بررسی اجزاء دنباله شناورها از دیدگاه اپتیکی

محمودرضا عباسی کاریزبالا

گروه علوم پایه، دانشکده مشترک، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام‌حسین (علیه‌السلام)؛
phys.ocean.abbasi@gmail.com

چکیده:

دنباله تولیدشده توسط شناورهای در حال حرکت را که می‌توان با چشم انسان مشاهده کرد؛ ممکن است تا ده‌ها کیلومتر در اقیانوس باز ادامه یابد و از راه دور قابل تشخیص باشد. این دنباله دارای اجزا و قسمت‌های مختلفی است که کاملاً تابع شرایط حرکتی و هندسی شناورها است و مطالعات بسیار زیادی بر روی شناخت آنها انجام گرفته است. اهمیت اصلی این مطالعات را شاید بتوان برای آشکار سازی و شناسایی خودکار و از راه دور این شناورها براساس الگوهای دنباله‌های تولید شده توسط آنها توسط سنجنده‌های مختلفی مانند عکاسی مرئی، سنجش مادون قرمز و رادارهای مایکروویو نصب‌شده بر روی ماهواره‌ها، رادارها و پهپادها دانست. در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های این پدیده از دیدگاه پهپادی و یا به عبارت دیگر از دیدگاه اپتیکی پرداخته و نشان داده‌شده‌است که این دنبال اگرچه پیچیده و دارای ۵ مؤلفه کلی است اما از دیدگاه اپتیکی سه مؤلفه آن کاملاً مشهود است: دنباله کلوین، دنباله آشفته و امواج داخلی تولید شده توسط شناور.

واژه‌های کلیدی:

دنباله، کلوین، اپتیکی، آشفته، امواج داخلی.

Investigating the components of the wake of ships from an optical point of view

Mahmud reza Abbasi Karizbala

Imam Hossein University, Science College, Basic Science Department, phys.ocean.abbasi@gmail.com

Abstract

The wake produced by moving ships, which can be seen with the human eye, may extend for tens of kilometers in the open ocean and be detectable from a distance. This wake has different components and parts that are completely subject to the movement and geometric conditions of the ships and many studies have been done on their recognition. The main importance of these studies may be for the automatic and remote identification of these ships based on the patterns of wakes produced by them by various sensors such as visible photography, infrared measurement and microwave radars installed on satellites, radars and drones. In this article, the components of this phenomenon have been studied from the point of view of a drone, or in other words, from the optical point of view, and it has been shown that although this wake is complex and has 5 general components, three of its components are clearly visible from the optical point of view: Kelvin wake, turbulent wake, and internal waves generated by the ship.

Key words:

wake, Kelvin, optical, turbulent, internal waves.

۱- مقدمه

هنگامی که یک جسم نسبت به یک سیال (چه مایع یا گاز) حرکت می‌کند؛ سیال را مختل می‌کند و آن را مجبور می‌کند تا جایی برای عبور جسم ایجاد کند. این اختلال می‌تواند منجر به ایجاد یک دنباله[1] V شکل در پشت جسم شود که خود یک پدیده موجی جذاب است که حتی با چشم غیر مسلح نیز قابل دیدن است (شکل ۱). امواج سطح آزاد تولید شده، به عنوان "امواج کلوین" نامیده می‌شوند [۱].

شکل (۱): دنباله یک شناور

یک شناور را در نظر بگیرید که در آب آرام دریا در حال حرکت است. اغتشاشات[2] وارد شده از شناور به آب باعث ایجاد فشارهایی می‌شود که سطح آب را به صورت موج کمانی V شکل و یک خمیدگی ملایم دنباله دار شکل می‌دهد.

فشار کمان جلوتر از شناور است و آب را به طرفین پراکنده می‌کند. این فشار، مجموعه‌ای از امواج را تشکیل می‌دهد که به شکل V در دو طرف شناور پراکنده می‌شوند. میزان وضوح و شکل‌گیری V، به سرعت شناور در مقایسه با سرعت امواج آب بستگی دارد.

هرچه دنباله کلوین تولید شده توسط یک شناور بزرگتر باشد؛ نیروی پسای بزرگ‌تری روی شناور خواهد بود [۲]. در همین حال، امواج کلوین حاوی انرژی است که بر خط ساحلی و ساحل رودخانه تأثیر می‌گذارد.

محاسبه میزان کشش موج و دانستن اینکه چگونه توزیع انرژی یک موج کلوین با توجه به ویژگی‌های خاص (مانند سرعت شناور، اندازه شناور و شکل شناور) تغییر می‌کند؛ می‌تواند به طراحی بدنه شناور کمک کند. استنتاج ویژگی‌های شکل موج دنباله می‌تواند به شناسایی شناورهایی که توسط ابزارهای نظارتی شناسایی شده‌اند کمک کند [۳].

در ابتدا، کلوین مجذوب پیک V شکلی بود که توسط یک شناور در حال حرکت در آب ایجاد شد. یکی از قابل توجه‌ترین نتایج او مربوط به زاویه دنباله ثابت بود که در حدود ۱۹,۴۷° بود که از آن پس به عنوان زاویه کلوین شناخته می‌شود. البته در پژوهش‌های بعد نشان داده شد که برای شناورهایی که به اندازه کافی سریع حرکت می‌کنند برخلاف دیدگاه‌های معمول، زاویه دنباله که در پشت یک شناور در حال حرکت ثابت مشاهده می‌شود؛ طبق نتایج شبیه‌سازی، کمتر از زاویه کلوین شناخته شده است. در واقع، هم سرعت شناور و هم اندازه شناور تأثیراتی بر شکل موج دنباله دارند. با این حال، اکثر دانشگاهیان ابتدا به بررسی اعداد فرود مختلف متأثر از سرعت شناور بر زاویه دنباله استفاده می‌کردند و در پژوهش‌های بعدی توجه کمی به تأثیر اندازه شناور صورت گرفت [۴].

۲- مؤلفه‌های دنباله یک شناور

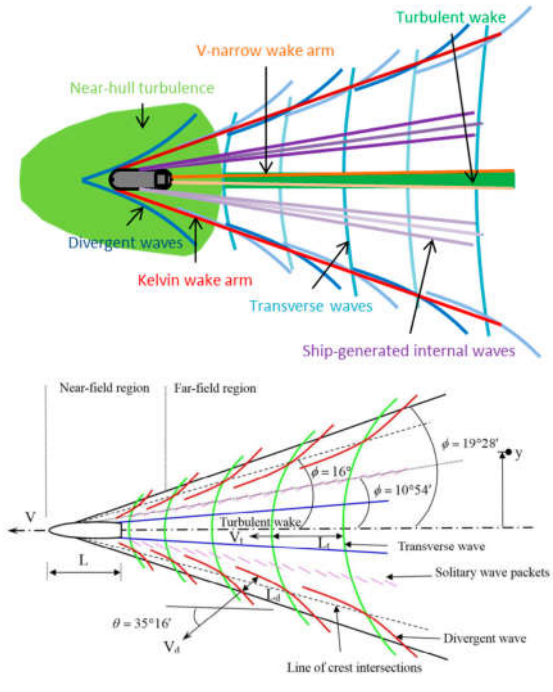
شکل ۱ عکسی از یک دنباله شناور را نشان می‌دهد. این دنباله از آب سفید، دنباله خط مرکزی، دنباله پروانه و دنباله کلوین تشکیل شده‌است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود؛ آب سفید که عموما از شکستن موج در کمان ناشی می‌شود؛ اغلب در قسمت عقب تقویت می‌شود و در عقب شناور برای دو یا سه طول شناور امتداد می‌یابد. خط مرکزی مسافت زیادی از شناور و در پشت شناور امتداد دارد. خروجی پروانه یا واک پروانه درون خط مرکزی تعبیه شده است. بر روی این الگوی کلاسیک موج کلوین یا دنباله کلوین قرار گرفته است.

خطوط دنباله که از کمان سرچشمه می‌گیرند به وضوح در هر دو طرف دنباله قابل مشاهده هستند. در امتداد خط مرکزی، یک ناحیه صاف و تقریبا شیشه‌ای را می‌توان دید که به سمت عقب امتداد می‌یابد، در ناحیه‌ای که معمولا موج آشفته در آن قرار دارد.

[1] Wake
[2] Disturbances

بین خطوط دنباله کلوین و ناحیه خط مرکزی صاف، امواج مختلف واگرا به صورت پره‌های شعاعی که از شناور بیرون می زند دیده می‌شود. آب سفید را می‌توان دید که از کمان شناور سرچشمه می‌گیرد. نواحی سفید آب در کمان و پشت در نتیجه شکستن امواج شیب‌دار ایجاد شده در نزدیکی بدنه است. مشاهدات بازگشت خط مرکزی تاریک در بسیاری از تصاویر پیکی نشان می‌دهد که این منطقه به‌طورکلی به‌طور قابل توجهی گسترده‌تر از سیگنال خود شناور است. پهنای خط مرکزی تیره به خوبی با پهنای ناحیه‌ای که روی آن امواج شکسته کمان و جناغ وجود دارد؛ مطابقت دارد.

شماتیک کامل یک دنباله در شکل ۲ نشان داده شده است.



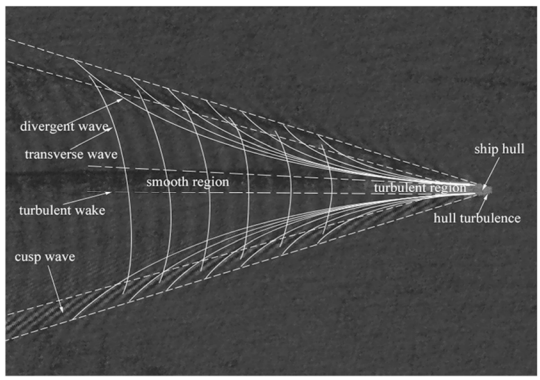
شکل (۲): نمایی از مؤلفه‌های اصلی دنباله یک شناور

مؤلفه‌های دنباله مطابق شکل ۲، به صورت زیر نشان داده شده و رنگ می‌شوند: دو بازوی دنباله کلوین (قرمز)، دنباله باریک V شکل (نارنجی روشن) دربرگیرنده دنباله آشفته و موج داخلی تولیدشده توسط شناور (بنفش). امواج عرضی دنباله کلوین به رنگ فیروزه‌ای و امواج واگرا به رنگ آبی ترسیم شده‌اند. گرچه مؤلفه‌های اصلی یک دنباله از ۵ جزء دنباله کلوین، دنباله آشفته، دنباله باریک V شکل، امواج منفرد و امواج داخلی تولیدشده توسط شناورتشکیل شده‌است [۵] اما از دیدگاه اپتیکی و آنچه در تصاویر پهپادی دیده می‌شود تنها ۳ مؤلفه اصلی دنباله کلوین، دنباله آشفته و امواج داخلی تولید شده توسط شناور مشهودتر هستند [۶] که در ادامه به توضیح این دنباله‌ها می‌پردازیم.

۲-۱-دنباله آشفته

متداول‌ترین مؤلفه دنباله، دنباله آشفته است. سطح اقیانوس پشت شناور تحت تأثیر حرکت شناور است. در داده‌های سنجش از راه دور، علامت دنباله آشفته القایی می‌تواند به طول ده‌ها کیلومتر در پشت مسیر شناور برسد.

یک دنباله آشفته شامل یک منطقه آشفته با تعداد زیادی حباب در جلو و یک منطقه صاف با امواج سطحی کمتر در پشت است. حباب‌ها در ناحیه آشفته عمدتا توسط حفره‌شدن پروانه ایجاد می‌شوند. عرض یک دنباله آشفته همان مرتبه بزرگی عرض کشتی است و به تدریج با افزایش فاصله از سمت عقب افزایش می‌یابد [۷]. با این حال، ویژگی‌های نوری لبه یک دنباله آشفته همیشه به اندازه کافی واضح نیست که در تصاویر شناسایی شود. طول یک دنباله آشفته که می‌تواند به ده‌ها برابر طول یک کشتی برسد؛ مهم‌ترین ویژگی آن است. کشتی‌ها به طور مداوم در حین حرکت دنباله تولید می‌کنند. طول مسیرها متناسب با مدت زمان حرکت و سرعت کشتی است. حباب‌های فراوان در ناحیه آشفته عمدتا به دلیل کاویتاسیون ناشی از چرخش پرسرعت پروانه‌ها است. حباب‌ها در اثر شناوری و تلاطم به سطح آب می‌آیند و ناحیه آشفته را تشکیل می‌دهند. منبع دیگر حباب‌ها، هوایی است که در نتیجه اصطکاک بین بدنه و آب وارد آب می‌شود. بنابراین مقدار حباب‌ها در ناحیه آشفته به قدرت، سرعت دورانی و قطر پروانه بستگی دارد.



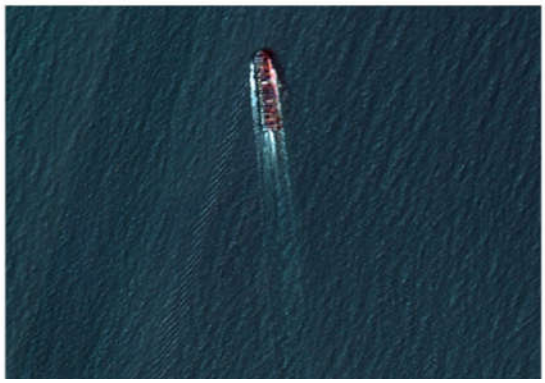
شکل (۳): جانمایی مؤلفه‌های دنباله آشفته و کلوین شناور

رید و همکاران [۸] از اصطلاح "میدان نزدیک" برای توصیف منطقه‌ای در اطراف شناورهای متحرک استفاده می‌کنند که در مقایسه با پراکندگی پشتی بدون تأثیر سطح اقیانوس اطراف، پراکندگی راداری بالاتری را تولید می‌کنند. میدان نزدیک نه تنها شامل تلاطم‌های ناشی از پروانه پشت شناور است؛ بلکه تلاطم‌های ایجاد شده در اثر بدنه شناور در جلو و کنار شناور را شامل می‌شود.

پراکندگی نور مرئی و نزدیک به فروسرخ توسط حباب‌های موجود در آب دریا را می‌توان با استفاده از نظریه Mie محاسبه کرد. یک دنباله آشفته، بسیار روشن‌تر از آب‌های اطراف است؛ زیرا حباب‌ها به طور قابل توجهی بازتاب آب را افزایش می‌دهند [۹].

طول ناحیه آشفته با طول مدت زمان وجود حباب‌ها و سرعت کشتی متناسب است. سرعت و به دنبال آن قدرت موتور عامل تعیین کننده طول ناحیه آشفته است. کشتی‌های کوچک با ملخ‌های کوچک پرسرعت و کشش‌های کم عمق، تعداد زیادی حباب در نزدیکی سطح آب تولید می‌کنند که به زودی ناپدید می‌شوند. دنباله آشفته شناورهای ماهیگیری همراه با سرعت کم آنها بسیار کوتاه است. برعکس، قایق‌های موتوری که به راحتی می‌توانند به سرعت بیش از ۳۰ نات برسند؛ طولانی‌ترین مناطق آشفته را در بین انواع کشتی‌ها دارند که می‌تواند به ۱ کیلومتر برسد.

کشتی‌های باری مجهز به ملخ‌های بزرگ با سرعت کم، حباب‌های زیادی به عمق ۲۰ متر تولید می‌کنند و طول دنباله آشفته آنها به بیش از ده‌ها تا صدها متر می‌رسد که به همان اندازه طول بدنه است.



شکل (۴): تصویر دنباله آشفته یک کشتی بزرگ

کشتی‌های جنگی که از نظر اندازه شبیه کشتی‌های باری هستند به ملخ‌های قوی‌تری مجهز شده و حباب‌های بیشتری تولید می‌کنند. کشتی‌های جنگی در میان کشتی‌های بزرگ سریع‌ترین هستند و ویژگی‌های متمایزی دارند. تلاطم کمی در دو طرف بدنه باریک وجود دارد. طول دنباله آشفته تا دو برابر طول بدنه گسترش می‌یابد.

شکل (۵): تصویر دنباله آشفته و کلوین کشتی جنگی

میدان جریان و مکانیسم‌های تشکیل ناحیه صاف کاملا مشخص نیست. تحقیقات موجود نشان می‌دهد که دو گرداب متقارن با مسیر کشتی وجود دارد. آب از مرکز بالا می‌رود و در لبه‌ها فرو می‌رود و یک جریان افقی بر روی سطح ایجاد می‌کند که امواج گرانشی کوتاه و امواج مویرگی را سرکوب می‌کند و با آب محیط تعامل می‌کند. ناحیه صاف به صورت مسیرهای تاریک به آرامی گسترش می‌یابد [۱۰]. ناحیه صاف در تصاویر نوری تیره‌تر از آب محیط است؛ زیرا درخشندگی ندارد. اگر سرعت باد کم باشد آب محیط نیز آرام است. هنگامی که سرعت باد

بسیار زیاد است؛ منطقه صاف به سرعت توسط امواج اطراف شکسته می‌شود.

بنابراین، طول مناطق صاف ایجادشده توسط انواع مختلف کشتی در تصاویر عمدتا به مدت زمان جریان افقی بستگی دارد. طول ناحیه صاف با لبه‌های روشن در یک یا هر دو طرف در جلو که ناشی از جریان افقی است توسط سرعت کشتی تعیین می‌شود.

جریان‌های افقی ایجادشده توسط کشتی‌های ماهیگیری و قایق‌های موتوری با ملخ‌های کوچک و کشش‌های کم عمق به قدری ضعیف هستند که به راحتی تحت تأثیر امواج اطراف قرار می‌گیرند و به سرعت ناپدید می‌شوند.

بنابراین، مناطق صاف شناورهای ماهیگیری کوتاه و نامشخص است. قایق‌های موتوری که به طور مداوم جریان افقی تولید می‌کنند؛ هنگام عبور از سطوح آب با درخشش گسترده، مناطق صاف طولانی‌تری با لبه‌های روشن در دو طرف خواهند داشت. جریان افقی کشتی‌های باری به دلیل سرعت‌های نسبتا کم و عمق پروانه‌های عمیق مشهود نیستند. منطقه آرام می‌تواند گاهی تا ده‌ها هزار متر گسترش یابد.

کشتی‌های جنگی دارای جریان‌های افقی قوی هستند که با آب محیط در تعامل بوده و کف فراوان ایجاد می‌کند. به دلیل سرعت‌های بسیار سریع، مسیرهای تاریک با خطوط روشن که در یک یا هر دو طرف ظاهر می‌شوند بسیار طولانی هستند.

چگالی حباب عمدتا با تشخیص آکوستیک تخمین زده می‌شود. پراکندگی گروه حباب در باندهای مرئی و مادون قرمز را می‌توان با استفاده از نظریه پراکندگی Mie محاسبه کرد [۹]. منطقه آشفته به عنوان یک دنباله روشن در تصاویر نوری ظاهر می‌شود؛ زیرا حباب‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی بازتاب هر نوار را افزایش دهند.

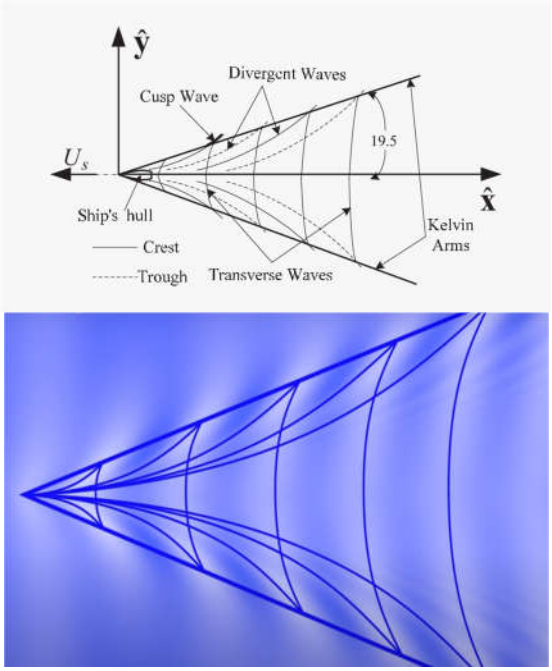
تحقیقات بر روی مناطق آشفته عمدتا برای هدایت اژدر مورد استفاده قرار گرفته است و در کاربرد سنجش از دور نسبتا کم است.

براساس تحقیقات میدانی انجام شده دنباله‌های آشفته همه شناورها را می‌توان در تصاویر با وضوح ۲ متر مشاهده کرد. احتمال وقوع دنباله‌های آشفته ایجادشده توسط کشتی‌های ماهیگیری و کشتی‌های باری به سرعت کاهش می‌یابد. دنباله آشفته قایق‌های موتوری همیشه بدون توجه به وضوح دوربین فیلم برداری، ظاهر می‌شوند.

احتمال تشخیص فقط دنباله آشفته در تصاویر اپتیکی بسیار زیاد است که نشان می‌دهد مناطق آشفته قایق‌های موتوری بسیار قابل توجه هستند در حالی که مناطق صاف کمتر متمایز هستند.

۲-۲- دنباله کلوین

امواج کلوین از امواج عرضی و امواج واگرا تشکیل شده‌اند که بسیار بزرگتر از کشتی هستند. برجسته‌ترین امواج، امواج کاسپ هستند که از برهم نهی امواج عرضی و امواج واگرا در لبه ایجاد می‌شوند (شکل ۳ و ۶).



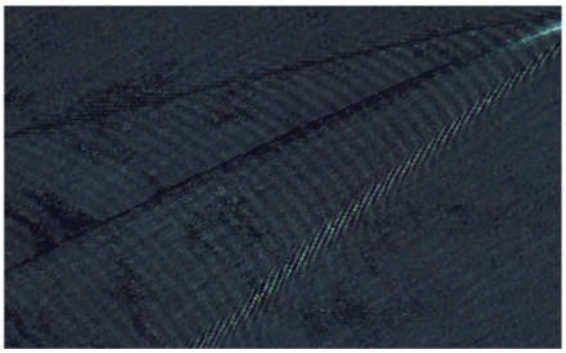
شکل (۶): نمایی از تشکیل دنباله کلوین

امواج کاسپ با شیب موج بزرگ به صورت خطوط روشن یا تیره به نام بازوهای کلوین در تصاویر با وضوح پایین ظاهر می‌شوند. بر اساس نظریه اولیه کلوین، زاویه بین دو بازوی کلوین تقریبا ۳۸,۹۴۸ است و مستقل از شکل و سرعت کشتی است. امواج کلوین نوسانات سطح دریا را تغییر می‌دهد و بنابراین، پیک‌های کلوین به دلیل بازتاب‌های مختلف از آب محیط متمایز خواهند شد. بنابراین، امواج عرضی و واگرا باید به اندازه کافی شارپ باشند تا در تصاویر شناسایی شوند.

در واقع، امواج کلوین به شکل، سرعت و امواج پس زمینه محیطی بستگی دارد که برخلاف نظریه اولیه کلوین است. بنابراین، یک راه حل تحلیلی به دست نیامده است. تئوری خطی امواج آب را می‌توان برای توصیف الگوهای کلوین استفاده کرد اگر تنها واضح‌ترین امواج میدان دور در نظر گرفته شود.

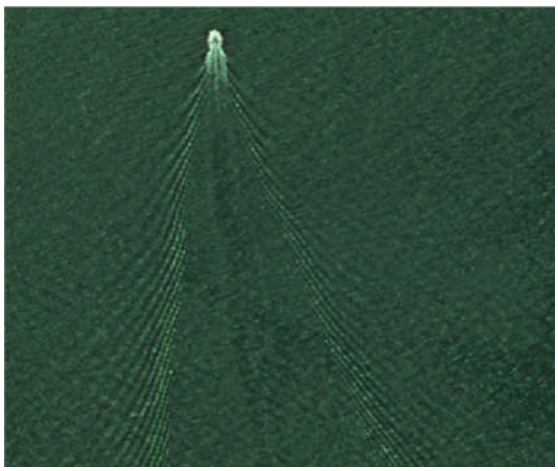
بخش اصلی دنباله کلوین، موج گرانشی است که آزادانه منتشر می‌شود. امواج کاسپ در دو طرف بارزترین ویژگی‌ها هستند و عمدتا از بدنه شناور شروع می‌شوند و این امواج به صورت خطوط V شکل روشن یا خطوط تیره در تصاویر با وضوح پایین نشان داده می‌شوند. برخی از قایق‌های موتوری بزرگتر نیز می‌توانند امواج کلوین تولید کنند که فقط حاوی امواج واگرا با خطوط تاج باریک و طول موج‌های کوتاه هستند که تنها در تصاویر با وضوح بالا قابل تشخیص هستند.

برخلاف دنباله‌های معمولی کلوین، امواج واگرا با قله‌های بسیار روشن در لبه داخلی خطوط روشن V شکل باریکی را هنگامی که وضوح تصویر پایین است تشکیل می‌دهند (شکل ۶). سرعت کشتی‌های باری بزرگ معمولا ۱۰ تا ۱۵ نات است. سرعت کشتی‌های کانتینری گاهی از ۲۰ نات تجاوز می‌کند تا رقابت پذیری را افزایش دهد. یک پیک مشخصه کامل می‌تواند تحت شرایط مناسب دریا تشکیل شود. امواج کاسپ که بازوهای کلوین روشن یا تیره را در یک تصویر با وضوح پایین تشکیل می‌دهند، در فواصل انتشار زیاد قابل توجه هستند. تشخیص امواج واگرا دشوار است، به جز امواج نزدیک به امواج کاسپ. به طور مشابه، امواج عرضی در نزدیکی امواج کاسپ آشکارتر هستند و می‌توانند در نواحی آشفته دنباله پنهان شوند شکل (۷).



شکل (۷): تصویری از امواج کاسپ در دنباله یک شناور

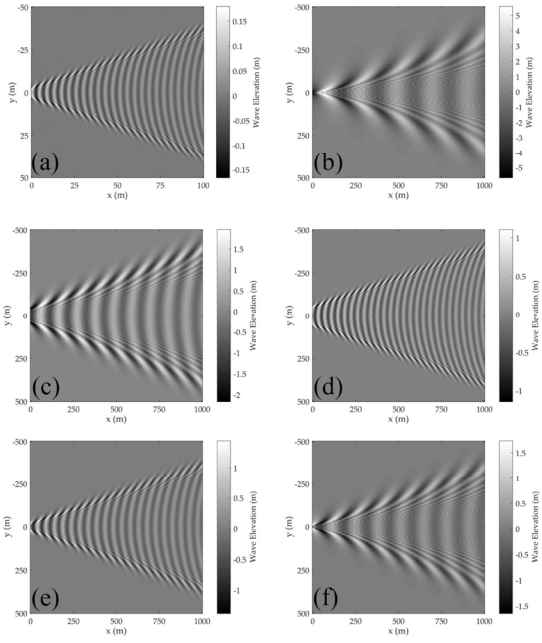
احتمال وقوع دنباله کلوین برای اکثر کشتی‌ها کم است اما برای قایق‌های موتوری زیاد است شکل (۸).



شکل (۸): امواج کلوین و کاسپ یک شناور موتوری سریع

ویژگی‌های بارز دنباله کلوین، بازوهای کلوین و امواج عرضی است. با کاهش وضوح تصویر، احتمال وقوع هر دو بازو کاهش می‌یابد. بازوهای کلوین که توسط قایق‌های موتوری که معمولا در مناطق آرام ساحلی حرکت می‌کنند تشکیل می‌شوند؛ قابل توجه‌تر هستند. بنابراین احتمال وقوع هر دو بازو همچنان زیاد است. امواج عرضی توسط کشتی‌های باری تولید می‌شوند و با کاهش قدرت تفکیک به ۸ متر تقریبا نامرئی می‌شوند که نشان می‌دهد بیشتر امواج عرضی دارای طول موج کوتاه هستند و تشخیص در تصاویر با وضوح پایین دشوار است [۱۰].

زاویه بین دو بازوی یک دنباله کلوین که به آن زاویه کلوین نیز می گویند یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه دنباله‌ها است. زاویه کلوین ارتباط نزدیکی با عدد فرود بدنه دارد، $Fr = U/gL$، که در آن U سرعت کشتی، g شتاب گرانشی و L طول کشتی است. زوایای کلوین زمانی که Fr کوچک است به پیش‌بینی کلوین ۳۸,۷۴۸ نزدیک می‌شود و با افزایش Fr از یک آستانه خاص کاهش می‌یابد. بازوهای کلوین ممکن است به دلیل تأثیر امواج اطراف دیگر متقارن با مسیر کشتی نباشند [۷].



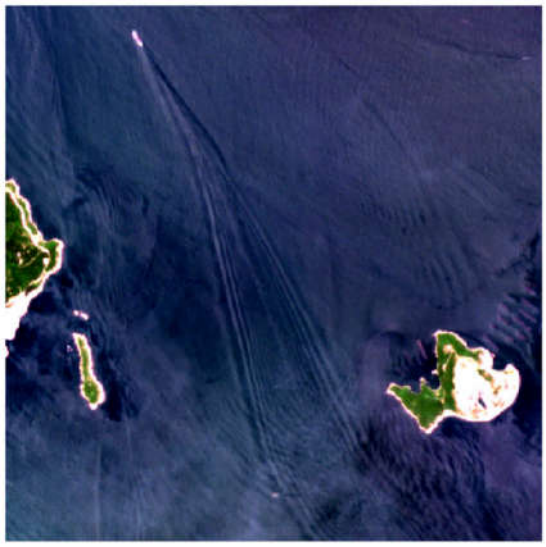
شکل (۹): مدل‌سازی عددی امواج کلوین براساس اعداد فرود متفاوت a: قایق ماهیگری، b: قایق موتوری، c: کشتی کانتینربر، d: نفتکش، e: باربر بزرگ، f: کشتی-جنگی

بازوهای کلوین قایق‌های موتوری باریک و V شکل با زوایای بسیار کوچک هستند. زوایای کلوین کشتی‌های باری دامنه وسیعی دارند اما در اطراف زاویه کلوین کلاسیک قرار دارند. زوایای کلوین که توسط کشتی‌های جنگی شکل می‌گیرد، با دامنه تغییرات کمتری پایدارتر هستند (شکل (۹)).

۲-۳- امواج داخلی تولید شده توسط شناور

امواج داخلی تولید شده توسط شناور به صورت الگوهای V شکل مکرر و متناوب بین مناطق روشن و تاریک ظاهر می‌شوند. البته این جزء دنباله به ندرت ظاهر می‌شود؛ زیرا ظاهر آن به شرایط آب به شدت طبقه‌بندی‌شده نزدیک سطح نیاز دارد [۱۰].

امواج داخلی ممکن است در جایی که پیکنوکلاین[۱] کم عمق و قوی وجود دارد ظاهر شود. امواج داخلی تولید شده توسط یک کشتی در حال حرکت بیشتر در آب‌های ساحلی رخ می‌دهد که در آن طبقه بندی آب به دلیل اختلاط آب شیرین و آب دریا قوی است. هنگامی که کف کشتی از سطح مشترک بین آب شیرین و آب دریا پایین‌تر باشد؛ کشتی یک آشفتگی ایجاد می‌کند. سپس یک موج داخلی دور از عقب کشتی ظاهر می‌شود. دامنه موج داخلی با شدت پیکنوکلین و کشش همبستگی مثبت دارد؛ در حالی که همبستگی ضعیفی با سرعت کشتی دارد (واتسون و همکاران ۱۹۹۲). کشتی‌های باری با کشش‌های عمیق و نیروی ملخ قوی، هنگامی که کف کشتی با پیکنوکلین تماس می‌گیرد یا پایین‌تر از آن قرار می‌گیرد؛ اختلال ایجاد می‌کند و در نتیجه امواج داخلی ایجاد می‌شود. امواج داخلی به آرامی به صورت گروه موجی با خطوط تاج پیوسته به بیرون منتشر می‌شوند. دیدن امواج داخلی که فقط توسط کشتی‌های باری ایجاد می‌شود به دلیل شرایط سخت شکل‌گیری بسیار کم است (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): امواج داخلی تولید شده توسط یک کشتی کارگو

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مؤلفه‌های عمومی دنباله شناورها از منظر اپتیکی پرداخته و نشان دادیم که هر دنباله در حالت کلی از ۳ مؤلفه تشکیل شده‌است: دنباله آشفته، دنباله کلوین و امواج داخلی. دنباله آشفته متداول‌ترین مؤلفه دنباله است که می‌تواند به طول ده‌ها کیلومتر در پشت مسیر شناور برسد که از دو بخش آب سفید و یک منطقه آرام سطح اقیانوس متصل به این منطقه، که در نتیجه تضعیف امواج کوتاه سطح اقیانوس محیط توسط حباب‌های صعودی است؛ تشکیل می‌شود. دنباله کلوین که از اندرکنش بین دو مؤلفه دنباله سرچشمه می‌گیرد:

[۱] پیکنوکلاین: محیط آبی با تغییرات شدید چگالی نسبت به عمق

امواج عرضی و امواج واگرا. نیم زاویه بین مسیر شناور و بازوهای دنباله کلوین برابر با ۱۹,۴۷ درجه است؛ اما با ویژگی‌های شناور خاص، زاویه می‌تواند کوچکتر نیز باشد. امواج داخلی تولیدشده توسط شناور که این جزء دنباله به ندرت ظاهر می‌شود؛ زیرا ظاهر آن به شرایط آب به شدت طبقه‌بندی شده نزدیک سطح نیاز دارد. شکل و ابعاد این دنباله‌ها به ابعاد، سرعت و شرایط محیطی دریا بستگی دارد که تا حدودی متناسب با عدد فرود هر شناور است.

۴- مراجع

[1] Ermakov, S., I. Kapustin, and T. Lazareva, 2014: Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: Observations and physical mechanisms. Proc. SPIE, 9240, 92400N.

[2] Gilman, M., A. Soloviev, and H. Graber, 2011: Study of the far wake of a large ship. J. Atmos. Oceanic Technol.28,720–733.

[3] Watson, G., R. D. Chapman, and J. R. Apel, 1992: Measurements of the internal wave wake of a ship in a highly stratified sea loch. J. Geophys. Res., 97, 9689–9703.

[4] CHUNG, Y. K. & LIM, J. S. 1991 A review of the Kelvin ship wave pattern. J. Ship Res. 35, 191–197.

[5] SOOMERE, T. 2007 Nonlinear components of ship wake waves. Appl. Mech. Rev. 60, 120–138.

[6] DIAS, F. 2014 Ship waves and Kelvin. J. Fluid Mech. 746, 1–4.

[7] DARMON, A., BENZAQUEN, M. & RAPHAËL, E. 2014.Kelvin wake pattern at large Froude numbers. J. Fluid Mech. 738, R3.

[8] Reed, A. M., and J. H. Milgram, 2002: Ship wakes and their radar images. Annu. Rev. Fluid Mech., 34, 469–502.

[9] Stramski, D., 1994: Gas microbubbles: An assessment of their significance to light scattering in quiescent seas. Proc. SPIE, 2258, 704–710.

[10] Liu, Y., Deng, R., 2018. Ship wakes in optical images. J. Atmos. Ocean. Technol. 35, 1633–1648.