



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



ICOPMAS

## ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی موج ناشی از کشتیرانی در آبراه کارون

عبدالرضا ظهیری<sup>۱</sup>، بهروز دهانزاده<sup>۲</sup> و سهام‌الدین محمودی کردستانی<sup>۳</sup>

### چکیده

رودخانه کارون به طول حدود 1000 کیلومتر، تنها رودخانه قابل کشتیرانی در کشور است. با توجه به محدودیت ظرفیت سیستم‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی و نیز اقتصادی بودن انتقال مواد اولیه سنگ‌آهن کارخانجات صنایع فولاد از بندرامام خمینی به مقصد اهواز توسط کشتی، ضرورت احیای ترابری آبی در رودخانه کارون احساس می‌شود. تردد کشتی و بارج در رودخانه‌ها باعث ایجاد موج شده که ممکن است پایداری سواحل رودخانه و نیز سازه‌های احداثی در طول آن را تهدید کند. در این مقاله، با توجه به سرعت شناور طرح و نیز عمق جریان رودخانه، سرعت و طول موج محاسبه شده است. با توجه به پیچیدگی تعیین ارتفاع موج، با استفاده از 7 مدل مختلف ریاضی و تجربی، ارتفاع امواج ناشی از کشتیرانی محاسبه شده‌اند. سپس با توجه به قدرت و پتانسیل تخریبی امواج در هنگام برخورد با سواحل رودخانه و نیز جنس مصالح و میزان پوشش گیاهی سواحل رودخانه کارون در بازه‌های مختلف (از اهواز تا خرمشهر)، پایداری یا عدم پایداری سواحل مشخص شده است. مطمئناً هزینه تثبیت سواحل ناپایدار باید در ارزیابی اقتصادی طرح لحاظ شود.

**واژه‌های کلیدی:** رودخانه کارون، ترابری آبی، ارتفاع موج ناشی از کشتیرانی، پایداری سواحل رودخانه

### مقدمه

ایران از نظر ترابری رودخانه‌ای دارای استعداد قابل توجهی است اما انجام این کار به مطالعات فنی و اقتصادی بسیار قوی نیاز دارد. استان خوزستان با وجود رودخانه‌های بزرگ، دارای جایگاه و اهمیت بسیار ممتازی در طرح‌های مهندسی منابع آب کشور است. در این میان، رودخانه کارون بزرگ با آورد آب سالانه 25 میلیارد مترمکعب و طول 1000 کیلومتر مهمترین رودخانه استان محسوب می‌شود. این رودخانه تنها رودخانه قابل کشتیرانی در کشور است. از سال 1375 مطالعات طرح ساماندهی این رودخانه با اهداف کنترل سیلاب، حفاظت سواحل، کنترل کیفیت آب و امکان‌سنجی ترابری رودخانه‌ای شروع شده است. از مهمترین بخشهای مطالعاتی این طرح، بررسی امکان احیاء ترابری آبی در این رودخانه در بازه اهواز تا خرمشهر و سپس اتصال آن به خلیج فارس از طریق اروندرود است. با اجرای این طرح، رودخانه کارون به عنوان مسیر بین‌المللی تجاری و تفریحی در محدوده خاورمیانه رونق خاصی پیدا کرده و در ارتقاء اقتصادی منطقه و استان موثر خواهد بود. در این صورت علاوه بر درآمدهای ناشی از گردشگری، شهرهای خرمشهر، آبادان و اهواز مرکز تجارت کالا شده و مناطق وسیع حاشیه رودخانه کارون حداقل اهواز-خرمشهر به عنوان بازار محصولات کشاورزی از اهمیت و ارزش خاصی برخوردار خواهند شد. اگرچه در طرح ترابری آبی رودخانه کارون، مطالعات فنی، اقتصادی و مالی بسیار مفصلی انجام شده است اما هیدرولیک امواج ناشی از کشتیرانی و اثرات آن بر پایداری سواحل رودخانه مورد توجه قرار نگرفته و صرفاً 2 میلیارد تومان برای جبران تخریب سواحل بر اثر امواج کشتی در هزینه‌های طرح پیش‌بینی شده است. با توجه به اهمیت این طرح نیز هزینه بسیار زیاد عملیات تثبیت سواحل فرسایش یافته، در این مقاله مشخصات و اثرات امواج حاصل از تردد شناورها مورد بررسی قرار گرفته است.

### مشخصات طرح و محدوده موردنظر

رودخانه کارون در طول مسیر خود دارای مکانیسم‌های متفاوتی از فرسایش‌های سطحی و عمقی سواحل می‌باشد [1]. بررسی‌های صورت گرفته در زمینه پتانسیل فرسایش‌پذیری سواحل رودخانه کارون نشان می‌دهد که در شرایط فعلی، سواحل بازه اهواز-دارخوین به طول حدود 150 کیلومتر دارای وضعیت فرسایشی و سواحل بازه دارخوین-خرمشهر به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم گز و پده دارای وضعیت

1 - دفتر پژوهش و مطالعات رسوب، مدیریت مطالعات رسوب سازمان آب و برق خوزستان

2 - عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شوشتر

3 - مدیریت مطالعات رسوب، معاونت مطالعات پایه سازمان آب و برق خوزستان

غیرفرسایشی می‌باشند. از این میان، سواحل محدوده دارخوین به طول حدود 25 کیلومتر دارای وضعیت فرسایشی عمقی بسیار شدیدی هستند که باید به عنوان اولویت اول اجرای عملیات کنترل فرسایش مورد توجه قرار گیرند.

مطالعات نشان می‌دهد جنس اغلب مصالح سواحل رودخانه کارون در محدوده طرح از نوع سیلت می‌باشد. همچنین بررسی دانه‌بندی نشان می‌دهد که قطر متوسط ذرات 0/006-0/14 میلیمتر بوده که حدود 90 درصد آنها دارای قطر متوسطی کمتر از 0/04 میلیمتر است. مصالح سواحل رودخانه دارای خاک غیریکنواخت (دانه‌بندی خوب) می‌باشند [1].

در طرح ساماندهی آبراه کارون، مشاورین مختلف پیشنهادهای متفاوتی را برای هندسه شناور طرح ارائه داده‌اند: الف) قطر بارج 5000 تنی و کشتی 1000 تنی، ب) قطر بارج 1600 تنی، ج) بارج خودکشش 1250 تنی. عمق آب‌خور این شناورها هم 2/2-3/6 متر در نظر گرفته شده است. هندسه کانال کشتیرانی در این طرح به عرضهای 60 و 80 متر پیش‌بینی شده است [2،3،4]. فاصله خط کشتیرانی از ساحل رودخانه کارون در نقاط مختلف، متغیر بوده و در محل قوس حتی به کمتر از 10 متر نیز می‌رسد.

### مشخصات هیدرولیکی امواج ناشی از کشتیرانی

در رودخانه‌های قابل کشتیرانی بر خلاف دریاها و اقیانوسها، به دلیل فش (بادگیر Fetch) کوتاه، باد تاثیر چندانی بر تولید موج ندارد. به طور مثال در رودخانه کارون حداکثر ارتفاع موج ناشی از وزش بادهای 6 ساعته با دوره بازگشت 50 سال فقط حدود 10 سانتیمتر است. در این حالت، امواج غالب و مؤثر در طراحی، امواج ناشی از تردد شناورها می‌باشد. در اثر حرکت شناورها شامل کشتی، بارج و لنج امواجی حاصل می‌گردند که ارتفاع آنها در محل سواحل رودخانه تابع پیچیده‌ای از عمق آب رودخانه، سطح مقطع آبراهه، عرض فوقانی سطح آب در رودخانه، هندسه جلویی شناور، سرعت شناور، طول شناور، آب‌خور شناور (Draft)، سطح مقطع بخش مستغرق شناور، فاصله شناور تا ساحل رودخانه و جرم حجمی آب رودخانه می‌باشد [5،6]. این امواج در هنگام برخورد با سواحل رودخانه و ایجاد ضربات سایشی نوسانی، ممکن است باعث ناپایداری بافت خاک سواحل و در نتیجه فرسایش آنها شود. در این ارتباط مشخصات شناورهای طرح، هیدرولیک رودخانه و وضعیت سواحل رودخانه از نظر جنس و دانه‌بندی مصالح اهمیت زیادی دارد.

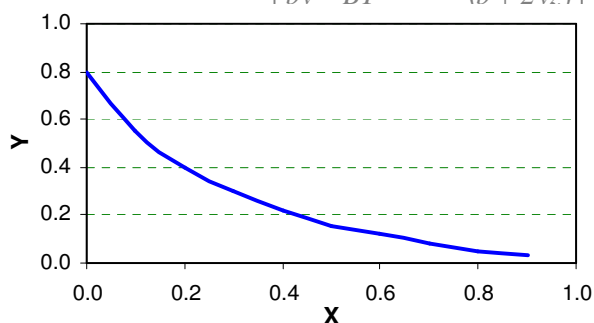
برای تعیین حداکثر سرعت شناور، ابتدا باید با استفاده از مشخصات هندسی شناور طرح، پارامتر X را محاسبه نمود:

$$X = \frac{BT}{y(b + yz)} \quad (1)$$

که B عرض شناور، T عمق آب‌خور شناور، y عمق آب در رودخانه، b عرض بستر رودخانه و z شیب جانبی سواحل می‌باشند. سپس با استفاده از نمودار شکل 1 مقدار پارامتر  $Y = \frac{V_{\max}}{\sqrt{gy}} \sqrt{\frac{b + 2yz}{b + yz}}$  محاسبه می‌شود. در این پارامتر، تمامی متغیرها به جز  $V_{\max}$  معلوم می‌باشند که به این ترتیب متغیر مجهول  $V_{\max}$  به دست می‌آید.

سرعت جریان آب برگشتی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_b = \frac{0.7V_{\max} \left( BT + \frac{V_{\max}}{g} (b + 2yz) \right)}{\left( bv - BT - \frac{V_{\max}}{g} (b + 2yz) \right)} \quad (2)$$



### شکل 1: گراف تعیین سرعت حداکثر شناور

برای بررسی قدرت تخریبی امواج حاصله، باید سرعت جریان حاصل از شکست موج در ساحل محاسبه شود. سرعت جریان موج برخوردی با ساحل ( $V_w$ ) از رابطه ذیل محاسبه خواهد شد:

$$V_w = \sqrt{gH_{\max}} \quad (3)$$

که  $H_{\max}$  حداکثر ارتفاع موج در ساحل رودخانه است. اگر سرعت شکست موج یا سرعت جریان آب برگشتی از سرعت آستانه حرکت مصالح تشکیل دهنده ساحل بزرگتر باشد آنگاه فرسایش اتفاق خواهد افتاد. سرعت آستانه حرکت مصالح مختلف رودخانه‌ای در جدول 1 ارائه شده است [5].

جدول 1: سرعت آستانه فرسایش مصالح رسوبی سواحل رودخانه

سرعت آستانه فرسایش (m/s)	جنس مصالح سواحل رودخانه
0/2	رس
0/2	سیلت
0/3	ماسه ریز
0/5	ماسه متوسط
0/6	ماسه لومی
0/9	لوم
1/0	شن

### روابط تعیین حداکثر ارتفاع موج در ساحل رودخانه ( $H_{\max}$ )

برای محاسبه ارتفاع امواج ناشی از تردد شناورها، روابط تجربی زیادی ارائه شده است. این روابط حاصل مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی اندازه‌گیری امواج ناشی از کشتیرانی است. اغلب این روابط بر اساس داده‌های اندکی استخراج شده و در شرایط رودخانه‌ای و نوع شناورهای خاص و محدودی بکار گرفته شده‌اند. مهمترین محدودیت این روابط، عدم تعریف مشخص هندسه بخش جلویی شناور می‌باشد. لازم به ذکر است که امواج تولید شده نسبت به زمان دارای ارتفاع متغیری هستند اما با توجه به هدف طراحی، حداکثر ارتفاع موج مهم می‌باشد. برخی از روابط ارائه شده در این زمینه عبارتند از: (Bhowmik et al., Bhowmik (1975), Balanin & Bykov (1965), Kurata, Johnson (1958), Hay (1967), Das (1969), Brebner, et al. (1966), Bidde (1968), (1982, 1991), Sorensen (1966a,b), Ofuya (1970), Nece, et al. (1985), Maynard & Oswalt (1986), & Oda (1984), Zabawa & Ostrom (1980)

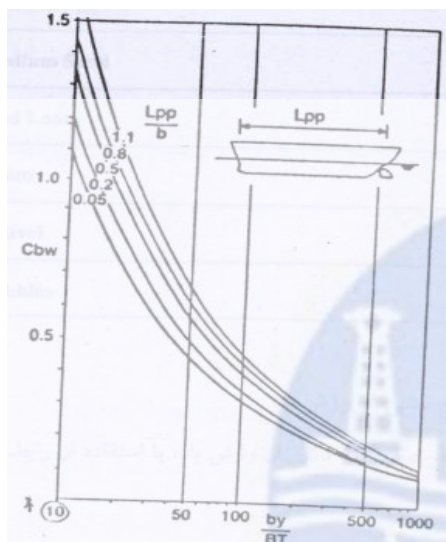
1- بالانین و بایکوف (1965) بر اساس طرحهای کشتیرانی رودخانه‌ای کشور شوروی سابق، رابطه زیر را ارائه کرده‌اند:

$$H_{\max} = \frac{1.25V_{\max}^2}{g} \left[ 1 - \left( 1 - (4.2 + S_e)^{-0.5} \right) \left( \frac{S_e - 1}{S_e} \right)^2 \right] \left[ \frac{2 + \sqrt{w/L_v}}{1 + \sqrt{w/L_v}} \right] \quad (4)$$

که  $S_e$  ضریب مقطع رودخانه (نسبت سطح مقطع رودخانه به مساحت خیس شده مقطع وسط کشتی Midship)،  $w$  عرض فوقانی رودخانه و  $L_v$  طول کل کشتی است. رابطه فوق برای رودخانه‌های با عرض کم و شناورهای خاص منطقه مورد مطالعه معتبر است. برای سادگی محاسبات، رابطه فوق به صورت زیر خلاصه شده است:

$$H_{\max} = C_{bw} \frac{V_{\max}^2}{2g} \quad (5)$$

که ضریب  $C_{bw}$  به کمک گراف شکل 2 به دست می‌آید. در این گراف،  $L_{pp}$  طول کشتی در مقطع وسط آن است.



شکل 2: گراف مربوط به تعیین ضریب  $C_{bw}$  در رابطه بالانین و بایکوف (1965)

2- ارتش امریکا (1980) رابطه‌ای مشابه رابطه (3) به فرم ساده زیر برای رودخانه اوهایو ارائه کرده است:

$$H_{\max} = 0.0448 V_{\max}^2 \left( \frac{T}{L_V} \right)^{0.5} \left( \frac{S_e}{S_e - 1} \right)^{2.5} \quad (6)$$

اگرچه مشخصات رودخانه و شناورهای مورد استفاده در استخراج این رابطه مشخص نیست اما به دلیل اینکه رابطه فوق مستقل از فاصله از شناور طرح است به احتمال زیاد مربوط به رودخانه‌های کم عرض باشد.

3- باومیک (1975) با اندازه‌گیری ارتفاع موج در سرعت و فواصل مختلف شناور، رابطه رگرسیونی زیر را ارائه کرده است:

$$\frac{H_{\max}}{T} = 0.0345 V_{\max}^{1.174} \left( \frac{x}{L_V} \right)^{-0.915} \quad (7)$$

که  $x$  فاصله ساحل رودخانه از مسیر تردد شناور و  $V_{\max}$  بر حسب مایل در ساعت است. رابطه فوق برای آبهای عمیق معتبر است.

4- باومیک و همکاران (1982) بر اساس قطار بارجهای دو رودخانه ایلی‌نویز و می‌سی‌سی‌پی، رابطه زیر را با ضریب رگرسیونی 0/87 ارائه کرده‌اند:

$$\frac{H_{\max}}{T} = 0.133 \frac{V_{\max}}{\sqrt{gT}} \quad (8)$$

5- کنگره دائمی بین‌المللی انجمن کشتیرانی (PIANC) رابطه زیر برای ترابری رودخانه‌ای را ارائه کرده است (1987):

$$H_{\max} = d \left( \frac{S}{d} \right)^{-0.33} F^4 \quad (9)$$

که  $d$  عمق آب ناحیه ساکن جریان رودخانه،  $S$  فاصله لبه کشتی تا ساحل رودخانه و  $F$  عدد فرود می‌باشد.

6- سورنسون و وگل (1984) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی موجود، روابط زیر را پیشنهاد داده‌اند:

$$H_{\max} = \alpha \left( \frac{x}{W^{0.33}} \right)^n W^{0.33} \quad (10)$$

که  $W$  حجم آب جابجا شده توسط شناور بوده و ضرایب  $\alpha$  و  $n$  به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\log \alpha = (-0.6F^{-1}) + (0.75F^{-1.125}) \log(d^*) + (2.653F - 1.95) \log^2(d^*) \quad \text{و} \quad n = \beta(d^*)^\delta$$

$$d^* = \frac{d}{W^{0.33}} \quad \text{و} \quad \beta = \begin{cases} -0.225F^{-0.699} & 0.20 < F < 0.55 \\ -0.342 & 0.55 < F < 0.8 \end{cases} \quad \text{و} \quad \delta = \begin{cases} -0.118F^{-0.356} & 0.20 < F < 0.55 \\ -0.146 & 0.55 < F < 0.8 \end{cases} \quad \text{که}$$

7- باومیک و همکاران (1991) رابطه رگرسیونی زیر را بر اساس کشتی‌های تفریحی کوچک ارائه کرده‌اند:

$$H_{\max} = 0.537V_{\max}^{-0.346} x^{-0.345} L_V^{0.56} T^{0.355} \quad (11)$$

### بررسی عددی وضعیت هیدرولیکی امواج در رودخانه کارون

با توجه به شرایط هیدرولیک رودخانه کارون در بازه اهواز-خرمشهر، مشخصات هندسی شناور طرح و نیز جنس سواحل رودخانه، محاسبات لازم به کمک برخی از روابط ساده فوق انجام شده است. بر اساس شناورهای طراحی شده توسط مشاور سازه‌پدازی [2] شامل 12 متر عرض و عمق آب‌خور 2/2 متر برای کشتی 1000 تنی و 19 متر طول و 2/5 متر عمق آب‌خور قطار بارج 5000 تنی، با فرض دبی متوسط جریان در رودخانه کارون معادل 500 مترمکعب بر ثانیه، عمق متوسط جریان 4 متر، عرض بستر رودخانه 200 متر، محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که سرعت حداکثر شناورهای طرح 3-1/5 متر بر ثانیه، حداکثر ارتفاع امواج ایجاد شده در محل سواحل رودخانه 0/10-0/35 متر و سرعت آب برگشتی به سمت ساحل 0/12-0/2 می‌باشد. با توجه به جنس سواحل رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه که اغلب شامل سیلت و درصد کمی رس می‌باشد و با استفاده از جدول 1، مشخص می‌شود که این سواحل در آستانه فرسایش ناشی از فعالیت تخریبی امواج قرار خواهند گرفت. نتایج فوق با محاسبات مقدماتی و فرضیات زیاد به دست آمده است. برای دقت بیشتر نتایج، باید محاسبات دقیقتری بر اساس بازه‌بندی رودخانه کارون در حدفاصل اهواز-دارخوین و نیز شناورهای دیگر طرح انجام شود.

### تشکر و قدردانی

مولفین این مقاله از حمایت‌های دفتر تحقیقات سازمان آب و برق خوزستان تشکر می‌کنند.

### مراجع

- 1- مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو، مطالعات ساماندهی آبراه کارون، فرسایش کناره‌ها و هیدرولیک رسوب، 1380
- 2- مهندسین مشاور سازه‌پدازی، مطالعات ترابری رودخانه‌ای، طراحی هندسی و لایروبی آبراه، 1381
- 3- مهندسین مشاور آداب دانان، مطالعات کالبدی طرح ترابری آبی آبراه کارون، 1383
- 4- Scott Wilson Piesold, Karun and Dez river system, Transportation Component, 2005
- 5- مسجدی، ع. بررسی استهلاک انرژی پتانسیل موج با استفاده از گیاه نی در شیب سواحل رودخانه‌ها، طرح تحقیقاتی سازمان آب و برق خوزستان، 1381
- 6- Sorensen, R. Report for the upper Mississippi river-Illinois waterway system navigation study, 1997.

## Hydraulic Parameters of Waves in Karun River

### Abstract

Iran is a country which has the capability of river shipping. However utilization of such capability needs strong economic and technical studies. Karun River, being about 1000 km in length, is the sole river (in Iran) that is proper for shipping. Given the limitations that exist in capacity of road/railroad transportation systems and because of cost-efficiency of shipping the ironstone - as a material needed by steel industry - from Imam Khomeini port to Ahvaz, it seems necessary to focus on river transportation in Karun. Ships traffic at waterways cause waves which endangers the stability of coastal areas and structures. This article intends to calculate the speed and length of waves. Given the complexity of mechanism of determining the height of a wave, we aim to do that using seven mathematical and experimental models. Then, considering the waves destructive potential as well as type of plants that cover such areas (from Ahvaz to Khoramshahr), we determine to what extent Karun coasts are stable (or unstable). The cost that is incurred due to stabilization of coastal areas must absolutely be included in economic feasibility studies.

**Keywords:** *Karun River, water transportation, wave height, coastal stability, Persian Gulf, river, transportation*