

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی

پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش سازه دریایی

برآورد مشخصات امواج سطحی ناشی از حرکت شناور در بندرگاه

نگارش:

آرش عباس نیا

استاد راهنما:

دکتر محمود غیائی

استاد مشاور:

دکتر رضا غیائی

شهریور ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و تمام معلمین دلسوزم از روزهای ابتدایی دبستان، تا آخرین روزهای دانشگاه

بررسی جریان‌ها و امواج ناشی از حرکت اجسام شناور و غوطه‌ور در دریا از اهمیت زیادی برخوردار است. نیروهای ناشی از این امواج خصوصاً به منظور طراحی سازه‌های ساحلی و فراساحلی اهمیت فراوان می‌یابد، همچنین در طراحی سواحل و بندرگاه‌ها تخمین و برآورد این نیروها باید مد نظر قرار گیرد.

در این پایان‌نامه به منظور بررسی امواج سطحی در محیط بندرگاه، روش عددی با استفاده از روابط گرین پیشنهاد گردیده است. محیط بندرگاه به یک کانال عریض شبیه‌سازی شده و حرکت اجسام کره، بیضی‌گون و بدنه ویگلی به عنوان اجسام مغروق و شناور مدل گردیده و پروفیل امواج بدست آمده است. در حل مسئله از روش جریان پتانسیل استفاده شده است، با فرض آنکه سیال پیرامونی، غیر قابل تراکم، غیرویسکوز و غیرچرخشی است، معادله لاپلاس با استفاده از شرایط مرزی مسئله حل گردیده است. بدین منظور، از روش تصویرگیری استفاده شده و با توجه به انتگرال مقدار اصلی که در ساختار این تابع گرین موجود بود، تابع، جهت برنامه نویسی بوسیله روش‌های عددی-تحلیلی مانند قضیه انتگرال کوشی و فرمول جمع پواسون آماده سازی گردید. با یک شبکه بندی با سازمان، سطح مدل را به شبکه‌های مثلثی تبدیل کرده و با فرض اینکه پتانسیل اغتشاش بر روی سطح هر شبکه به طور ثابت توزیع شده و با توزیع چشمه-ها بر روی سطح مدل در مرکز هر شبکه، به تشکیل معادله گرین روی سطح پرداخته شد. در نتیجه انتگرال گیری گرین بر روی سطح یک دستگاه معادلات چند معادله چند مجهول پدید آمد که برای حل آن از روش محاسباتی حذف به طریق گاوس استفاده گشت. با تشکیل دوباره معادله گرین به پتانسیل سرعت هر نقطه از محیط دست یافته می‌شود. با استفاده از پتانسیل حاصل از نقاط روی سطح آزاد و شرایط سینماتیکی سطح آزاد بالا آمدگی سطح تخمین زده می‌شود.

کلمات کلیدی: *المان مرزی، بندرگاه، کانال، جریان پتانسیل، روش تصویرگیری*

شرح	علائم
تابع پتانسیل کل	$\Phi$
تابع پتانسیل اغتشاش	$\phi$
تابع گرین	$G$
بالا آمدگی سطح آزاد	$\eta$
ضریب سرعت	$V_1$
فاصله میان چشمه و نقطه محیطی	$R, r$
مؤلفه $x$ سرعت	$u$
مؤلفه $y$ سرعت	$v$
مؤلفه $z$ سرعت	$w$
شدت جریان‌های ساده	$\mu$
قدرت چشمه	$m$
عمق آب	$h, d$
عرض کانال	$W$
عدد فرود عمق	$F_d$
عدد فرود طول	$F_L$
سرعت جریان آزاد	$U$
شتاب ثقل زمین	$g$
بردار نرمال سطح	$\vec{n}$
ضریب فرورفتگی در آب	$\alpha$
عمق فرورفتگی در آب	$f$

فصل اول: پیش گفتار

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- امواج ناشی از حرکت شناورها ..... ۳
- ۳-۱- بندرگاه ..... ۷
- ۴-۱- نگرشی بر موضوع مسئله ..... ۱۱

فصل دوم: مطالعات انجام شده

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲- بررسی زمینه‌های مرتبط با موضوع پایان نامه ..... ۱۴
- ۳-۲- مطالعات انجام شده ..... ۱۵

فصل سوم: تئوری و فرمول‌بندی

- ۱-۳- مقدمه ..... ۲۸
- ۱-۱-۳- پتانسیل سرعت ..... ۲۸
- ۲-۱-۳- پایداری جرم ..... ۲۹
- ۳-۱-۳- شرایط مرزی برای جریانهای غیر چسبنده ..... ۳۰
- ۴-۱-۳- جریانهای ساده ..... ۳۰
- ۲-۳- شرح مسئله ..... ۳۵
- ۳-۳- فرضیات اصلی و شرایط مرزی در آب کم عمق ..... ۳۶

- ۳-۴- پتانسیل سرعت یک چشمه در آب کم عمق ..... ۳۸
- ۳-۵- پتانسیل یک چشمه در محیطی شبیه به بندرگاه ..... ۳۹
- ۳-۶- شبیه سازی عددی مدل بوسیله روش المان مرزی ..... ۴۹
- ۳-۷- حل دستگاه معادلات خطی ..... ۵۳
- ۳-۸- شبیه سازی عددی سطح آزاد ..... ۵۷

فصل چهارم: نتایج عددی محاسبه شده و معتبرسازی

- ۴-۱- مقدمه ..... ۶۱
- ۴-۲- معرفی برنامه ..... ۶۱
- ۴-۳- حرکت یک چشمه در کانال کم عمق و امواج سطحی ناشی از حرکت آن ..... ۶۲
- ۴-۴- شبکه بندی مدل ها ..... ۸۰
- ۴-۵- حرکت کره مغروق در کانال کم عمق و امواج سطحی ناشی از حرکت آن ..... ۸۹
- ۴-۶- حرکت نیمکره های شناور در کانال کم عمق و امواج سطحی ناشی از حرکت آن ..... ۱۰۶
- ۴-۷- حرکت بدنه ویگلی در کانال کم عمق و امواج سطحی ناشی از حرکت آن ..... ۱۱۳

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهاد جهت ادامه کار

- ۵-۱- مقدمه ..... ۱۱۹
- ۵-۲- نتیجه گیری از نتایج ..... ۱۲۰
- ۵-۳- پیشنهادات جهت ادامه کار ..... ۱۲۱

مراجع ..... ۱۲۳

ضمیمه الف: فرمول جمع پواسون ..... ۱۲۹

چکیده لاتین ..... ۱۳۱



- شکل ۱-۱- نمایشی از الگوی امواج حاصل از حرکت شناور..... ۴
- شکل ۱-۲- دسته بندی بندرگاه‌ها..... ۱۰
- شکل ۱-۳- کره‌ای به عنوان مدل در مقابل جریان آزاد..... ۳۶
- شکل ۲-۳- چشمه‌ای در آب کم عمق و تصویرش..... ۳۸
- شکل ۳-۳- نمایشی از موقعیت چشمه جهت تصویر گیری از آن در حضور دیواره‌های کانال..... ۴۲
- شکل ۴-۳- نمایشی از شبکه بندی سطح مدل به شکل مثلث..... ۵۰
- شکل ۵-۳- نمایشی از توزیع چشمه و نقاط محیطی بر روی سطح مدل..... ۵۲
- شکل ۶-۳- چگونگی ارتباط میان نقاط محیطی و شبکه های اطراف آنها..... ۵۳
- شکل ۷-۳- نمایشی از شبکه بندی سطح آزاد آب و توزیع نقاط محیطی بر روی آن..... ۵۷
- شکل ۸-۳- نمایشی ترسیمی از ترتیب نقاط در روش تفاضل مرکزی..... ۵۹
- شکل ۱-۴- نمایشی از یک چشمه در آب کم عمق در جریان یکنواخت..... ۶۴
- شکل ۲-۴- الگوی موج تشکیل شده در سطح آزاد در اثر حرکت یک چشمه مغروق در کانال با عرض ۱۰۰ متر با عدد فرود  $0/5$ ..... ۷۸
- شکل ۳-۴- الگوی موج تشکیل شده در سطح آزاد در اثر حرکت یک چشمه مغروق در کانال با عرض ۱۰۰ متر با عدد فرود  $0/7$ ..... ۸۰
- شکل ۴-۴- نمایشی از تشکیل ماتریس شبکه بندی و ترتیب چیدمان نقاط..... ۸۳
- شکل ۵-۴- نمایشی از تشکیل بردارها بر روی اضلاع یک مثلث برای تشکیل بردار نرمال..... ۸۵
- شکل ۶-۴- نمایشی از تشکیل ماتریس ارتباط و انتخاب نقاط مجازی مثلث‌ها..... ۸۷

- شکل ۴-۷- نمایی از یک کره شبکه بندی شده با ۱۰۶۴ شبکه مثلثی..... ۸۸
- شکل ۴-۸- نمایی از یک نیم کره شبکه بندی شده با ۵۱۲ شبکه مثلثی..... ۸۸
- شکل ۴-۹- نمایی از بدنه ویگلی شبکه بندی شده با ۲۰۰۰ شبکه مثلثی..... ۸۹
- شکل ۴-۱۰- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور کره‌ای در وسط کانال واقع در ۲ متر زیر سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت‌های مختلف..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۱- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از کره‌ای در وسط کانال واقع در ۱/۵ متر زیر سطح آب در تحت جریان آزاد با ۵ متر بر ثانیه..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۲- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از کره‌ای در وسط کانال واقع در ۱/۵ متر زیر سطح آب در تحت جریان آزاد با ۷ متر بر ثانیه..... ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور نیم کره‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت‌های مختلف..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۴- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۶۰۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور نیم کره‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه..... ۱۱۱

- شکل ۴-۱۵- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۶۰۰ متر و عمق ۱۰۰۰ متر ناشی از حضور نیم‌کره‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۶- الگوی موج انتشار یافته وانعکاس یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور نیم‌کره‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت ۵ متر بر ثانیه..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۷- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور بدنه ویگلی‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت‌های مختلف..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۸- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۶۰۰ متر و عمق ۲۰ متر ناشی از حضور بدنه ویگلی‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه..... ۱۱۶
- شکل ۴-۱۹- الگوی موج انتشار یافته بر روی سطح آزاد کانالی با عرض ۶۰۰ متر و عمق ۱۰۰۰ متر ناشی از حضور بدنه ویگلی‌ای در وسط کانال هم مرکز با مبدأ مختصات در سطح آب در تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه..... ۱۱۶
- فلوچارت ۴-۱- تقسیم بندی انواع شبکه بندی..... ۸۱

- جدول ۱-۱- برخی مقادیر اندازه گیری شده برای ارتفاع امواج ناشی از حرکت شناورها..... ۸
- نمودار ۴-۱- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.5$ )..... ۶۶
- نمودار ۴-۲- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.5$ )..... ۶۷
- نمودار ۴-۳- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.7$ )..... ۶۷
- نمودار ۴-۴- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.7$ )..... ۶۸
- نمودار ۴-۵- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.9$ )..... ۶۸
- نمودار ۴-۶- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.5$  ,  $\alpha=0.9$ )..... ۶۹
- نمودار ۴-۷- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عمق فرورفتگی متفاوت در عدد فرود عمق ثابت ( $F_d=0.5$ )..... ۶۹
- نمودار ۴-۸- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.5$ )..... ۷۳
- نمودار ۴-۹- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.5$ )..... ۷۴
- نمودار ۴-۱۰- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.7$ )..... ۷۴
- نمودار ۴-۱۱- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.7$ )..... ۷۵
- نمودار ۴-۱۲- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.9$ )..... ۷۵
- نمودار ۴-۱۳- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عرض کانال متفاوت ( $F_d=0.7$  ,  $\alpha=0.9$ )..... ۷۶
- نمودار ۴-۱۴- ضریب سرعت برای یک چشمه مغروق با عمق فرورفتگی متفاوت در عدد فرود عمق ثابت ( $F_d=0.7$ )..... ۷۶
- نمودار ۴-۱۵- پتانسیل اغتشاش بر روی سطح کره در آب غیر محدود تحت جریان آزاد ۱ متر ثانیه..... ۹۱

- نمودار ۴-۱۶- موج حاصل در سمت چپ و راست محور  $x$  ( $y = 0.75$  ,  $-0.75$ ) از کره‌ای، در وسط کانال با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر واقع در ۲ متری از سطح آزاد آب تحت جریان آزاد ۵ متر بر ثانیه (۱۰ برش و ۲۴ شبکه برای هر برش).....۹۳
- نمودار ۴-۱۷- موج حاصل در سمت چپ و راست محور  $x$  ( $y = 0.75$  ,  $-0.75$ ) از کره‌ای، در وسط کانال با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر واقع در ۲ متری از سطح آزاد آب تحت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه (۱۰ برش و ۲۴ شبکه برای هر برش).....۹۳
- نمودار ۴-۱۸- موج حاصل در سمت چپ و راست محور  $x$  ( $y = 0.75$  ,  $-0.75$ ) از کره‌ای، در وسط کانال با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر واقع در ۲ متری از سطح آزاد آب تحت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه (۸ برش و ۱۲ شبکه برای هر برش).....۹۴
- نمودار ۴-۱۹- امواج سطحی در وسط کانالی با عمق ۱۰۰۰ متر و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره‌ای در وسط کانال تحت جریا آزاد با سرعت ۱ متر بر ثانیه در فاصله‌های متفاوت مرکز کره تا مبدأ مختصات روی سطح آزاد.....۹۶
- نمودار ۴-۲۰- مقایسه امواج سطحی در وسط کانالی با عمق ۱۰۰۰ متر و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره- ای در وسط کانال تحت جریا آزاد با سرعت ۱ متر بر ثانیه در فاصله‌های متفاوت مرکز کره تا مبدأ مختصات روی سطح آزاد با عمق فرورفتگی متفاوت.....۹۷
- نمودار ۴-۲۱- امواج سطحی در وسط کانالی با عمق ۱۰۰۰ متر و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره‌ای در وسط کانال تحت جریا آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در فاصله‌های متفاوت مرکز کره تا مبدأ مختصات روی سطح آزاد.....۹۹

- نمودار ۴-۲۲- مقایسه امواج سطحی در وسط کانالی با عمق ۱۰۰۰ متر و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره-  
ای در وسط کانال تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در فاصله‌های متفاوت مرکز کره تا مبدأ  
مختصات روی سطح آزاد..... ۱۰۰
- نمودار ۴-۲۳- امواج سطحی در وسط کانالی با عمق متفاوت و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره‌ای در  
وسط کانال تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در فاصله ۲ متری مرکز کره از مبدأ مختصات  
روی سطح آزاد..... ۱۰۱
- نمودار ۴-۲۴- مقایسه امواج سطحی در وسط کانالی با عمق متفاوت و عرض ۶۰۰ متر ناشی از کره‌ای  
در وسط کانال تحت جریان آزاد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در فاصله ۲ متری مرکز کره تا مبدأ مختصات  
روی سطح آزاد..... ۱۰۲
- نمودار ۴-۲۵- موج حاصل در سمت چپ و راست محور  $x$  ( $y=2$  ,  $-2$ ) از نیم کره‌ای، در وسط  
کانالی با عرض ۳۰ متر و عمق ۲۰ متر و هم نقطه با مبدأ مختصات در سطح آزاد آب تحت جریان آزاد  
۵ متر بر ثانیه (۵ برش و ۲۴ شبکه برای هر برش)..... ۱۰۸

# فصل اول

## پیشگفتار

## ۱-۱- مقدمه

سازه‌های ساحلی و دریایی در بر گیرنده طیف وسیعی از سازه‌ها می‌باشند. در یک تقسیم‌بندی کلی شاید بتوان این سازه‌ها را به دو گروه اصلی سازه‌های ساحلی و سازه‌های دریایی (فراساحلی) تقسیم بندی نمود.

سازه‌های ساحلی برای کاربردهای مختلفی از جمله ایجاد امکان پهلوگیری شناورها، ایجاد سدهای حفاظتی در مقابل جزر و مد و نصب خطوط انتقال نفت و گاز احداث می‌گردد. پس در طراحی این گونه سازه‌ها نفوذ موج به درون آنها و چگونگی انتشار این امواج و یا امواج القایی حاصل از حرکت شناورها و هر عامل دیگر القای موج از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود.

امواج بوجود آمده بوسیله شناورها در آب‌های ساحلی، قادر به واژگون کردن یا به گل نشستن قایق‌های کوچک و کشتی‌های بزرگ لنگر اندازی شده می‌باشد. این امواج می‌توانند باعث فرسایش و از بین بردن موج شکن‌ها شوند. هنگامی که امواج به ساحل می‌رسند ارتفاع موج افزایش پیدا می‌کند و موج می‌شکند. این حالت ممکن است هنگامی اتفاق بیافتد که کشتی خارج از دید است و باعث شگفتی شناگران می‌شود که یک فاکتور خطر به حساب می‌آید. [۲۸]

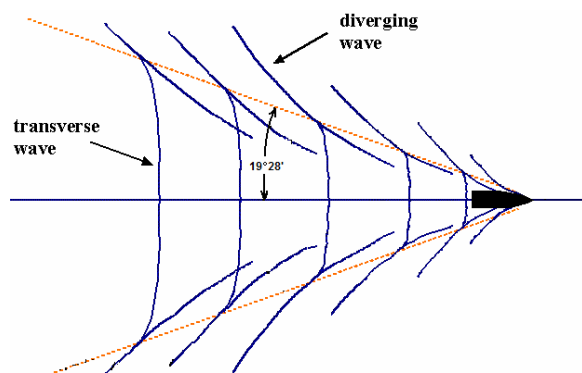


## ۱-۲ امواج ناشی از حرکت شناورها

در حدود سال‌های ۱۹۰۰، لرد کلوین<sup>۱</sup> بر روی پدیده بوجود آمدن امواج مطالعه نمود. او یک نقطه فشاری مجرد را در نظر گرفت که در سطح آب و در خط مستقیم حرکت می‌کند و باعث بوجود آمدن امواجی با مشخصه‌های خاص می‌گردد. تمامی امواج، درون دو خط مستقیم که از نقطه فشاری شروع می‌شوند قرار می‌گیرند که هر کدام از خطوط فوق دارای زاویه ۱۹/۵ درجه نسبت به مسیر حرکت هستند. فرم امواج کلوین نمایش دهنده مقدار زیادی از مشخصه‌های سیستم امواج کشتی است.

هنگامی که یک شناور سطح آب را طی می‌کند، فشار متغییری در طول پوسته شناور منتشر می‌شود. فشار در انحنای رأس و در عقب شناور افزایش می‌یابد و در طول قسمت‌های میانی افت می‌کند. این تفاوت فشار، سلسله موج‌هایی را تولید می‌کند که از انحنای رأس شناور تولید و منتشر می‌شود. بخش کمتر از امواج از قسمت عقب منتشر می‌شوند. ارتفاع امواج بوجود آمده به عواملی همچون سرعت شناور، هندسه انحنای رأس و عقب شناور و فاصله بین دیواره‌های شناور تا کناره‌ها و بستر کانال بستگی دارند. دوره تناوب و جهت امواج ایجاد شده تنها به سرعت شناور و عمق آب بستگی دارد. الگوی تاج امواج تولید شده از انحنای رأس یک شناور که با سرعت ثابت در آب‌های عمیق حرکت می‌کند در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Lord Kelvin



شکل ۱-۱- نمایشی از الگوی امواج حاصل از حرکت شناور [۳۴]

گروه مقارنی از امواج واگرا شونده<sup>۱</sup>، به صورت مایل نسبت به راستای حرکت شناور منتشر می‌شوند. علاوه بر این گروهی از امواج عرضی<sup>۲</sup> نیز وجود دارند که در امتداد خط حرکت منتشر می‌شوند. مکان هندسی نقاط برخورد امواج عرضی و امواج واگرا شونده خطی را تشکیل می‌دهد که با امتداد حرکت شناور زاویه ۱۹ درجه و ۲۸ دقیقه را می‌سازد. بیشترین مقادیر ارتفاع موج بر روی همین خط ایجاد می‌شود یعنی جایی که امواج عرضی و امواج واگرا شونده به یکدیگر برخورد می‌کنند. اگر سرعت شناور افزایش یابد، این شکل کلی حفظ می‌شود اما امواج ایجاد شده توسعه می‌یابند و طول موج و به طور متناسب دوره تناوب آنها افزایش می‌یابد. چنانچه مشاهده شد، الگوی ثابتی برای تاج امواج شکل می‌گیرد و سرعت موج نیز متناسب با حرکت شناور است. که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد: [۲۹]

$$C = V_s \cdot \cos \theta \quad (1-1)$$

که در آن  $\theta$  زاویه بین خط حرکت و جهت انتشار موج و  $V_s$  نشان دهنده سرعت شناور است. بنا براین امواج عرضی با سرعتی برابر سرعت شناور حرکت می‌کنند. همچنین در آبهای عمیق و برای امواج واگرا شونده  $\theta$  مقداری برابر ۱۶ درجه و ۳۵ دقیقه می‌باشد. [۲۹]

<sup>1</sup> Diverging waves

<sup>2</sup> Transverse waves

با دور شدن از جسم، بر اثر پدیده تفرق طول موج بیشتر می‌شود و در نتیجه ارتفاع آن نیز کاهش می‌یابد. محققین نشان داده‌اند که که با دور شدن از نقطه رأس (یا عقب) جسم شناور، ارتفاع حداکثر موج کاهش می‌یابد و نرخ این کاهش با ریشه سوم فاصله از رأس (یا عقب) شناور تناسب معکوس دارد. ارتفاع امواج عرضی ایجاد شده در امتداد خط حرکت نیز با نرخ متناسب با عکس ریشه دوم فاصله از رأس (یا عقب) شناور کاهش می‌یابد. بنابراین امواج واگرا شونده با دور شدن از جسم بیشتر نمایان می‌گردد.

در بسیاری از حالات می‌توان سیستم امواج نهایی را حاصل چهار مؤلفه دانست که عبارتند

از: [۳۲]

۱. سیستم امواج سینه، که ناشی از منطقه پرفشار در اطراف سینه کشتی است.
۲. سیستم امواج شانه جلویی، که ناشی از منطقه کم فشار آن قسمت است.
۳. سیستم امواج شانه عقبی، که ناشی از منطقه کم فشار آن قسمت است.
۴. سیستم امواج پاشنه، که ناشی از منطقه پرفشار در عقب کشتی است.

بحث فوق برای آبهای عمیق کاربرد دارد، یعنی جایی که حرکات کوچک ایجاد شده در ذرات آب ناشی از حرکت شناور به بستر نمی‌رسد. این شرایط برای مواقعی که عدد فرود کوچکتر از مقدار تقریبی  $0.7$  است، تأمین می‌شود. این عدد از رابطه زیر به دست می‌آید: [۲۹]

$$F_d = \frac{V_s}{\sqrt{gd}} \quad (2-1)$$

که در آن  $V_s$  همان سرعت شناور و  $d$  عمق آب را نشان می‌دهد. با افزایش عدد فرود از  $0.7$  به  $1.0$ ، حرکت موج از مقدار عمق آب تأثیر می‌گیرد و در نتیجه الگوی امواج ایجاد شده تغییر می‌کند. زاویه

خطی که پیش از این به عنوان مکان هندسی نقاط تاج موج معرفی شد با راستای حرکت شناور، از مقدار ۱۹ درجه و ۲۸ دقیقه به میزان ۹۰ درجه برای عدد فرود یک، افزایش می‌یابد. ارتفاع موج واگرا بسیار کندتر از ارتفاع موج عرضی افزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که عدد فرود به یک نزدیک می‌شود، موج عرضی مهم‌تر می‌شود. در عدد فرود یک، امواج عرضی و واگرا به هم می‌پیوندند و راستایی عمود بر راستای حرکت پیدا می‌کنند. بخش عمده‌ای از انرژی این امواج در یک موج بلند تنها در ناحیه انحنای رأس متمرکز شده است. به سبب محدودیت‌های موجود در نیروی محرک شناور، بیشتر شناورها تنها در حداکثر مقدار عدد فرود حدود ۰/۹ می‌توانند کار کنند. همچنین هنگامی که سرعت شناور افزایش می‌یابد، اگر شناور به اندازه کافی سبک باشد (یعنی دارای آب‌خور کم<sup>۱</sup> باشد)، نیروی برکنش هیدرودینامیکی<sup>۲</sup> باعث جهش شناور می‌شود. در نتیجه مواقعی که سرعت شناور بیشتر از سرعت آغاز جهش است، افزایش قابل توجهی در ارتفاع امواج تولید شده بوجود نخواهد آمد.

به منظور طراحی بندرگاه، پارامترهایی همچون جهت، دوره تناوب و ارتفاع امواج تولید شده به وسیله حرکت شناور وقتی با سرعت نامی (طرح) خود حرکت می‌کند، مورد نیاز است. برای عدد فرود تا مقدار واحد، محققین نشان داده‌اند که جهت انتشار امواج (بر حسب درجه) از رابطه زیر

به دست می‌آید: [۲۹]

$$\theta = 35.27(1 - e^{12(F_d - 1)}) \quad (3-1)$$

<sup>1</sup> Shallow draft

<sup>2</sup> Hydrodynamic Lift