیک دلفت هلند)



شکل ۲- نمایش نقاط مهم در تعیین خطاهای ناشی از تخمین نیروی امواج و جریان یکنواخت

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

سرعت، شتاب و نیرو را در ترازهای متناظر در اختیار داشت. با استفاده از روش کمترین مربعات یا معادله‌های لازم برای رسیدن به معادله‌های تعیین کنندهٔ ضرایب هیدرودینامیکی به دست می‌آید:

$$C_D=\frac{\sum fu\,|u|\,\sum \dot{u}^2-\sum f\dot{u}\sum u\,|u|\,\dot{u}}{0.5\rho\pi D\left(\sum u^4\sum \dot{u}^2-\left(\sum \dot{u}\,|u|\right)^2\right)}$$

$$C_M=\frac{\sum f\dot{u}\sum u^4-\sum fu\,|u|\,\sum \dot{u}\,|u|\,u}{0.25\rho\pi D^2\left(\sum \dot{u}^2\sum u^4-\left(\sum \dot{u}\,|u|\right)^2\right)} \qquad (۲)$$

در معادله‌های بالا سیگماها به ازای N عدد از داده‌ها محاسبه می‌شوند. سرعت و شتاب در شرایط غیرآزمایشگاهی غالباً از سریهای زمانی تراز سطح موج و با استفاده از نظریه‌های موج به دست می‌آیند.

۳-۲- روش تحلیلی تطابق سریهای زمانی نیرو با روش کمترین مربعات (LS-TS)

در این روش فرض بر این است که مقادیر C_d و C_m در طول کل تاریخچه زمانی دارای یک مقدار ثابت‌اند و از این رو با در دست داشتن سریهای زمانی اندازه‌گیری شده u، $\dot{u}$ و f و به کارگیری روندی مشابه با آنچه در تحلیل موج به موج شرح داده شد، مقادیر C_d و C_m با استفاده از معادله‌های (۲) به دست می‌آیند. به طوری که در این حالت N به کار رفته در معادله‌های مذکور برابر تعداد کل نقاط موجود در داده‌های سریهای زمانی است.

۳-۳- تحلیل به روش تطابق طیفهای نیرو با استفاده از روش کمترین مربعات (LS-FS)

در این روش بنابر این است که از تطابق طیفهای نیرو به محاسبهٔ ضرایب C_d و C_m پرداخته شود. بدین صورت که با معلوم بودن سریهای اندازه‌گیری شده سرعت، شتاب و نیرو ابتدا با استفاده از روش تبدیل سریع فوریه[5]، سریهای زمانی هر پارامتری را به طیفهای متناظرشان تبدیل می‌سازند. با جاگذاری طیفهای سرعت، شتاب و نیرو در معادلهٔ خطی موریسون:

$$S_f(f)=\frac{8K_D^2\sigma_{\dot{u}}^2}{\pi}S_u(f)+K_M^2\,S_{\dot{u}}(f) \qquad (۳)$$

و با استفاده از روش کمترین مربعات، K_m و K_d به شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$K_M^2=\frac{\sum_{i=1}^{N}S_u(\omega_i)S_{\dot{u}}(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_u(\omega_i)S_f(\omega_i)-\sum_{i=1}^{N}S_u^2(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_{\dot{u}}\,\omega_i)S_f(\omega_i)}{\left(\sum_{i=1}^{N}S_u(\omega_i)S_{\dot{u}}(\omega_i\right)^2-\sum_{i=1}^{N}S_u^2(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_{\dot{u}}^2(\omega_i)} \qquad (۴)$$

$$K_D^2=\frac{\pi}{8\sigma_{\dot{u}}^2}\frac{\sum_{i=1}^{N}S_u(\omega_i)S_{\dot{u}}(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_{\dot{u}}(\omega_i)S_f(\omega_i)-\sum_{i=1}^{N}S_{\dot{u}}^2(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_u\,\omega_i)S_f(\omega_i)}{\left(\sum_{i=1}^{N}S_u(\omega_i)S_{\dot{u}}(\omega_i\right)^2-\sum_{i=1}^{N}S_u^2(\omega_i)\sum_{i=1}^{N}S_{\dot{u}}^2(\omega_i)} \qquad (۵)$$

بعد از انجام مراحل بالا، ضرایب C_d و C_m با استفاده از معادله‌های زیر تعیین می‌شوند:

$$K_D=0.5\rho DC_d\ ,\ \ K_M=0.25\rho\pi D^2C_m \qquad (۶)$$

لازم به ذکر است که مقدار به دست آمده برای هر یک از C_d و C_m، به ازای تمامی فرکانسهای طیفی، ثابت فرض شده است.

۳-۴- تحلیل به روش تطابق چگالی طیفی ممزوج[6]

در این روش برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی از تطابق طیفهای ممزوج، تراز سطح - نیرو، تراز سطح - سرعت و تراز سطح - شتاب استفاده می‌شود. ابتدا با در اختیار داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت و شتاب و نیروی موج وهمچنین تراز سطح موج، با استفاده از روش تبدیل سریع فوریه طیفهای ممزوج تعیین می‌شوند. سپس با جاگذاری مقادیر مربوط به هر یک از پارامترهای متناظر در معادلهٔ موریسون، خواهیم داشت [۸]:

$$S_{\eta f}(f)=\sqrt{\frac{8}{\pi}}K_D\sigma_u S_{\eta u}(f)+K_M S_{\eta\dot{u}}(f) \qquad (۷)$$

در معادلهٔ بالا $S_{\eta f}(f)$ و $S_{\eta u}(f)$ و $S_{\eta\dot{u}}(f)$ به ترتیب طیف ممزوج تراز سطح موج با نیرو، سرعت و شتاب‌اند. طیف ممزوج اخیر را از داده‌های اندازه‌گیری شده می‌توان تعیین کرد. هرکدام از این طیفها را می‌توان به دو جزء حقیقی و موهومی تقسیم کرد:

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

$$C_{\eta f} - iQ_{\eta f} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} K_D \sigma_u \left(C_{\eta u} - iQ_{\eta u}\right) + K_M \left(C_{\eta \dot{u}} - iQ_{\eta \dot{u}}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{8}{\pi}} K_D \sigma_u C_{\eta u} + K_M C_{\eta \dot{u}} - i \left(\sqrt{\frac{8}{\pi}} Q_{\eta u} + K_M Q_{\eta \dot{u}}\right) \quad (۸)$$

که C_{ij} و Q_{ij} به ترتیب دلالت بر قسمتهای حقیقی و موهومی طیف ممزوج دوسری زمانی دارند. اندیسهای (j,i) و زیرنویسهای η، u، $\dot{u}$ و f به ترتیب دلالت بر سریهای زمانی تراز سطح آب، سرعت افقی، شتاب افقی و نیرو دارند. معادلهٔ بالا را می‌توان به دو قسمت مجزا از هم به صورت معادله‌های زیر در آورد:

$$C_{\eta f} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} K_D \sigma_u C_{\eta u} + K_M C_{\eta \dot{u}} \sqrt{\frac{8}{\pi}} K_D \sigma_u \quad (۹)$$

$$Q_{\eta f} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} K_D^2 \sigma_u Q_{\eta u} + K_M Q_{\eta \dot{u}} \quad (۱۰)$$

نهایتاً ضرایب نیرو به صورت توابعی فرکانسی از معادله‌های بالا به‌دست می‌آیند:

$$C_D(f) = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{2}{\rho D \sigma_u} \left(\frac{C_{\eta \dot{u}} Q_{\eta f} - Q_{\eta \dot{u}} C_{\eta f}}{C_{\eta \dot{u}} Q_{\eta u} - Q_{\eta \dot{u}} C_{\eta u}}\right) \quad (۱۱)$$

$$C_M(f) = \frac{4}{\rho \pi D^2} \left(\frac{C_{\eta f} Q_{\eta u} - Q_{\eta f} C_{\eta u}}{C_{\eta \dot{u}} Q_{\eta u} - Q_{\eta \dot{u}} C_{\eta u}}\right) \quad (۱۲)$$

۴- تخمین سینماتیک ذرات آب با استفاده از سریهای زمانی اندازه‌گیری شده تراز سطح موج

یکی از مراحل مهمی که در به کارگیری معادلهٔ موریسون با آن سر و کار داریم تخمین سینماتیک ذرات آب است که با استفاده از مقادیر ارتفاع (H) و پریود گذر از صفر موج (Tz) هر تک موج از تاریخچهٔ زمانی اندازه‌گیری شده تراز سطح موج انجام می‌گیرد. در استفاده از نظریه‌های موج منظم معمول است که تاریخچهٔ زمانی تراز سطح موج تصادفی را مجموعه‌ای از تک موجهای منظم فرض می‌کنند و از این رو به ازای هر تک موج، یک H و یک Tz منحصر به فرد نتیجه می‌شود. با تخمین سرعت و شتاب هر یک از تک موجهای مربوطه، درنهایت سریهای زمانی تخمینی سرعت، شتاب و نیروی مربوط به هر تک موج را به طور متوالی و منظم در کنار هم قرار داده و کل سریهای زمانی تخمینی را می‌توان تعیین کرد.

در تحقیق حاضر از دو نظریه موج خطی و نظریه موج مرتبه پنجم استوکس برای تخمین سرعت و شتاب استفاده شده است. هدف از به کارگیری دو نظریه مذکور، ارزیابی دقت تخمین هر یک از روشها در تعیین سینماتیک ذرات آب از طرفی و تعیین خطاهای تخمین نیرو به ازای هر یک از این روشها از سوی دیگر است. معادله‌های مربوط به نظریه موج خطی در مرجع [۹] موجود است.

از طرفی برای تخمین سینماتیک ذرات آب با نظریه موج مرتبه پنجم استوکس به جای استفاده از روش اسکجلبریا و هندریکسون [۱۰] ترجیحاً از روش فنتون استفاده شده است. یکی از مزیتهای روش فنتون نسبت به روش اخیر در قابلیت مدل کردن جریان یکنواخت است. برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه خواننده به مرجع [۱۱] ارجاع داده می‌شود. به عنوان نمونه، در این قسمت روابط لازم برای نظریه خطی را به شکل مختصر زیر می‌توان بیان کرد:

(۱۳) فرکانس زاویه‌ای موج

$$\omega = \sqrt{gk\tanh kd}$$

(۱۴) تراز سطح موج در راستای عمودی

$$\eta = \frac{H}{2}\frac{\sinh ks}{\sinh kd}\cos\theta$$

(۱۵) سرعت ذرات آب در راستای افقی

$$u = \frac{\pi H}{T}\frac{\cosh ks}{\sinh kd}\cos\theta$$

(۱۶) شتاب ذرات آب در راستای افقی

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2}\frac{\cosh ks}{\sinh kd}\sin\theta$$

در معادله‌های بالا پارامترهای η، d، s به ترتیب تراز سطح آب، عمق آب، مختصهٔ عمودی تراز سطح آب نسبت به تراز ساکن آب است. پارامتر $k=2\pi/l$ به عدد موج موسوم است. H و T نیز به ترتیب ارتفاع و پریود موج است. همچنین $\theta=kx-\omega t$ است به طوری که t بر زمان و x نیز بر مؤلفه افقی جابه‌جایی دلالت می‌کنند. در آزمایشهای انجام گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک دلفت هلند چون ساحل تعبیه شده از طول کافی برخوردار نبوده است، شکل (۱)، لذا مستهلک ساختن انرژی امواج به طور کامل صورت نگرفته و از برخورد امواج با ساحل بتنی، امواج منعکس شده و نامعینیهای میدان جریان را بیشتر می‌سازند. برای اعمال اثر انعکاس امواج، نظریه‌های مختلفی موجود است، لیکن در تحقیق حاضر از اثر دادن پدیدهٔ انعکاس صرف نظر شده است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

۵- معیاری برای تعیین صحت تخمینهای انجام شده

به طور کلی برای تخمین پارامترهای معینی که با روشهای متفاوتی صورت می‌گیرد به لحاظ آماری روشی مناسب تشخیص داده می‌شود که مقادیر به دست آمده از آن روش در مقایسه با نتایج سایر روشها نسبت به مقادیر واقعی دارای انحراف کمتری بوده و کمترین انحراف را در برداشته باشد. در مورد تخمین نیروهای وارده بر اعضای سازه‌های دریایی نیز همین امر صدق می‌کند و از این رو دو معیار مختلف برای بررسی کیفیت تخمین سریهای زمانی نیروی موج، سرعت و شتاب افقی ذرات آب به کار برده شده است.

این معیارها به ترتیب عبارت از میانگین خطاهای نرمال (MNE) یا انحراف مقادیر تخمینی و جذر میانگین مربعات خطاهای نرمال (RMSE) یا خطای تخمین بوده و به شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$MNE = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{e_i}{f_m} \quad ; \quad e_i = f_m - f_e \qquad (۱۷)$$

$$RMSE = 100\times\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{(f_m - f_e)}{f_m}\right]^2} \qquad (۱۸)$$

در معادله‌های بالا f_m قدر مطلق بیشینهٔ نیروی اندازه‌گیری شده و f_e قدرمطلق بیشینهٔ نیروی تخمینی برای امواج با دامنهٔ بزرگتر از ارتفاع میانگین (H_{rms}) است، N نیز تعداد امواجی است که ارتفاع آنها از ارتفاع میانگین بیشتر است.

برای سازه‌های نوع جکت، مقادیر عدد کولگان - کارپنتر (KC) در شرایط نهایی، مقادیر بزرگی در حدود ۴۰ یا ۵۰ به بالا قرار دارد و خرابی چنین سازه‌هایی عمدتاً به علت پدیدهٔ خستگی ناشی از امواج است. کمترین مقادیر KC تحت چنین شرایطی در حدود ۷ تا ۱۰ است. بنابراین در طراحی به روش نهایی، بزرگترین امواج دارای اهمیت بیشتری در طراحی بوده و بر این اساس در مقالهٔ حاضر آن دسته از امواج که ارتفاعشان بیش از ارتفاع میانگین کلیه موجهای موجود در تاریخچه زمانی تراز سطح آب باشد ملاک محاسبات بوده است.

۶- بیان نتایج

در تحقیق حاضر از چهار روش تحلیلی دامنهٔ زمانی ودامنهٔ فرکانسی در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی استفاده شده است، در طی این تحلیلها نتایج مربوط به تخمین نیروی امواج با استفاده از سینماتیکهای اندازه‌گیری شده و ضرایب هیدرودینامیکی تخمین زده شده با چهار روش مختلف، در جدولهای (۲) تا (۴) درج شده‌اند. جدول (۲) مربوط به حالت بدون جریان پایاست. در جدولهای (۳) و (۴) نیز به ترتیب مقادیر خطاهای ناشی از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی در اجراهای دوم (U=+0.5 m/s) و اجرای سوم (U=-0.5 m/s) درج شده است (U سرعت جریان است). در جدول (۵) میانگین مقادیر RMSE و NME به ازای چهار روش تحلیلی به کار برده شده گنجانده شده است. همان طوری که ملاحظه می‌شود بیشترین خطا به روش WW-LS تعلق دارد در حالی که کمترین خطا به ازای روش LS-TS نتیجه شده است. انحراف معیار مقادیر C_d و C_m ناشی از روش تحلیلی دامنهٔ زمانی WW-LS به مراتب از مقادیر متناظر مربوط به روش CS کمتر است. در طی سه اجرای مختلف، بیشترین نوسانات خطاها به روش LS-FS مربوط می‌شود و حال آنکه روش LS-TS کمترین نوسانات را در ازای تغییر شرایط جریان از خود نشان داده است و به عبارتی حالت پایدارتری نسبت به سایر روشها دارد.

در جدول (۸) سهم خطاهای ناشی از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی، سینماتیک ذرات آب و نیز میانگین خطای تخمین نیرو با استفاده از معادلهٔ موریسون برای کل سه اجرا بیان شده است.

با در نظر گرفتن جدولهای (۲) تا (۴) مشاهده می‌شود که تحت اثر افزوده شدن جریانهای مثبت و منفی به میدان موج، مقدار ضریب درگ افزایش یافته و بالعکس ضریب اینرسی کاهش می‌یابد. در اثر جریان مثبت مقدار خطاهای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نسبت به شرایط دیگر جریان به مراتب بیشتر است. همچنین بهترین تخمین برای ضرایب درگ و اینرسی با روش LS-TS به دست می‌آید که میانگین خطای مزبور در حدود ۱۵ درصد است. در مجموع با ملاحظهٔ جدول (۵) میانگین ضرایب درگ و اینرسی در طی سه اجرای متفاوت با احتساب تمامی روشهای تحلیلی به ترتیب ۰/۶۸ و ۱/۵۲ نتیجه شده است.

از طرفی دیگر با دقت در جدول (۶) ملاحظه می‌شود نسبت خطاهای ناشی از نظریه موج خطی (روش ایری) به مراتب از نظریهٔ مرتبهٔ پنجم (روش فنتون) کمتر است (البته صرفاً با در نظر گرفتن

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

جدول ۲- مقادیر Cd و Cm محاسبه شده با استفاده از روشهای تحلیلی مختلف. اجرای اول؛ استوانهٔ ثابت (U=0)

روشهای تحلیل	$(Cd)_{mean}$	σ_{Cd}	$(Cm)_{mean}$	σ_{Cm}	MNE	RMSE
WW-LS	۰/۷۰۳	۰/۶	۱/۸۹	۰/۲۱	۰/۷۷	۱۰/۴۳
LS-FS	۰/۵۳	-	۱/۸۶	-	۷/۳۸	۱۰/۵۶
CS	۰/۵۸	۵/۶	۱/۷۹	۹/۳	۸/۹	۱۱/۹۱
LS-TS	۰/۵۹	-	۱/۸	-	۸/۴۴	۱۰/۵
Mean	۰/۶		۱/۸۴		۶/۳۷	۱۰/۸۵

جدول ۳- مقادیر Cd و Cm محاسبه شده با استفاده از روشهای تحلیلی مختلف. اجرای دوم؛ استوانهٔ متحرک (U=+0.5 m/s)

روشهای تحلیل	$(Cd)_{mean}$	σ_{Cd}	$(Cm)_{mean}$	σ_{Cm}	MNE	RMSE
WW-LS	۰/۷۱	۰/۲	۱/۲۹	۰/۲۹	-۲۹/۲۴	۳۶/۲۲
LS-FS	۰/۷۳	-	۱/۰۷	-	-۳۱/۵۸	۳۸/۲۲
CS	۰/۶۳	۶/۰۷	۱/۴۵	۱۴	-۱۷/۸۵	۲۶/۰۶
LS-TS	۰/۵۶	-	۱/۳۹	-	-۶/۰۲	۱۷/۹۹
Mean	۰/۶۶		۱/۳		-۲۱/۱۷	۲۹/۷۲

جدول ۴- مقادیر Cd و Cm محاسبه شده با استفاده از روشهای تحلیلی مختلف. اجرای سوم؛ استوانهٔ متحرک (U=-0.5 m/s)

روشهای تحلیل	$(Cd)_{mean}$	σ_{Cd}	$(Cm)_{mean}$	σ_{Cm}	MNE	RMSE
WW-LS	۰/۹۹۸	۰/۲۵	۱/۲۸	۰/۳۲	-۲۵/۶۵	۳۳/۹۵
LS-FS	۰/۶۱	-	۱/۶۴	-	۱۲/۵۵۹	۱۷/۴۴
CS	۰/۶۵	۴/۲۹	۱/۳۸	۱۰/۷۶	۱۲/۵۶۴	۱۸/۲۲
LS-TS	۰/۸۲	-	۱/۳۷	-	-۵/۸۲	۱۸/۴۰
Mean	۰/۷۷		۱/۴۲		-۱/۵۹	۲۲/۰۰

حالتی که نقاط پیک سریهای زمانی سرعت و شتاب ذرات آب منظور شده است). برای هر دو نظریه موج اخیر، خطاهای تخمین شتاب نسبت به خطاهای ناشی از تخمین سرعت بیشتر است. با این حال در طی سه اجرای مذکور خطای تخمین نیرو با استفاده از روش فنتون به طور متوسط در حدود ۲۰ درصد کمتر از روش ایری است. بیشترین خطای تخمین نیرو با استفاده از روش ایری به همراه نتایج حاصل از روش تحلیلی LS-FS تعلق دارد. همان طوری که از مقادیر RMSE مندرج در جدول (۶) مشخص است، استفاده از روش فنتون به همراه نتایج حاصل از روش تحلیلی LS-TS کمترین مقدار خطا را نتیجه داده است.

ماحصل نتایج پردازشها در جدول (۸) درج شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود مقدار میانگین خطای تخمین سرعت ۲۱ درصد، شتاب ۲۷ درصد و خطای ناشی از تخمین ضرایب درگ و اینرسی ۲۱ درصد نتیجه شده است. میانگین خطاهای تخمین نیروی موج که ناشی از به کارگیری معادلهٔ موریسون است برای سه اجرای (۱)، (۲) و (۳) در مجموع برابر ۴۸ درصد نتیجه شده است.

در شکلهای (۳)، (۵) و (۷) تغییرات نسبت قابلیت اعتماد R، در قبال عدد KC به ترتیب برای سه اجرای اول، دوم و سوم نشان داده شده است. همچنین در شکلهای (۴)، (۶) و (۸) نیز تغییرات ضرایب درگ و اینرسی حاصل از روش WW-LS برحسب KC

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

جدول ۵- میانگین مقادیر Cd و Cm محاسبه شده با استفاده از روشهای تحلیلی مختلف در طی سه اجرای (۱)، (۲) و (۳)، برای پایه‌های استوانه‌ای با سطح صاف تحت اثر امواج تصادفی

روشهای تحلیل	$(Cd)_{mean}$	σ_{Cd}	$(Cm)_{mean}$	σ_{Cm}	MNE	RMSE
WW-LS	۰/۸	۰/۳۵	۱/۴۹	۰/۲۷	-۱۸/۰۴	۲۶/۸۷
LS-FS	۰/۶۲	-	۱/۵۲	-	-۳/۸۸	۲۲/۲۱
CS	۰/۶۲	۵/۳۲	۱/۵۴	۱۱/۳۵	۱/۲	۱۸/۷۳
LS-TS	۰/۶۶	-	۱/۵۲	-	-۳/۴	۱۵/۶۳
Mean	۰/۶۸		۱/۵۲		-۶/۰۳	۲۰/۸۶

جدول ۶- میانگین مقادیر به دست آمده برای دقت تخمین نیروی موریسون در کلیه اجراها با استفاده از نظریه موج خطی و نظریه موج مرتبهٔ پنجم استوکس برای تخمین سینماتیکهای ذرات آب در شرایط امواج تصادفی (پایه‌های استوانه‌ای با سطح صاف)

روشهای تحلیل	نظریه موج خطی (Airy's wave theory)		نظریه موج مربتهٔ پنجم استوکس (5th Order Stokes theory)	
	MEAN	RMSE	MEAN	RMSE
WW-LS	-۳۹/۳۷	۵۷/۶۳	-۲۹/۵۹	۴۵/۲۶
LS-FS	-۴۰/۵۴	۶۰/۰۳	-۳۱/۳۵	۴۷/۹۵
CS	-۳۶/۷۰	۵۶/۶۰	-۲۸/۰۲	۴۵/۷۸
LS-TS	-۱۸/۸۹	۴۰/۹۲	-۱۰/۵۶	۳۰/۲۷
میانگین خطا	-۳۳/۸۸	۵۳/۷۹	-۲۴/۸۸	۴۲/۳۲

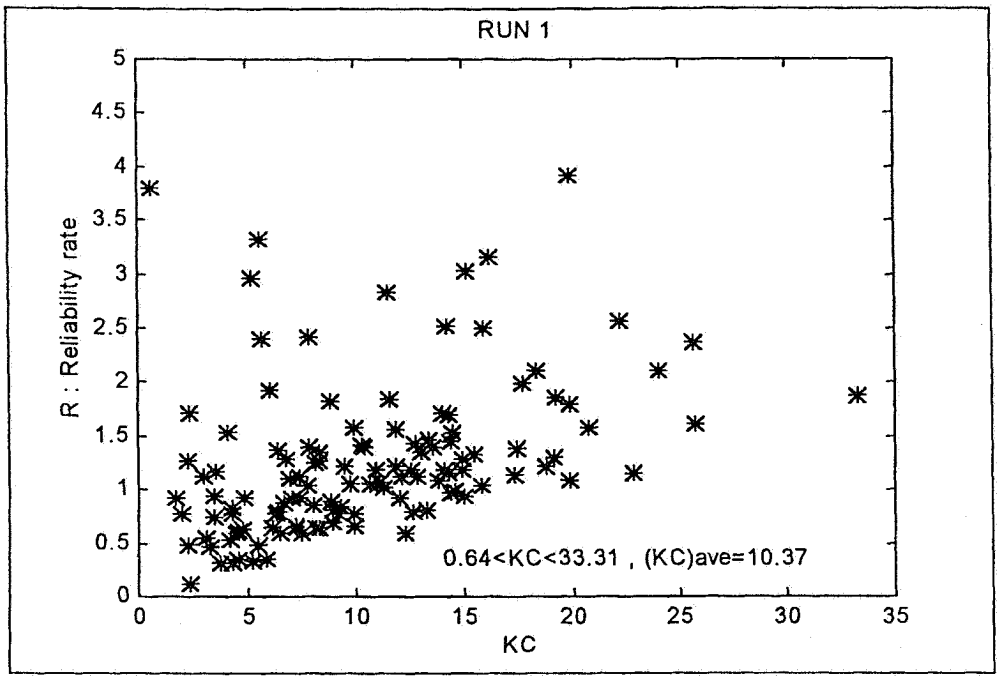
برای سه اجرای اخیر نشان داده شده است. نسبت قابلیت اعتماد که توسط دین[۸] در سال ۱۹۷۶ پیشنهاد شده است معیار مناسبی در تشخیص کیفیت داده‌های مورد استفاده برای تعیین ضرایب درگ و اینرسی است [۱۲]. اگر این نسبت کوچکتر از ۰/۲۵ به دست آید بیانگر شرایط مساعدی برای تخمین C_m است و در چنین شرایطی تخمین C_d از دقت بالایی برخوردار نخواهد بود. زمانی که $0.25<R<4$ باشد شرایط برای تخمین هر دو ضریب مساعد است. در صورتی که $R>4$ به دست آید در این حالت، برخلاف C_m شرایط برای تعیین C_d مساعد خواهد بود.

۷- بحث و بررسی

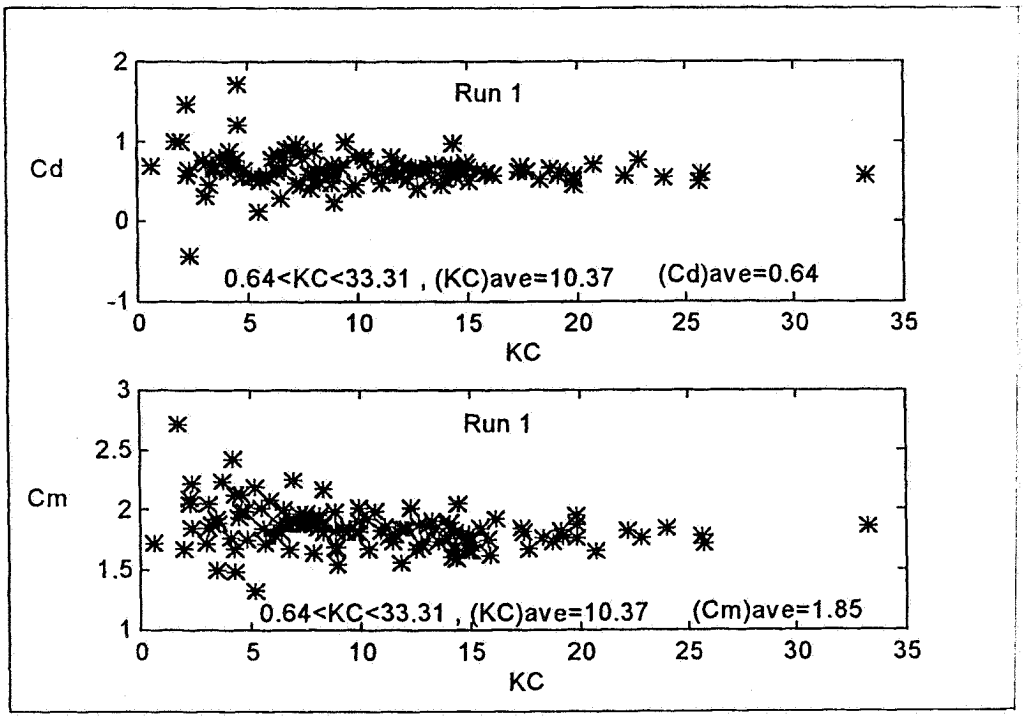
در قسمت اول از تحقیق حاضر سعی شده است خطاهای حاصل از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی تعیین شود. از طرفی در قسمت دوم به ارزیابی دو نظریه موج خطی و مرتبهٔ پنجم استوکس (روش فنتون) در تخمین سرعت و شتاب افقی ذرات آب پرداخته شده است. بررسیهای مربوط به خطاهای حاصل از به‌کار بردن مدل موریسون در قسمت سوم بیان می‌شود. در آخرین قسمت نیز مقایسه‌ای مابین نتایج به دست آمده از تحلیلهای انجام گرفته بر روی داده‌های مربوط به استوانه‌های با سطح صاف و استوانه‌های با سطح زبر به عمل آمده است.

ابتدا برای ارزیابی شرایط داده‌های مربوط به سه اجرای (۱)، (۲) و (۳) برای تعیین ضرایب C_d و C_m، بهتر است به بررسی تغییرات نسبت قابلیت اعتماد R، به همراه تغییرات C_d و C_m تخمین زده شده پرداخته شود. با توجه به شکلهای (۳) و (۴) و با نظر به اینکه برای اجرای اول $R_{mean}=1.073$ در بین دو حد مرزی ۰/۲۵ و ۴ قرار دارد لذا شرایط مناسبی برای تعیین ضرایب C_d و C_m موجود است و با توجه به اینکه مقدار میانگین R به سمت حد تحتانی نزدیکتر است مقدار سطح خطای تخمین C_m نسبت به C_d کمتر

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

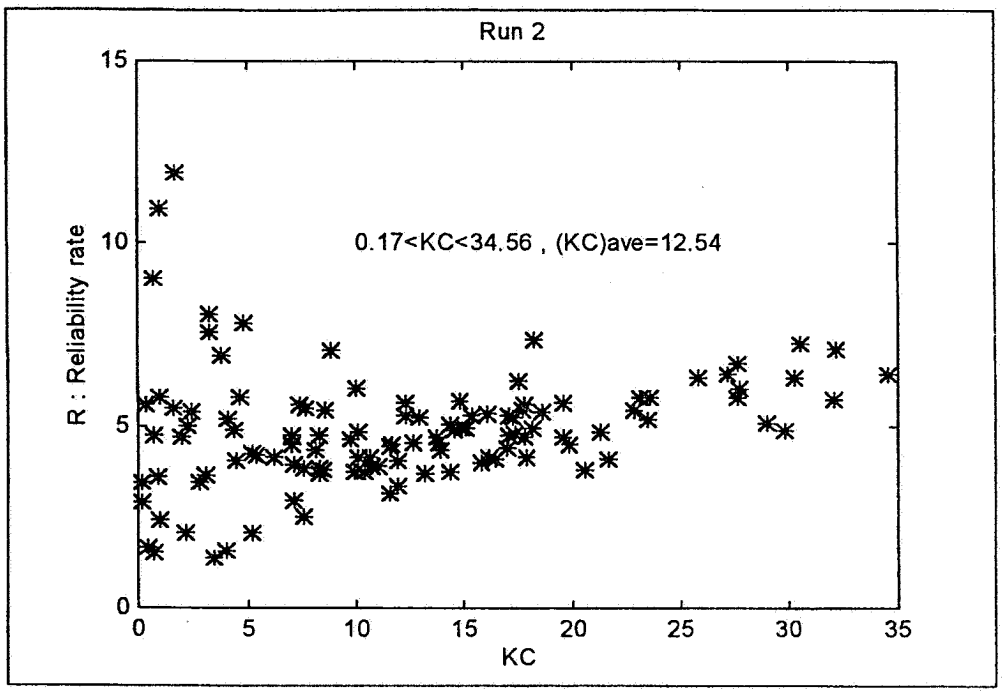


شکل ۳- تغییر نسبت قابلیت اعتماد در قبال KC برای پایه ثابت با سطح صاف (U=0 m/s)

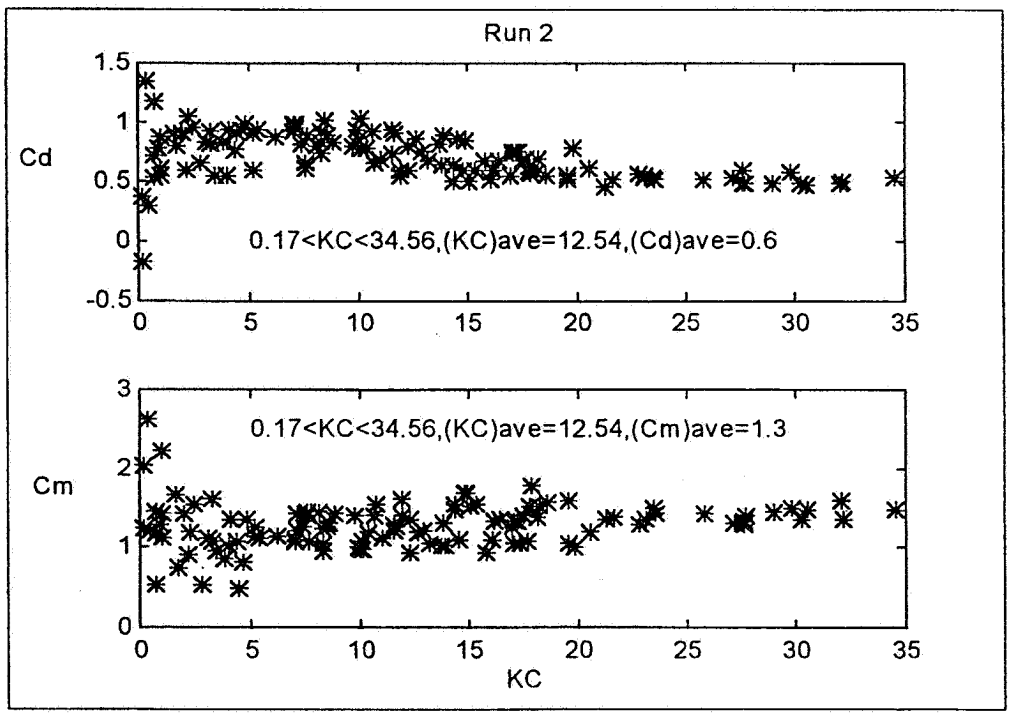


شکل ۴- تغییرات C_d و C_m در قبال KC در حالتی که امواج تصادفی بر یک پایه استوانه‌ای ثابت وارد می‌شوند (روش WW-LS)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

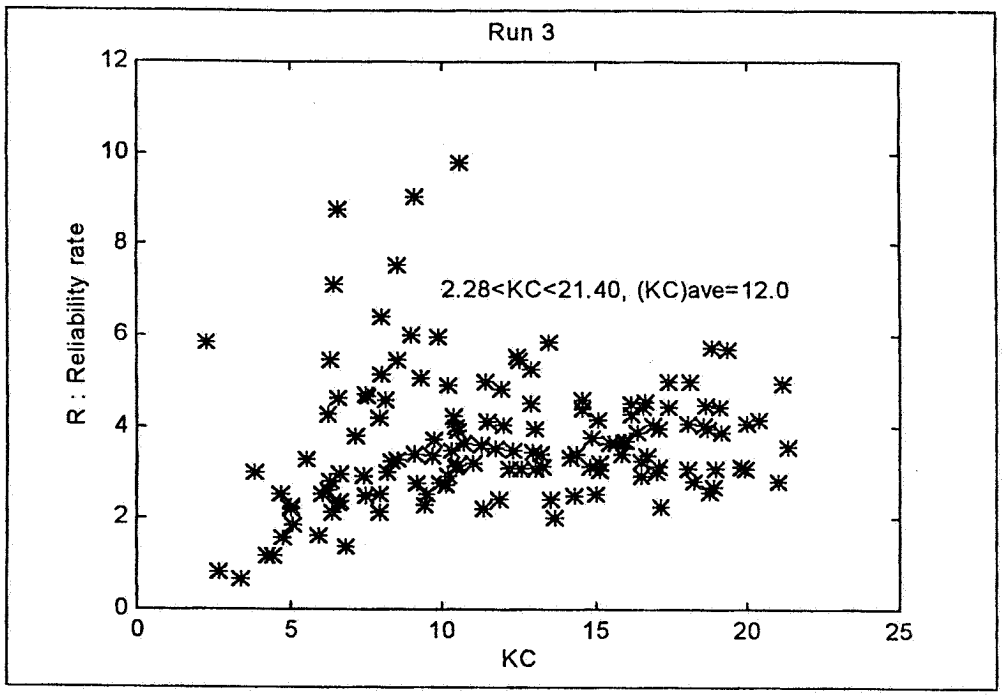


شکل ۵- تغییر نسبت قابلیت اعتماد در قبال KC برای پایه متحرک با سطح صاف (U=+0.5)

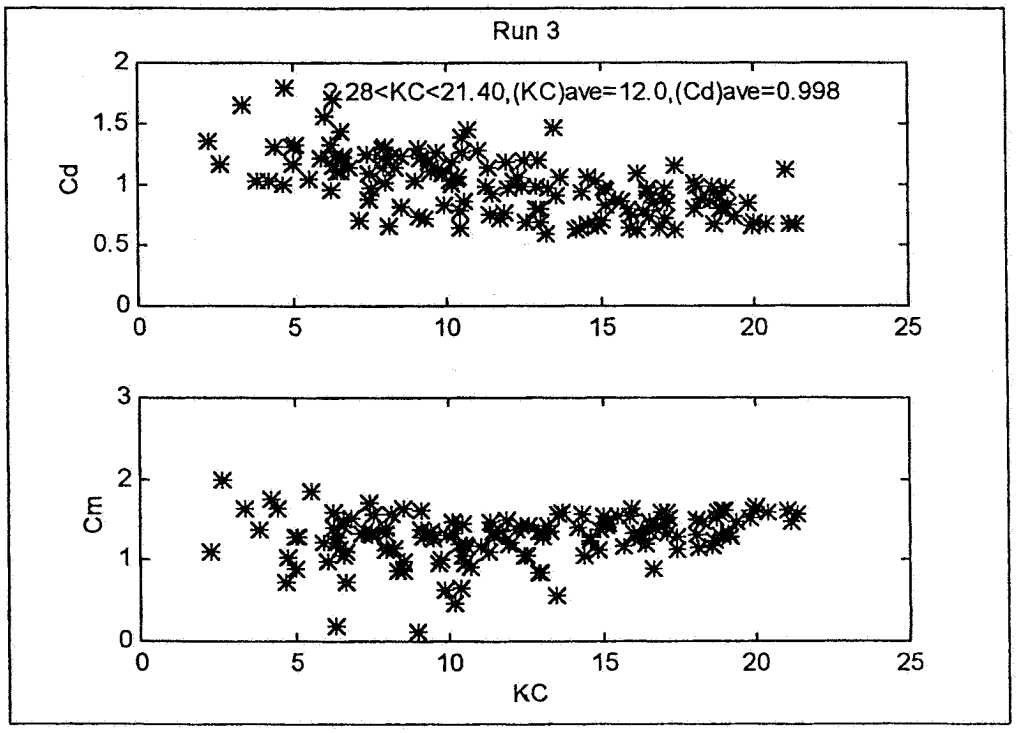


شکل ۶- تغییرات C_d و C_m در قبال KC، در حالتی که امواج تصادفی بر یک پایه استوانه‌ای متحرک وارد می‌شوند (WW-LS)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]



شکل ۷- تغییر نسبت قابلیت اعتماد در قبال KC برای پایه متحرک با سطح صاف (U=-0.5)



شکل ۸- تغییرات C_d و C_m در قبال KC، در حالتی که امواج تصادفی بر یک پایه استوانه‌ای متحرک وارد می‌شوند (U=-0.5 m/s)

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

خواهد بود. در اجرای اول که امواج در غیاب جریان دائمی بر پایه استوانه‌ای برخورد می‌کنند، به ازای مقادیر KC<6 شاهد پراکندگی زیادی در مقادیر C_d و C_m هستیم. ولی با افزایش KC از شدت این پراکندگیها کاسته می‌شود و هر کدام از ضرایب C_d و C_m تدریجاً به سمت مقادیر ثابتی میل می‌کنند که این مقدار برای C_d برابر ۰/۶ و برای C_m برابر با ۱/۸۶ است. با توجه به دو شکل مذکور ملاحظه می‌شود که برای C_d به طور نامتعارفی یک مقدار منفی نتیجه شده است. از طرفی برای R متناظر با تک‌موجی که C_d برای آن منفی شده است مقادیر کمتر از ۰/۲۵ حاصل شده است. از این رو طبق گفتهٔ دین مشاهده می‌شود که در آزمایش حاضر نیز هر اندازه R به مقدار ۰/۲۵ و مقادیر کمتر از آن نزدیک می‌شود سطح خطا در تخمین C_d بیشتر می‌شود. در چنین شرایطی مقدار به دست آمده برای C_m از صحت خوبی برخوردار است.

در شکلهای (۵) و (۶) مشاهده می‌شود برای مقدار R=12 (R>4)، شرایط داده‌ها برای تعیین C_m مناسب نبوده و از این رو مقدار C_m برای آن تک موج حدوداً ۰/۷۵ نتیجه شده است، که با مقدار میانگین به دست آمده برای کل تک موجها اختلاف فاحشی دارد. در چنین حالتی برخلاف C_m، شرایط برای ایجاد خطا در تخمین C_d کم بوده و ملاحظه می‌شود مقدار C_d=0.8 است که به میانگین کل تک‌موجها نزدیک است. همچنین در حالتی که KC در محدودهٔ بزرگتر یا مساوی ۲۰ تغییر می‌کند، مقادیر R به نحو مشهودی از عدد ۴ بیشتر بوده و لذا از قبل می‌توان چنین بیان کرد که مقادیر به دست آمده برای C_d از دقت خوبی برخوردار بوده و بالعکس برای C_m نسبت خطاهای حاصل از تخمین، زیاد خواهد بود. با توجه به شکل (۵) برای KCهای بزرگتر از ۵ شاهد Rهایی هستیم که در فاصلهٔ 1<R<4 تغییر می‌کنند و از این رو با دقت در شکل (۶) ملاحظه می‌شود غالب مقادیری از C_m که در چنین شرایطی به دست آمده‌اند در فاصلهٔ ۱/۳ الی ۲/۵ در نوسان‌اند. میانگین تقریبی C_m در این محدوده برابر ۱/۶ نتیجه شده است که در مجموع بیانگر شرایط خوبی برای تعیین این ضریب است.

با توجه به شکل (۶) ملاحظه می‌شود که پراکندگی مقادیر C_m به ازای KCهای کمتر از ۵ بیشتر مشهود است ولی به تدریج با افزایش KC از مقدار این پراکندگی‌ها کاسته شده و درنهایت به سمت مقدار ثابتی (تقریباً برابر ۱/۵) میل می‌کند. البته بایستی توجه کرد که در شرایط مذکور R در ناحیه R>4 قرار دارد که بیانگر نامساعد بودن شرایط برای تخمین C_m است. اما مقادیر C_d در محدوده‌ای از KC که کمتر از ۱/۵ است، پراکندگی زیادی با دامنهٔ تغییراتی در حدود ۱، را بروز می‌دهند. با افزایش تدریجی KC میانگین مقادیر C_d به طور صعودی تا مرز KC≅10 پیش رفته و از آن مرحله به بعد یک روند نزولی داشته به طوری که بعد از KC≅20 به سمت مقدار ۰/۵۵ میل می‌کند.

برای شرایطی که همراه امواج یک جریان پایای منفی (درخلاف جهت پیشروی امواج) وجود داشته باشد، با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که به لحاظ اینکه میانگین R برابر ۳/۷۲ است و به حد فوقانی (عدد ۴) نزدیکتر است، شرایط داده‌ها برای تعیین هر دو ضریب C_d و C_m مناسب‌اند، ولی با این تفاوت که به نظر می‌رسد مقادیر تخمین زده شده C_d از دقت بیشتری برخوردار خواهند بود. در چنین شرایطی چون نیروی درگ بر میدان حاکم است از این رو برای تعیین C_m با مشکل مواجه خواهیم شد. همان طوری که از شکل مشخص است مقدار نظیر R برای C_m منفی، برابر R=6.3 است که از حد ۴ بیشتر است. ولی برای C_d متناظر همان ضریب اینرسی، مقدار ۱/۱ به دست آمده است که تفاوت ناچیزی با مقدار C_d میانگین دارد ($C_{d\ mean}$=0.998). نظیر اجراهای اول و دوم، برای اجرای سوم نیز با افزایش مقادیر KC، در پراکندگی مقادیر C_m کاهش ایجاد شده است و در این مرحله به ازای KCهای بزرگتر از ۱۸، مقادیر C_m باز هم به سمت عدد واحدی برابر با ۱/۴ میل می‌کنند. برای ضریب درگ نیز به ازای افزایش KC از صفر تا یک، کاهش نسبی صورت گرفته است ولی به تدریج با افزایش KC مقدار C_d به سوی عدد ۰/۶ میل می‌کند، به طوری که گویی شرایط مختلف میدان، هیچگونه تأثیری بر مقادیر آن ندارد.

با توضیحات بالا ملاحظه شد که معیار پیشنهاد شده‌ای که توسط دین برای ارزیابی چگونگی شرایط داده‌ها برای تخمین ضرایب درگ و اینرسی ارائه شده است، معیار بسیار خوب و ارزنده‌ای است، به طوری که نتایج به دست آمده از آزمایشهای حاضر نیز، تقریباً به طور کامل با معیار پیشنهادی وی همخوانی دارد.

در ادامهٔ مطالب مربوط به قسمت نخست از تحلیلهای انجام شده، به ارزیابی چهار روش تحلیلی دامنهٔ زمانی و فرکانسی به کار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

برده شده پرداخته می‌شود. مقادیر خطاهای RMSE و انحراف مقادیر MNE ناشی از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی که در طی اجراهای مختلف ایجاد شده است در جدولهای (۲) الی (۴) درج شده‌اند. همان طوری که ملاحظه می‌شود روش تحلیلی دامنه زمانی تطابق سریهای زمانی نیروی (LS-TS) کمترین خطا را در بردارد و از طرفی انحراف خطاهای مربوط به این روش کمترین نوسانها را در قبال تغییر شرایط جریان بروز می‌دهند. برخلاف روش مذکور، روش تحلیلی دامنهٔ فرکانسی تطابق طیفهای نیرو (LS-FS) بیشترین تغییرات را در انحراف مقادیر تخمینی آشکار ساخته است. از طرفی دیگر پراکندگی (انحراف معیار) مقادیر تخمینی C_d و C_m به ازای تحلیل موج به موج (WW-LS) به مراتب کمتر از نتایج به دست آمده از روش تحلیلی CS است. چنین امری دلالت بر پایدار بودن مقادیر حاصل از روش WW-LS در اطراف میانگین ضرایب تخمینی دارد. در مجموع سه اجرای مذکور، با توجه به اینکه کمترین مقدار جبری MNE در روش WW-LS به دست آمده است از این رو روش تحلیلی WW-LS تخمینهای دست بالاتری را نتیجه خواهد داد.

در قسمت دوم از تحلیلهای انجام گرفته مشاهده شد که روش ایری (یا نظریه موج خطی) تخمینهای صحیحتری را نسبت به روش فنتون (نظریه مرتبهٔ پنجم استوکس) نتیجه می‌دهد، با این حال در طی تخمین نیروی امواج، استفاده از روش فنتون به مراتب خطاهای کمتری را نسبت به روش ایری داده است. این امر ممکن است به دلیل قابلیت نظریه غیرخطی استوکس در توصیف بهتر عوامل غیرخطی موجود و ارضای شرایط مرزی میدان موج در شرایط بسیار پیچیده (اندرکنش موج - جریان) باشد.

در قسمت سوم از تحقیق به عمل آمده به بررسی صحت تخمین نیروی امواج با استفاده از معادلهٔ موریسون، با استفاده از ضرایب C_d و C_m تخمینی از یک طرف، و سینماتیکهای تخمینی از طرف دیگر پرداخته شده است.

با دقت در جدول (۶) ملاحظه می‌شود که میانگین خطای تخمین نیرو به ازای استفاده از روش تحلیلی LS-FS و نظریه موج خطی بیشترین مقدار را شامل می‌شود. ولی با استفاده از مقادیر C_d و C_m حاصل از روش تحلیلی LS-TS و سینماتیکهای تخمینی با نظریه موج استوکس (روش فنتون)، کمترین مقدار خطا را دربردارد.

از این رو روش تحلیلی LS-TS در مقایسه با سه روش تحلیلی دیگر به‌کار برده شده، تخمینهای صحیحتری را به دست می‌دهد. همچنین در شرایط آزمایشگاهی بیان شده، مزیت به کارگیری نظریه موج مرتبه پنجم استوکس نسبت به نظریه موج خطی کاملاً مشهود است.

طبق جدول (۸) خطاهای ناشی از تخمین نیرو برای سه اجرای (۱)، (۲) و (۳) به طور متوسط برابر ۴۸ درصد بوده و بیشترین خطای تخمین نیرو، به اجرای دوم مربوط می‌شود (حالتی که جریان مثبتی علاوه بر امواج تصادفی وجود دارد). علت این امر در خطاهای ناشی از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی نهفته است. قسمت اعظم این خطاها از سوی سه روش WW-LS، LS-FS و CS ایجاد شده است، جدول (۳)، و این در شرایطی است که برای اجرای مذکور (U=+0.5 m/s)، روش LS-TS کمترین خطا را نتیجه داده است.

به طوری که در جدول (۸) مشاهده می‌شود بیشترین سهم خطا در تخمین نیروی امواج، به تخمین شتاب تعلق دارد، ۲۷٪، و مقدار خطای ناشی از تخمین سرعت افقی ذرات آب و ضرایب هیدرودینامیکی کمتر بوده و برابر ۲۱٪ نتیجه شده است.

۸- نتیجه‌گیری

به طوری که تحلیلها و بررسیهای به عمل آمده در این تحقیق، بیانگر قابلیت مدل موریسون در تخمین نیروی امواج تصادفی در شرایط متنوعی از ترکیب جریان پایا و امواج تصادفی است. ارزیابی چهار روش تحلیلی حوزهٔ زمانی و حوزهٔ فرکانسی از نظر دقت و صحت آنها در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی قسمت دیگری از کار تحقیق را به خود اختصاص داده است. همچنین به بررسی قابلیت نسبی دو نظریه موج خطی و نظریه موج مرتبهٔ پنجم استوکس، در نحوهٔ تخمین پارامترهای سرعت و شتاب ذرات آب با استفاده از سریهای زمانی اندازه‌گیری شده تراز سطح پرداخته شده است. در قسمت آخر از تحقیق انجام شده، مقایسه‌ای مابین نتایج حاضر و نتایج به دست آمده از تحلیلهای مربوط به استوانه‌های زبر به عمل آمده است. خلاصهٔ نتایج بررسیهای بالا به شرح زیر است:

۱- روشهای تحلیل در حوزهٔ فرکانسی نسبت به وجود جریان دریایی دچار خطاهای زیادتری در تخمین ضرایب C_d و C_m می‌شوند.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

جدول ۷- مقادیر خطاهای MNE و RMSE در تخمین سینماتیکهای ذرات آب و تخمین نیروی امواج تصادفی برای سه اجرای متفاوت (۱)، (۲) و (۳) با استفاده از نظریه موج خطی و نظریه موج مرتبهٔ پنجم استوکس (به روش فنتون).

شمارهٔ اجرا	نظریه موج	خطای محاسبه سرعت (u)		خطای محاسبه شده ($\dot{u}$)		خطای محاسبه نیرو (F)	
		MNE	RMSE	MNE	RMSE	MNE	RMSE
اجرای ۱	خطی	-۴/۰۷	۲۳/۱۹	-۵/۷۴	۲۶/۲۶	-۱۲/۳۹	۳۸/۱۷
	استوکس	-۱۳/۲۷	۲۸/۱۱	-۱۸/۵۵	۴۳/۰۴	۷/۷۷	۱۸/۰۳
اجرای ۲	خطی	-۵/۶۴	۲۰/۰۱	-۶/۹۴	۱۸/۸۰	-۵۱/۰۴	۷۴/۸۴
	استوکس	-۱۱/۳۳	۲۳/۲۷	-۱۶/۷۴	۳۸/۴۶	-۳۶/۶۰	۵۹/۵۱
اجرای ۳	خطی	-۶/۱۸	۱۴/۷۹	-۲/۲۲	۱۹/۸۲	-۳۸/۲۰	۴۸/۳۷
	استوکس	-۵/۶۹	۱۴/۷۸	-۳/۰۹	۲۸/۵۳	-۳۹/۹۹	۴۹/۷۰
میانگین خطا	خطی	-۵/۳۰	۱۹/۳۳	-۴/۹۷	۱۸/۲۹	-۳۳/۸۸	۵۳/۷۹
	استوکس	-۱۰/۱	۲۲/۰۵	-۱۲/۷۹	۳۶/۶۸	-۲۲/۹۴	۴۲/۳۱

جدول ۸- مقادیر متوسط خطاهای MNE و RMSE در تخمین ضرایب هیدرودینامیک، سینماتیکهای ذرات آب و نیروی امواج تصادفی در سه اجرای متفاوت (۱)، (۲) و (۳)، برای پایه استوانه‌ای با سطح صاف

شمارهٔ اجرا	خطای تخمین ضرایب C_d و C_m				خطای سرعت u		خطای شتاب $\dot{u}$		خطای نیرو F	
	C_d	C_m	NME	RMSE	MNE	RMSE	MNE	RMSE	MNE	RMSE
اجرای ۱	۰/۶	۱/۸۴	۶/۳۷	۱۰/۸۵	-۸/۶۷	۲۵/۶۵	-۱۲/۱۵	۲۹/۶۵	-۲/۳۱	۲۸/۱
اجرای ۲	۰/۶۶	۱/۳	-۲۱/۲	۲۹/۷۲	-۸/۴۹	۲۱/۶۴	-۱۱/۸۴	۲۸/۶۳	-۴۳/۸۲	۶۷/۱۸
اجرای ۳	۰/۷۷	۱/۴۲	-۱/۵۹	۲۲	-۸/۴۸	۱۷/۷۸	-۲/۶۶	۲۴/۱۸	-۳۹/۱۰	۴۸/۸۹
میانگین	۰/۶۸	۱/۵۲	-۵/۴۶	۲۰/۸۶	-۵/۹۴	۲۰/۶۹	-۸/۸۸	۲۷/۴۹	-۲۸/۴۱	۴۸/۰۶

جدول ۹- میانگین خطاهای MNE و RMSE در تخمین ضرایب هیدرودینامیک، سینماتیکهای ذرات آب و نیروی امواج تصادفی در سه اجرای متفاوت (۱)، (۲) و (۳) پایه‌های استوانه‌ای با سطح زبر.

شمارهٔ اجرا	خطای تخمین ضرایب C_d و C_m				خطای سرعت u		خطای شتاب $\dot{u}$		خطای نیرو F	
	C_d	C_m	MNE	RMSE	MNE	RMSE	MNE	RMSE	MNE	RMSE
اجرای ۱	۱/۷۴	۲	-۴/۹۳	۱۸/۰۳	-۱۴/۳۹	۲۵/۹۱	-۴/۷۹	۱۶/۸۳	-۱۵/۳۳	۳۶/۰۵
اجرای ۲	۱/۴۵	۱/۷۸	-۶/۵۱	۱۴/۰۵	-۱۱/۲۷	۱۹/۰۶	۶/۹۷	۱۸/۷۸	-۲۱/۷۰	۳۶/۹۰
اجرای ۳	۱/۶۵	۱/۳۸	-۳۲/۱۷	۳۹/۹۷	۴/۸۹	۱۲/۰۸	۶/۷۶	۱۴/۷۰	-۱۷/۰۲	۴۰/۵۵
میانگین	۱/۶۱	۱/۷۲	-۱۴/۵۴	۲۴/۰۲	-۶/۹۲	۹/۰۲	۲/۹۲	۱۶/۷۷	-۱۸/۰۲	۳۷/۸۳

۲- خطاهای ناشی از تخمین ضرایب هیدرودینامیکی، در روش LS-FS بیشترین مقدار را نسبت به سایر روشها دارد.

۳- خطاهای ناشی از روش LS-FS و WW-LS نسبت به دو روش CS و LS-TS بیشتر بوده و از طرفی استفاده از روش LS-FS و WW-LS باعث می‌شود تا مقادیر دست بالاتری برای نیروی امواج در مقایسه با استفاده از دو روش دیگر نتیجه شود.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

۴- روش تحلیلی تطابق سریهای زمانی نیرو به شیوهٔ کمترین مربعات (LS-TS)، در مقایسه با بقیه روشهای تحلیلی مورد استفاده، نتایج مناسب و کم خطایی را در کل روند پردازشهای به عمل آمده نتیجه داده است.

۵- در طی تحلیلهای به عمل آمده، تخمین سینماتیک ذرات آب با به کار بردن روش ایری (نظریه خطی) خطاهای کمتری نسبت به استفاده از روش فنتون (نظریه مرتبهٔ پنجم استوکس) نتیجه داده است، جدول (۷) ستون (۴) و (۶).

۶- خطای تخمین نیروی امواج و جریان دریایی، ترکیب نامتوازنی از خطاهای ناشی از تخمین سینماتیک ذرات آب و نیز ضرایب هیدرودینامیکی است. به عبارتی می‌توان چنین ادعا کرد که در ارزیابی روشهای تخمین سینماتیک ذرات آب، در حقیقت مقدار دقت تخمین نیروی موج با استفاده از این روشها ملاک عمل می‌تواند باشد.

۷- نتایج به دست آمده از تخمین نیرو با سینماتیکهای تخمینی و ضرایب هیدرودینامیکی تخمینی، دلالت بر این دارند که روش فنتون در مجموع، خطای کمتری را نسبت به روش ایری در روند تخمین نیرو موجب می‌شود.

۸- در شرایطی که یک جریان دائمی به همراه امواج حضور داشته باشد در چنین حالتی خطاهای حاصل در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و نیروی امواج نسبت به شرایطی که جریانی وجود نداشته باشد، بیشتر است. این امر به احتمال زیاد به دلیل افزایش اثرات غیرخطی ناشی از اندرکنش موج و جریان رخ می‌دهد.

۹- در مورد استوانه‌های صاف، با صرف نظر کردن از نوع روشهای تحلیلی به کار رفته برای تخمین ضرایب هیدرودینامیکی، وجود جریان پایا باعث می‌شود که ضریب C_d حداقل ۶ درصد افزایش و ضریب C_m نیز حداقل به میزان ۲۳ درصد کاهش یابد.

۱۰- نسبت قابلیت اعتماد R، که توسط دین پیشنهاد شده است، معیار کاملاً مناسبی برای ارزیابی شرایط داده‌ها در تعیین هر یک از ضرایب C_d و C_m است. با بررسیهای به عمل آمده در تحلیلهای حاضر، در طی اجراهای اول تا سوم (که سرعت جریان دائمی به ترتیب برابر با U=0 m/s، U=+0.5 m/s و U=-0.5 m/s است)، غالباً تک‌موجهای مورد پردازش در اجرای دوم، در شرایطی از میدان موج قرار دارند که نیروی درگ بر میدان جریان حاکم است (R>4).

۱۱- کلاً برای تخمین نیرو با استفاده از مدل موریسون، بایستی به خطاهای مربوط به روشهای انتخاب شده در تخمین ضرایب هیدرودینامیکی و نیز تخمین سینماتیک ذرات آب توجه کرده و مناسبترین روشها را برای این منظور اختیار کرد تا از میزان خطاهای محاسباتی کاسته شود.

۱۲- میانگین خطای تخمین نیروی امواج با استفاده از مدل موریسون (با احتساب کلیه روشهای تخمین ضرایب و سینماتیک ذرات آب) در حدود ۴۹ درصد نتیجه شده است که در مقایسه با مقدار خطای متناظر برای استوانهٔ زبر، جدول (۹) در حدود ۲۷ درصد افزایش نشان می‌دهد، همچنین خطاهای ناشی از تخمین C_d و C_m، سرعت و شتاب برای استوانه‌های صاف به ترتیب ۱۳ درصد کاهش، ۹ و ۶۰ درصد افزایش نشان می‌دهند.

واژه‌نامه

1. template
2. Jack-up
3. Delft
4. JONSWAP
5. fast fourier transform
6. Cross-Spectral Density Fitting Method
7. zero crossing point
8. Dean

مراجع

1. Morison, J. R., and et al, "The Force Exerted by Surface Waves on Piles," *American Institute of Mining and Metallurgical Engineerings,* Vol. 189, pp. 147-154, 1950.
2. Mackwood, P. R., "Wave and Current Flows around Circular Cylinders at Large Scale," LIP Project 10D, p. 27, 1993.
3. Isaacson, M., Subbiah, K., and Baldwin, J., "Force Coefficeint Estimation from Random Wave Data,"

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]

International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 255-263, 1991.

4. Isaacson, M., Baldwin, J., and Niwinski, C., "Estimation of Drag and Inertia Coefficients from Random Wave Data," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* Vol. 113, pp. 128-136, 1991.
5. Isaacson, M., and Baldwin, J., "Numerical Simulation of Morison Coefficent Estimation," *International Journal of Offshore and Polar Engineering (IJOPE),* Vol. 1, No. 2, pp. 115-121, 1991.
6. Naghipour, M., "Rigid Circular Cylinder Response due to Combined Effects of Waves and Currents," *Proceeding of the fourth International Conference of Civil Engineering,* Tehran, Vol. 4, No. 6, pp. 55-63, 1997.
7. Chakrabarti, S. K., Technical Note: "On the Formulation of JONSWAP Spectrum," *Applied Ocean Research,* Vol. 6, No. 3, pp. 175-176, 1984.
8. Borgman, L. E., "Statistical Models for Ocean Waves and Wave Forces," *Advanced in Hydroscience,* Vol. 8, pp. 139-181, 1972.
9. Chakrabarti, S. K., *Hydrodynamics of Offshore Structures,* Mechanics publications, New York, 1987.
10. Skjelberia, L., and Hendrickson, J., "Fifth Order Gravity Wave Theory," *Proceeding of Seventh Conference of Coastal Engineering,* pp. 184-196, 1961.
11. Fenton, J. D., "A Fifth-Order Stokes Theory for Steady Waves," *Journal of Waterway, Port, coastal, and Ocean Engineering,* Vol. 3, No. 2, pp. 216-234, 1985.
12. Dean, R. G., "Methodology for Evaluating Suitability of Wave and Wave Force Data for Determining Drag and Inertia Coefficients," *Proceeding of the First International Conference on Behaviour of Offshore Structures,* Trondheim, Norway, pp. 40-64, 1976.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1379.19.1.7.5]