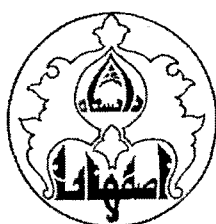


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه اصفهان  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک دریا

تغییرات جریان‌های ناشی از باد و فراچاهی در دریای عمان

استادان راهنما:

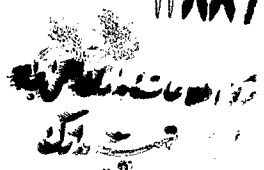
دکتر اسماعیل حسن‌زاده

دکتر فهیمه حسینی بالام

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

پژوهشگر:

فرزانه جورمهر



بهمن ماه ۱۳۸۷

۱۲۹۶۵۸

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک دریا  
فرزانه جورمهر  
تحت عنوان

تغییرات جریان‌های ناشی از باد و فراچاهی در دریای عمان

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۲۰ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه دکتر اسماعیل حسن‌زاده با مرتبه‌ی علمی دانشیار

امضاء

۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه دکتر فهیمه حسینی بالام با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضاء

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر عبدالله صداقت‌کردار با مرتبه‌ی علمی استادیار

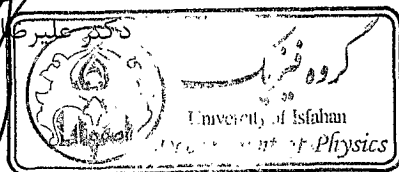
امضاء

۴- استاد داور داخل گروه دکتر جلال سرآبادانی با مرتبه‌ی علمی استادیار

امضاء

امضای مدیر گروه

دکتر علیرضا خورسندی



با سپاس فراوان از استادان گرانقدرم؛ جناب آقای دکتر حسنزاده و سرکار خانم دکتر  
حسینی که گنجینه دانش خود را صمیمانه در اختیارم نهادند.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

## چکیده

کشور ما از جنوب به دو حوزه آبی مهم یعنی خلیج فارس و دریای عمان می‌رسد. خلیج فارس از طریق تنگه هرمز به دریای عمان و دریای عمان هم به اقیانوس هند و از طریق دریای عربی به سایر آب‌های آزاد راه می‌یابد. این منطقه از بسیاری جنبه‌ها از اهمیت اساسی برخوردار است؛ وجود منابع عظیم نفتی در کف و در کشورهای نفت‌خیز حاشیه آنها سبب شده است تا این منطقه از موقعیتی استراتژیک برخوردار شود و تردد کشتی‌ها، نفت‌کش‌ها و حتی ناوهای جنگی در آن بالا بگیرد. این نکته سبب شده تا این منطقه کانون بسیاری از مطالعات باشد اما متأسفانه این مطالعات غالباً از سوی پژوهشگران خارجی صورت پذیرفته و محققان داخلی کم‌تر به آن پرداخته‌اند لذا بررسی ویژگی‌ها و پدیده‌های این ناحیه امری بسیار مهم است. در این راستا بر آن شدیم تا با مطالعه اثر پدیده‌های بارزی مانند "مونسون‌های فصلی" در مؤلفه‌های اکمن جریان در دریای عمان و بررسی انتقال‌های افقی و عمودی اکمن گامی هرچند کوچک در شناخت این حوزه آبی کشورمان برداشته باشیم.

انتقال‌های افقی و عمودی موجود در این پایان‌نامه از داده‌های تنش باد درون‌یابی شده بر روی شبکه‌ای با گام یک درجه در یک درجه موجود در وبسایت "سازمان ملی هوا و اقیانوس امریکا"<sup>1</sup> و با کمک برنامه‌نویسی با نرم‌افزار "MATLAB" به دست آمده است. علاوه بر محاسبه این انتقال‌ها، ویژه‌توابع ماتریس انتقال‌های افقی را هم به منظور رسیدن به مدهای غالب انتقال‌ها و هم سری‌های زمانی این مدهای غالب در آنالیز "EOF"<sup>2</sup>، به دست آوردیم. با بررسی پربندهای حاصل درمی‌یابیم که بین این الگوها و پربندهای تنش باد به‌ویژه در فصل اوج مونسون‌ها یعنی در تابستان مطابقت خوبی برقرار است اما این تطابق در ماه‌های میانی فصول تابستان و زمستان به چشم نمی‌خورد. تناظر بین پربندهای سرعت انتقال عمودی و نقشه‌های دمای سطح آب به‌خوبی قابل ملاحظه است و به کمک آن می‌توان وارونگی دمای سطح آب را در تابستان و زمستان توضیح داد. علاوه بر این سری‌های زمانی حاصل نیز دوره سالانه تغییر انتقال‌ها را مشخص می‌سازند.

**واژگان کلیدی:** دریای عمان، مونسون، انتقال اکمن، آنالیز EOF

<sup>1</sup>. National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>2</sup>. Empirical Orthogonal Functions

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول مقدمه و پیشینه</b>
۱-۱-۱.....	انتقال اکمن چیست؟
۲-۱-۲.....	مروری بر کارهای انجام شده.
۳-۱-۳.....	اهداف
	<b>فصل دوم زمینه نظری</b>
۱-۲-۱.....	معادله‌های حرکت با در نظر گرفتن اصطکاک
۲-۲-۲.....	حل اکمن برای معادله‌های حرکت با وجود اصطکاک
۳-۲-۳.....	فراچاهی و انواع آن
۱-۳-۲.....	فراچاهی ساحلی
۲-۳-۲.....	فراچاهی استوایی
۳-۳-۲.....	فراچاهی اقیانوس آزاد
۴-۲-۴.....	انتقال‌های اکمن
۱-۴-۲.....	انتقال‌های افقی
۲-۴-۲.....	انتقال عمودی
۵-۲-۵.....	دمای سطح آب
۱-۵-۲.....	اهمیت پارامتر دما
۲-۵-۲.....	دمای سطح آب و اثرات آن در سایر مشخصه‌های فیزیکی
۶-۲-۶.....	تنش باد و ضریب درگ
۷-۲-۷.....	آنالیز EOF
	<b>فصل سوم دریای عمان و حوزه‌های مجاور</b>
۱-۳-۱.....	دریای عمان
۲-۳-۲.....	حوزه‌های آبی مجاور
۱-۲-۳.....	خلیج فارس
۲-۲-۳.....	اقیانوس هند و دریای عربی



## فصل چهارم داده‌ها و نتایج

۳۹.....	۱-۴- داده‌ها و روش کار.....
۴۰.....	۲-۴- بررسی تنش‌ها.....
۴۰.....	۱-۲-۴- بردارهای باد.....
۴۱.....	۲-۲-۴- مؤلفه زناری تنش باد.....
۴۲.....	۳-۲-۴- مؤلفه نصف‌النهاری تنش باد.....
۴۴.....	۳-۴- انتقال‌ها.....
۴۴.....	۱-۳-۴- انتقال در راستای زناری.....
۴۵.....	۲-۳-۴- انتقال در راستای نصف‌النهاری.....
۴۶.....	۴-۴- مقایسه تنش‌های زناری و انتقال‌های نصف‌النهاری.....
۴۸.....	۵-۴- مقایسه تنش‌های نصف‌النهاری و انتقال‌های زناری.....
۴۸.....	۶-۴- سرعت انتقال عمودی.....
۴۹.....	۷-۴- مقایسه الگوهای سرعت انتقال عمودی و دمای سطح آب.....
۵۰.....	۸-۴- آنالیز EOF.....
۵۱.....	۹-۴- بحث و نتیجه‌گیری.....
۵۱.....	۱۰-۴- مطالعات پیشنهادی.....

## فصل پنجم نمودارها

۵۳.....	۱-۵- نمودارها.....
۱۰۴.....	پیوست.....
۱۰۵.....	منابع و مأخذ.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- مارپیچ اکمن .....	۲
شکل ۲-۱- انتقال اکمن عمود بر جهت باد .....	۲
شکل ۱-۲- تغییر سرعت عمودی .....	۱۴
شکل ۲-۲- تنش اصطکاک .....	۱۶
شکل ۳-۲- ضریب درگ بر حسب سرعت باد در ارتفاع ده متری .....	۱۸
شکل ۱-۳- جبهه رأس الحد .....	۳۵
شکل ۲-۳- پلوم خلیج فارس .....	۳۷
شکل ۱-۵- نمودارهای بردار باد زمستان ۱۹۹۸ .....	۵۴
شکل ۲-۵- نمودارهای بردار باد بهار ۱۹۹۸ .....	۵۵
شکل ۳-۵- نمودارهای بردار باد تابستان ۱۹۹۸ .....	۵۶
شکل ۴-۵- نمودارهای بردار باد پاییز ۱۹۹۸ .....	۵۷
شکل ۵-۵- نمودارهای بردار باد زمستان ۲۰۰۲ .....	۵۸
شکل ۶-۵- نمودارهای بردار باد بهار ۲۰۰۲ .....	۵۹
شکل ۷-۵- نمودارهای بردار باد تابستان ۲۰۰۲ .....	۶۰
شکل ۸-۵- نمودارهای بردار باد پاییز ۲۰۰۲ .....	۶۱
شکل ۹-۵- نمودارهای بردار باد زمستان ۲۰۰۷ .....	۶۲
شکل ۱۰-۵- نمودارهای بردار باد بهار ۲۰۰۷ .....	۶۳
شکل ۱۱-۵- نمودارهای بردار باد تابستان ۲۰۰۷ .....	۶۴
شکل ۱۲-۵- نمودارهای بردار باد پاییز ۲۰۰۷ .....	۶۵
شکل ۱۳-۵- نمودارهای تنش زناری زمستان .....	۶۶
شکل ۱۴-۵- نمودارهای تنش زناری بهار .....	۶۷
شکل ۱۵-۵- نمودارهای تنش زناری تابستان .....	۶۸
شکل ۱۶-۵- نمودارهای تنش زناری پاییز .....	۶۹
شکل ۱۷-۵- نمودارهای تنش نصف‌النهاری زمستان .....	۷۰

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷۱	شکل ۵-۱۸- نمودارهای تنش نصف‌النهاری بهار.....
۷۲	شکل ۵-۱۹- نمودارهای تنش نصف‌النهاری تابستان.....
۷۳	شکل ۵-۲۰- نمودارهای تنش نصف‌النهاری پاییز.....
۷۴	شکل ۵-۲۱- نمودارهای انتقال زناری زمستان.....
۷۵	شکل ۵-۲۲- نمودارهای انتقال زناری بهار.....
۷۶	شکل ۵-۲۳- نمودارهای انتقال زناری تابستان.....
۷۷	شکل ۵-۲۴- نمودارهای انتقال زناری پاییز.....
۷۸	شکل ۵-۲۵- نمودارهای انتقال نصف‌النهاری زمستان.....
۷۹	شکل ۵-۲۶- نمودارهای انتقال نصف‌النهاری بهار.....
۸۰	شکل ۵-۲۷- نمودارهای انتقال نصف‌النهاری تابستان.....
۸۱	شکل ۵-۲۸- نمودارهای انتقال نصف‌النهاری پاییز.....
۸۲	شکل ۵-۲۹- نمودارهای سرعت انتقال عمودی اکمن زمستان.....
۸۳	شکل ۵-۳۰- نمودارهای سرعت انتقال عمودی اکمن بهار.....
۸۴	شکل ۵-۳۱- نمودارهای سرعت انتقال عمودی اکمن تابستان.....
۸۵	شکل ۵-۳۲- نمودارهای سرعت انتقال عمودی اکمن پاییز.....
۸۶	شکل ۵-۳۳- دمای سطح آب زمستان ۱۹۹۸.....
۸۷	شکل ۵-۳۴- دمای سطح آب بهار ۱۹۹۸.....
۸۸	شکل ۵-۳۵- دمای سطح آب تابستان ۱۹۹۸.....
۸۹	شکل ۵-۳۶- دمای سطح آب پاییز ۱۹۹۸.....
۹۰	شکل ۵-۳۷- دمای سطح آب زمستان ۲۰۰۴.....
۹۱	شکل ۵-۳۸- دمای سطح آب بهار ۲۰۰۴.....
۹۲	شکل ۵-۳۹- دمای سطح آب تابستان ۲۰۰۴.....
۹۳	شکل ۵-۴۰- دمای سطح آب پاییز ۲۰۰۴.....
۹۴	شکل ۵-۴۱- دمای سطح آب زمستان ۲۰۰۶.....
۹۵	شکل ۵-۴۲- دمای سطح آب بهار ۲۰۰۶.....

عنوان	صفحه
شکل ۵-۴۳- دمای سطح آب تابستان ۲۰۰۶.....	۹۶
شکل ۵-۴۴- دمای سطح آب پاییز ۲۰۰۶.....	۹۷
شکل ۵-۴۵- چهار مد اول مؤلفه زناری انتقال اکمن.....	۹۸
شکل ۵-۴۶- چهار مد اول مؤلفه نصف‌النهاری انتقال اکمن.....	۹۹
شکل ۵-۴۷- سری‌های زمانی چهار مد اول مؤلفه زناری انتقال اکمن.....	۱۰۰
شکل ۵-۴۸- سری‌های زمانی چهار مد اول مؤلفه نصف‌النهاری انتقال اکمن.....	۱۰۲

## فصل اول

### انتقال اکمن

#### (۱-۱) انتقال اکمن چیست؟

"انتقال اکمن" نامی است که به حرکت افقی لایه‌های بالایی اقیانوس داده می‌شود که بر اثر انتقال تکانه از بادهای وزان بر روی اقیانوس به توده‌های آب و در نتیجه تولید اصطکاک در سطح فصل مشترک آب و هوا، به وجود می‌آید. انتقال تکانه را "استرس" یا "تنش" باد ( $N/m^2$ ) گویند.

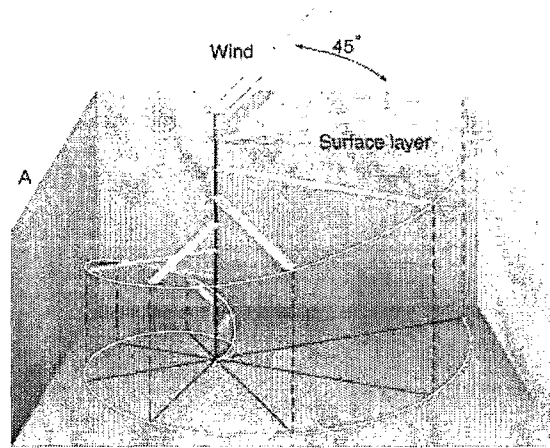
باد آب را با زاویه ۴۵ درجه به سمت راست جهت خودش (در اثر نیروی کوریولیس) می‌راند. هر چه عمق افزایش می‌یابد جهت شارش به سمت راست می‌چرخد (در نیمکره شمالی). وقتی از بالا به این فرایند نگریند، مشاهده می‌شود بردارهای سرعت، "مارپیچ اکمن"<sup>۱</sup> را شکل می‌دهند (شکل ۱-۱). اندازه سرعت با افزایش عمق کاهش می‌یابد و در نهایت در عمق خاصی به صفر می‌رسد که جهت آن در این عمق که به "عمق اکمن"<sup>۲</sup> موسوم است مخالف جهت تنش باد در سطح است. عمق اکمن نوعاً در حدود ۵۰ متر در ۴۵ درجه شمالی است. لایه بالای این عمق را "لایه اکمن"<sup>۳</sup> می‌نامند که معمولاً کم‌تر از عمق لایه آمیخته است زیرا لایه آمیخته به افزایش‌های کوتاه مدت سرعت باد که سبب عمیق‌تر شدن آن می‌شوند حساس است در صورتی که لایه اکمن این چنین نیست.

---

<sup>۱</sup> . Ekman Spiral

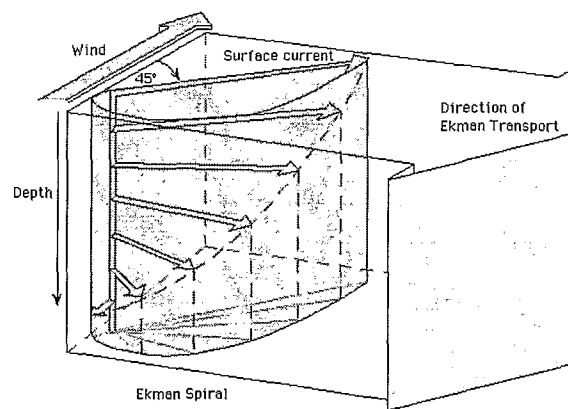
<sup>۲</sup> . Ekman Depth

<sup>۳</sup> . Ekman Layer



شکل ۱-۱، ماریچ اکمن [۳۹]

اگر از جریان از سطح تا عمق انتگرال بگیریم در خواهیم یافت که آب به طور میانگین حرکتی به سمت راست باد دارد (شکل ۱-۲). این انتگرال را "انتقال جرمی اکمن" گویند. بادی با سرعت  $10 \text{ m/s}$  می تواند انتقال جرمی معادل  $1617 \text{ kg/ms}$  متناظر با سرعت اکمن  $5/2 \text{ cm/s}$  در عمق  $30 \text{ m}$  اکمن، ایجاد کند.



شکل ۱-۲، انتقال اکمن عمود بر جهت باد [۴۰]

گردش‌های جوی معمولاً از یک سری چرخندها و واچرخندها تشکیل شده‌اند. با توجه به این نکته انتقال اکمن در لایه اکمن، یک همگرایی تحت بادهای واچرخند یا یک واگرایی تحت بادهای چرخند، ایجاد می‌کند. از آنجایی که آب دریا تقریباً تراکم‌ناپذیر است یک همگرایی سطحی منجر به "فراچاهی"<sup>۱</sup> و یک واگرایی سطحی منجر به "فراچاهی"<sup>۲</sup> می‌گردد. این حرکات عمودی را "پمپاژ اکمن"<sup>۳</sup> می‌نامند. سرعت‌های عمودی در این حرکات بسیار کم‌ترند از سرعت‌های افقی شارش اکمن (از مرتبه  $10^{-6}$  m/s). گرادیان عمودی فشار و شوری از گرادیان‌های این کمیت‌ها در جهت افقی بسیار بیش‌ترند بنابراین از این لحاظ فرایند اکمن اهمیت می‌یابد. هم‌چنین پمپاژ اکمن به سبب جریان رو به شرق یکنواخت رخ می‌دهد زیرا نه تنها به کرل تنش باد بلکه به پارامتر کوریولیس (f) نیز (که با عرض جغرافیایی تغییر می‌کند) بستگی دارد. در ضمن پمپاژ اکمن در نزدیکی سواحل که بادهای در امتداد ساحل می‌وزند، هم رخ می‌دهد.

### (۲-۱) مروری بر کارهای انجام‌شده

از آنجایی که این پدیده از جنبه‌های مختلفی دارای اهمیت است موضوع پژوهش‌های بسیار است و در هر کدام از این پژوهش‌ها رابطه این پدیده با یک یا چند پدیده دیگر از قبیل دمای سطح آب، منابع تغذیه آبریان و شیلات، جریان‌های سطحی و زیرسطحی دریا، اقلیم منطقه و... مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این بخش به‌طور خلاصه به تعدادی از این مطالعات اشاره می‌کنیم.

(۱) انتقال و پمپاژ اکمن در ناحیه دور از سواحل پرو در خلال پدیده ال نینو<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۸-۱۹۹۷ [۱]: در

این پژوهش اندازه بردارهای باد ماهواره‌ای را جهت توصیف انتقال و پمپاژ اکمن در سواحل اقیانوس در

۱۵ درجه جنوبی دور از پرو جایی که فراچاهی پدیده غالب است، به کار گرفتند و شرایط طبیعی و ال-

نینو را برای می ۱۹۹۲ تا آوریل ۱۹۹۷ و می ۱۹۹۷ تا می ۱۹۹۸ تعیین نمودند.

(۲) فراچاهی ساحلی در خلیج کالیفرنیا [۲]: در این مقاله ضریب فراچاهی ساحلی (CUI)<sup>۵</sup> ناشی از باد

محلی در بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۶ در شرق خلیج مرکزی کالیفرنیا به‌دست آمده و ارتباط این ضریب با

توزیع تراکم رنگدانه‌ها، دمای سطح آب و منابع آبریان و ماهی‌ها در یک مقیاس زمانی فصلی به‌خوبی

1. downwelling

2. upwelling

3. Ekman Pumping

4. El Nino

5. Coastal Upwelling Index

مشخص شده است. پاسخی زیست‌شناختی به فعالیت "انسو"<sup>۱</sup> وجود دارد که از طریق این ضریب مشخص نمی‌شود اما نشان‌دهنده این است که بهبود شرایط زیست‌شناختی هم‌چنین نیازمند ورودی ستون آب است. افزایش واضح در سیگنال دامنه فصلی از روی ضریب فراچاهی و دمای سطح آب از میانه دهه ۱۹۷۰ قابل ملاحظه است. درک طبیعت این روندهای طولانی‌مدت، نقش سیگنال‌های اقیانوسی حاره‌ای دوردست در غنی‌سازی، دینامیک جو و اقیانوس و پاسخ‌های زیست‌شناختی، چالش‌های اساسی هستند که در این پروژه مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا بتوان با این بررسی‌ها به بهینه‌سازی مدیریت منابع ماهی و آبزیان در خلیج کالیفرنیا کمک کرد.

(۳) گردش نزدیک ساحل در یک جایگاه فراچاهی دور از سیستم جریانی هامبولدت شمالی (HCS)<sup>۲</sup> [۳]: در این پژوهش نشان داده شده که یک شارش روبه‌قطب و دینامیک اکمن در محیط HCS فرایندهای غالب‌اند. در واقع این بررسی گزارشی است بر روی اندازه‌گیری‌های مستقیم جریان جایی نزدیک ساحل در "شبه‌جزیره مجیلونز"<sup>۳</sup> درون سیستم جریانی هامبولدت در جنوب شرقی اقیانوس آرام. هیدروگرافی و جریان‌ها درون یک شبکه متشکل از ۲۳ ایستگاه روی سه نقشه (اکتبر ۱۹۹۸، ژانویه و اکتبر ۱۹۹۹) اندازه گرفته شدند. پدیده غالب در محیط پیرامون سیستم جریان هامبولدت، یک شارش روبه‌قطب و دینامیک کم‌عمق اکمن (از مرتبه ۲۰ متر) است. فیلمان‌های فراچاهی مشخص شده از روی تصاویر AVHRR<sup>۴</sup> تنها تا مسافت‌هایی از مرتبه ۱۰ کیلومتر دور از ساحل منتقل می‌شوند. این شرایط اقیانوسی ساحلی، یک محیط گردشی سریع را ایجاد می‌کنند.

(۴) فراچاهی در شمال غربی دریای سیاه در طول دوره گرم‌شدن تابستانه [۴]: در اینجا از یک مدل چندلایه-ای عددی برپایه معادلات اولیه ترمودینامیک دریا، به‌منظور بررسی گسترش و پیشرفت محدوده‌های فراچاهی نزدیک ساحل دریای سیاه شمال غربی، استفاده شده است. نتایج، حاصل از تجزیه و تحلیل هشت آزمایش عددی بر روی نقشه‌برداری نواحی فراچاهی و فروچاهی است که به جهت باد وابسته است.

<sup>۱</sup> . ENSO: El Nino-Southern Oscillation

<sup>۲</sup> . Humboldt Current System

<sup>۳</sup> . Mejillones Peninsula

<sup>۴</sup> . Advanced Very High Resolution Radiometer



داده‌های به‌دست‌آمده با مشاهدات حاصل از ماهواره NOAA-II که در آنها دمای تابشی سطحی دریا دو بار در روز به‌دست‌آمده‌است، مطابقت دارد. در ضمن نشان‌داده‌شده که نتایج محاسبات عددی با داده‌های حاصل از سنجش از دور در توافق است.

(۵) دمای سطح آب و تغییرات جریانی ناشی از باد در دریای عربی در خلال سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ [۵]:

انتقال‌های اکمن و اسوردراپ میانگین ماهانه و انتقال عمودی به‌درون و خارج از لایه اکمن با کمک داده‌های ماهواره‌ای از پادهای ۱۰m از آوریل ۱۹۹۲ تا دسامبر ۱۹۹۳ محاسبه شد.

در خلال مونسون تابستانه، انتقال رویه جنوب اکمن تقریباً نصف انتقال رویه جنوب اسوردراپ است و انتقال شارش رویه شمال جریان سوماتی حدود  $30 \times 10^6$  متر مکعب در واحد زمان است. نتایج متفاوتی با استفاده از مؤلفه‌های بادسطحی تولیدشده توسط یک مرکز آب‌وهوایی عددی "pnxliction" به‌دست‌آمد که حساسیت نتایج را به تولید داده‌ای باد نشان می‌دهد.

رابطه همبستگی بین کاهش دمای سطح دریا از می تا آگوست بر روی دریای عربی و انتقال رویه جنوب اکمن خارج از دریای عربی و انتقال عمودی آب به درون لایه اکمن در دریای عربی به‌دست‌آمد.

(۶) گردش وارونه کم‌عمق در اقیانوس هند [۶]: در این پروژه مسیرهای شارش‌های ترموکلاین مرتبط با

جریان‌های واژگون‌شده کم‌عمق بررسی شده و برآوردهای سابد اکشن<sup>۱</sup> و فراچاهی بیان‌شده‌است. هم‌چنین نتایج مدلی، یک نقش بسیار کم‌تر از فراچاهی سوماتی و سهم مهمی از فراچاهی اقیانوس آزاد در برجستگی‌های سیکلونی حول هند و سریلانکا را ارائه کرده‌اند و به این ترتیب سازوکاری که با آن انتقال اکمن از استوا می‌گذرد، مورد بررسی قرار گرفته‌است.

(۷) تغییرات زمانی و مکانی فراچاهی مونسونی در امتداد سواحل شرقی و غربی هند [۷]: مطالعه آنومالی

دمای میانگین ماهانه محلی (LTA)<sup>۲</sup> و انتقال اکمن در امتداد سواحل شرقی و غربی هند بر اساس داده‌های ۶۰ ساله نشان می‌دهد که هم آنومالی دمای میانگین ماهانه محلی و هم انتقال اکمن در خلال مونسون تابستانه بالاست.

اینجا آنومالی دمای محلی میانگین ماهانه به‌عنوان اختلاف بین دمای ساحلی و دمای سطحی میان اقیانوس تعریف شده‌است. آنومالی‌های دمای میانگین ماهانه محلی از طریق فرایندهای اقیانوسی مختلفی ایجاد می‌شوند. در نواحی دور از ساحل جنوب غربی هند، آنومالی‌های مثبت ناشی از فراچاهی، از

<sup>۱</sup> . subduction

<sup>۲</sup> . Local Teperature Anomaly

بادهای مونسون تابستانه به وجود آمده‌اند. آنومالی‌های منفی در امتداد بخش شمالی ساحل شرقی هند، به تخلیه آب رودخانه که آن نیز به نوبه خود به شدت مونسون تابستانه بستگی دارد، مربوط است. مطالعات پیشین بر روی انواعی از پلانکتون‌ها نشان می‌دهد که در اقیانوس هند شمالی "Globigerinida" و "Neogloboquadrina" شناسه‌های قابل اعتمادی برای پی‌بردن به فراچاهی و شوری سطح آب هستند.

ارتباط بین آنومالی‌های دمای میانگین ماهانه محلی و انتقال اکمن ( $M_E$ ) هم در دریای عربی و هم در خلیج بنگال مشخص می‌سازد که با بررسی تغییر در فراوانی پلانکتون‌های مزبور در هسته‌های رسوبی دریای عربی و خلیج بنگال می‌توان شدت فراچاهی و تخلیه رودخانه‌ای و بنابراین تغییرات شدت مونسون تابستانه و تولید آبیان را به عنوان یک منبع غذایی ردیابی کرد.

۸) انتقال جرمی و حرارتی اکمن در دریاهای اندونزی [۸]: میان‌شارش اندونزی (ITF)<sup>۱</sup> عبارت است از شارش آب‌های گرم و نسبتاً تازه به درون جنوب شرقی اقیانوس هند که این آب‌ها از غرب اقیانوس آرام و با گذر از جزایر بین اندونزی و استرالیا به این ناحیه وارد می‌شوند. به عنوان تنها کانال درون اقیانوسی عرض‌های پایین، میان‌شارش اندونزی نقش تمام و کمالی در گردش ترموکلاین جهانی دارد و به طور مستقیم بر روی ذخیره گرما و آب تازه هر دو اقیانوس هند و آرام، تأثیر می‌گذارد. در این پروژه، میان‌شارش اندونزی را به عنوان یک شارش زمینگرد کم‌بسامد ترکیب‌شده با یک جریان سطحی ناشی از باد در نظر می‌گیریم. گرادیان استریک بزرگ مقیاس بادهای تجاری شرق‌وزان در اقیانوس آرام غربی و بادهای معکوس‌شونده مونسونی بر روی دریاهای اندونزی جنوبی، دوره سالانه متغیر ITF را سبب می‌شوند. در خلال مونسون شمال غربی از نوامبر تا مارس، جهت بادهای غربی به سمت جنوب شرقی است. شارش اکمن حاصل، سبب افزایش آب‌های گرم در دریای باندا<sup>۲</sup> می‌شود. شارش از دریای باندا در خلال مونسون جنوب شرقی از جولای تا سپتامبر هنگامی که هم بادهای روبه شمال غربی شدیدترند و هم آب‌های سطحی سردترند، قوی‌ترین میزان خود را داراست. این بادهای قوی به یک سطح تراز دریایی پایین‌تر در امتداد ساحل جنوبی جزایر زنجیره‌ای نوساتنگارا<sup>۳</sup> منجر می‌شوند و اعتقاد بر این است که ITF توسط این پاسخ اکمنی افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> Indonesian Throughflow

<sup>۲</sup> Banda Sea

<sup>۳</sup> Nusa Tenggara

گرچه مؤلفه زمینگرد و کل ITF مورد بررسی‌های بسیاری بوده‌است، سهم اکمنی ناشی از باد در ITF بسیار کم مورد توجه قرار داشته‌است از این رو این پروژه می‌تواند حائز اهمیت باشد.

(۹) *مشاهده ماهواره‌ای فراچاهی در امتداد ساحل غربی دریای چین جنوبی* [۹]: در این بررسی سیر تکاملی فراچاهی در امتداد ساحل غربی دریای چین جنوبی مورد مشاهده قرار گرفته‌است. داده‌های مورد استفاده از تصاویر مادون قرمز مربوط به تابستان ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ ماهواره AVHRR وابسته به سازمان هوایی و اقیانوسی ملی آمریکا گرفته شده‌است. این داده‌ها در ایستگاه موجود در جزیره تای پینگ<sup>۱</sup> در مرکز منطقه مورد نظر از ماهواره دریافت شده‌است. شدت فراچاهی که توسط اتلاف کل گرما در ناحیه سرد فراچاهی تعریف می‌شود، در تعیین ارتباط بین فراچاهی ساحلی و تنش باد گرفته شده از ماهواره ERS-2 به کار گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که ارتباط خطی خوبی با تنش باد کلی در امتداد ساحل وجود دارد در حالی که همبستگی کمی با مؤلفه تنش باد در جهت عمود بر ساحل موجود است. تصاویر مادون قرمز ماهواره‌ای بر این موضوع دلالت دارند که تنش در امتداد ساحل عامل اصلی پمپاژ آب سرد به لایه بالایی سطح آب است. در ضمن این نتایج هم‌چنین حاکی از آن است که مرکز نقل آب‌های سرد در خلال دوره مشاهده یک حرکت روبه جنوب از عرض ۱۵ درجه شمالی به عرض ۱۱ درجه شمالی دارد. اندازه ناحیه فراچاهی نیز تغییر می‌کند و سرانجام در میانه آگوست به درون یک جت سرد که در امتداد ساحل از عرض ۱۱ تا ۱۲ درجه شمالی کشیده شده‌است، می‌ریزد. داده‌های مادون قرمز ماهواره‌ای نشان می‌دهند که سیر تکاملی منطقه فراچاهی ارتباط بسیار نزدیکی با دو گردش آنتی-سیکلونی موجود در منطقه دریای چین جنوبی دارد.

(۱۰) *فراچاهی در ساحل جنوب غربی استرالیا* [۱۰]: یک سری از سطح مقطع‌های به دست آمده دما-شوری از دستگاه CTD دور از ساحل غربی استرالیا گویای وجود آب سردتری بر روی لایه بالایی ( $< 50\text{m}$ ) پوسته قاره‌ای در خلال ماه‌های تابستان است که خود نشان‌دهنده فراچاهی در این منطقه است. این داده‌ها به منظور شناخت دینامیک محلی در این ناحیه و تعیین سرچشمه آب نسبتاً سرد جریان دماغه‌ها به کار گرفته شده‌اند. به ویژه، یک مقطع CTD دور از دماغه متل<sup>۲</sup> در خلال فوریه ۱۹۸۷، در مقایسه با سطح مقطع‌های CTD که پیش‌تر، در اواخر ژانویه ۱۹۸۷، از نواحی دور از داینتر کاستیا کس<sup>۳</sup> و آلبانی

1. Tai-Ping

2. Mantle

3. D'Entrecastea

به دست آمده، نشان می‌دهد که آب سردتر دماغه منتل توسط فراچاهی جایگزیده در خلال دوره تابستانی تولید شده است و سرچشمه جریان دماغه‌ها را شکل می‌دهد. یک سری داده در دسامبر ۱۹۹۴ بیان‌گر وجود فراچاهی بر روی پوسته درونی دماغه منتل است که با شارش سرد و روبه شمال جریان دماغه‌ها مطابقت دارد. تخمین‌های انتقال اکمن نشان می‌دهد که سرریز شدن پوسته بالایی قاره‌ای بین پنج تا نه بار در تابستان می‌تواند اتفاق بیفتد.

(۱۱) *ضرایب فراچاهی ساحلی ساحل غربی امریکای شمالی* [۱۱]: سری‌های زمانی طولانی مربوط به جریان‌های سطحی اقیانوسی موجود نیستند و با استفاده از نظریه لایه مرزی سیاره‌ای و تقریب باد زمینگرد می‌توان به تخمین‌های قابل قبولی از انتقال‌های سطحی و فراچاهی ساحلی دست یافت. PFEG<sup>۱</sup> ضرایب روزانه و ماهانه‌ای از فراچاهی ساحلی در ۱۵ نقطه جغرافیایی استاندارد در امتداد ساحل غربی امریکای شمالی تولید کرده است. اولین سری که در سال ۱۹۶۷ آغاز شد دربرگیرنده میانگین‌های روزانه ضرایب فراچاهی شش ساعته بود و از روی میدان‌های فشار شش ساعته سینوپتیک تخمین زده شده بود و البته این روش به داده‌های ۵۰ سال پیش هم تعمیم داده شد.

ضرایب به دست آمده از میدان‌های فشار ماهانه بزرگ‌تر از میانگین‌های ماهانه ضرایب روزانه هستند. تفاوت در خلال فروچاهی زمستانه در نقاط شمالی و در خلال فراچاهی تابستانه در نقاط جنوبی بیش‌ترین میزان خود را دارد. خطاهای استاندارد روزانه به خاطر تغییرپذیری بالای مربوط به حرکت‌های جوی سینوپتیک در روز مورد نظری از ماه جولای، بزرگ‌تر از انحراف‌های ماهانه است. انحراف استاندارد‌های ماهانه دور از سواحل کالیفرنیا مرکزی و جنوبی در بهار به اوج خود می‌رسند و کماکان در تابستان نسبتاً بالا هستند در حالی که خطاهای روزانه استاندارد به سرعت بین اواخر تابستان و زمستان، کاهش می‌یابند.

یکی از نکات بسیار قابل توجه در این پژوهش این است که علی‌رغم گسترده بودن بازه عرض‌های جغرافیایی بیش‌تر آنومالی‌ها، آنومالی‌های مثبت و منفی مهم دوره‌های نسبتاً کوتاهی دارند. هم‌چنین ضرایب در الگوهای زمانی خود جابه‌جایی‌های ناگهانی را نشان می‌دهند. این تغییرات ممکن است ناشی از تغییر در چشمه میدان‌های فشار ماهانه یا روش به کار گرفته شده در درون‌یابی میدان‌های فشار شبکه‌بندی شده در محاسبه این ضرایب باشد.

<sup>۱</sup> Pacific Fisheries Environmental Group