

## تحلیل حرکت جریان‌های دریائی در تصاویر حرارتی سطح آب دریا

مهدی حسنلو<sup>۱</sup> و محمد رضا سراجیان<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک

پرديس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار قطب مهندسی نقشه‌برداری و مقابله با سوانح طبیعی و گرایش سنجش از دور

گروه مهندسی نقشه‌برداری و ژئوماتیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۰/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۱۲/۱۲، تاریخ تصویب ۸۸/۳/۲۵)

### چکیده

تصاویر ماهواره‌ای حرارتی سطح دریا (SST)، داده‌های ارتفاع سنجی و داده‌های رنگی اقیانوس برای شناسایی جریان‌های دریائی و ساختارهای گردابی در اقیانوس به کار برده می‌شوند. هدف از این مقاله استخراج چارچوبی برای پردازش تصاویر پی‌درپی بزرگ اقیانوسی به منظور شناسایی و استخراج جا به جایی‌های کلی مانند جریان‌های اقیانوسی و مکان ساختارهای خاص مانند جریان آب و گرداب‌ها و جبهه‌های دریائی می‌باشد. این خصوصیات و فرآیندها در سامانه‌های نظارت جهانی و منطقه‌ای کاربرد دارد. با استفاده از روش‌های سطح مینا شامل، روش تناظریایی کمترین مربعات (LSM) و روش سلسله مراتبی کمترین مربعات (HLK) Lucas and Kanade<sup>۳</sup> حرکات ظاهری آب استخراج شده‌اند. داده‌های مورد پردازش تصاویر حرارتی دریای خزر می‌باشد که بوسیله سنجنده MODIS از ماهواره Terra مورد استفاده قرار گرفته است. سه تصویر روزانه حرارتی سطح دریای خزر با فاصله زمانی ۲۴ ساعت به عنوان داده‌های ورودی استفاده شده‌اند. روش LSM، یک روش انعطاف‌پذیر بوده و برای اغلب تناظریایی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و به کارگیری این روش در استخراج جریان بهینه می‌باشد. این روش امکان استفاده همزمان تصحیحات محلی رادیومتریکی و هندسی را دارا است. در واقع رابطه بین دو الگوی تصویر با مدل رادیومتریکی و هندسی مد نظر قرار می‌گیرد. به منظور به کارگیری روش کمترین مربعات وزن‌دار که از مدل و قید درجه اول جریان نوری (OF) استفاده می‌نماید، از روش HLK کمک گرفته شد. این روش با مشخص کردن جریان‌های دریائی با شیوه پردازش زیر به نرم و استفاده از هرم‌های گوسی تصاویر SST به ردیابی حرکت می‌پردازد. این شیوه حل به استخراج جریان‌های بزرگ دریائی در لایه‌های بالائی هرم پرداخته و بسمت نتایج صحیح در لایه پائینی هرم راهنمایی می‌نماید. شیوه استفاده شده در این مطالعه نشان دهنده کارایی بالا و قوی شیوه حل مساله در مقایسه با روش‌های معمول تخمین حرکت جریان آب می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تناظریایی کمترین مربعات، جریان نوری، حرکت آب، تصاویر ماهواره‌ای حرارتی سطح آب، هرم

تصویر، زبر به نرم

### مقدمه

هدف این مقاله استخراج روندی برای پردازش تصاویر پویای پی‌درپی از سطح اقیانوس، بمنظور کشف جابجایی کلی مانند جریان‌های اقیانوسی، حرکت ابر یا برای مشخص کردن ساختارهای ویژه‌ای مانند حرکت جریان سطح و جبهه‌های دریائی می‌باشد. این پردازش و شناسایی‌ها باعث بهبود پردازش‌های خاص در نظارت بر سامانه‌های جهانی می‌شود.

پردازش تصاویر پی‌درپی با مشکلاتی نیز همراه است، این مشکلات شامل حفظ سیر تدریجی حرکت ظاهری و عدم ناپیوستگی حوضه‌های حرکتی اتفاق افتاده در جبهه‌های حرارتی در تصاویر SST می‌باشد. برای نیل به این خواسته دو روش کمترین مربعات برای استخراج

تصاویر تولید شده در ماهواره‌هایی که به منظور نظارت بر محیط زیست پرتاب شده‌اند، زمینه وسیعی در علوم مرتبط با زمین ایجاد نموده‌اند. پوشش وسیع این تصاویر باعث شناسایی پدیده‌های طبیعی از طریق تفاوت در اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و بازتابی می‌شود. تصاویر حرارتی سطح دریا، داده‌های ارتفاعی و داده‌های رنگی اقیانوسی می‌توانند بطور همزمان برای شناسایی جریان‌های ساختارهای گردابی در اقیانوس‌ها به کار برده شوند. ویژگی اصلی تصاویر سنجش از دور محیط زیستی اندازه‌گیری منظم و در دسترس بودن وسیع آنها می‌باشد. این داده‌های منظم مکانی و زمانی باعث شناسایی تکمیلی فرآیندهای اتمسفری و اقیانوسی با پردازش تصاویر پی‌درپی می‌شود.

است و الگوریتم‌های پیشرفته تناظریابی در این زمینه به کار گرفته نشده است.

### روش پیشنهادی

مشکلات موجود در استخراج جریان‌ات دریایی را می‌توان وجود ابر در تصاویر پی‌درپی، نا کارایی الگوریتم‌های همبستگی برای استخراج حرکت‌های وسیع و عدم دسترس بودن داده‌های ارتفاعی و رنگی از سطح آب دریا دانست. برای دستیابی و استخراج جریان دلخواه استفاده از دو روش استخراج الگو شامل، الگوریتم تناظریابی با دقت زیر پیکسل (LSM) و یکی از الگوریتم‌های استخراج جریان نوری (HLK) به کار گرفته شد. هر دوی این روش‌ها با به کارگیری روش کمترین مربعات به استخراج جریان‌ات ظاهری می‌پردازند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر نکات ابتکاری برای به کارگیری و استخراج جریان‌ات در هریک از روش‌های مطرح در این مقاله خواهیم پرداخت.

### روش تناظریابی کمترین مربعات

تناظریابی تصویر از جمله فرآیندهای تحلیلی پردازش تصاویر است و کاربردهای وسیعی در تحلیل حرکت، بینایی کامپیوتر، رباتیک، ناوبری، جستجوی خودکار و غیره می‌باشد [۱]. همبستگی متقاطع<sup>۵</sup> و شیوه‌های مشابه در دهه‌های اخیر در این زمینه روش معمول استفاده بوده‌اند. نقص این روش تناظریابی تصویر، کندی انجام در سامانه‌های مورد نیاز می‌باشد. نحوه نوردی و نیز شرایط بازتابش نور از اجسام می‌تواند باعث تغییر در خصوصیت رادیومتریکی تصاویر مورد پردازش شود. در شرایط خاص این مورد ممکن است باعث جا به جایی هندسی در تصویر نیز شود. نویز ناشی از قطعات الکترونیکی و نرخ نمونه‌برداری (اندازه پیکسل) می‌تواند تاثیرات سوء هندسی و رادیومتریکی بر روی تصویر داشته باشد. در روش همبستگی متقاطع اگر دو قطعه تصویر مورد پردازش دارای سیگنال کافی بوده و دارای اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی حداقل باشند، روش بسیار سریع جواب می‌رسد. شرایط گفته شده بندرت در تصاویر سنجش از دور دیده می‌شود. در روش معمول تناظریابی کمترین مربعات [۲] تشابه بین دو قسمت تصویر با مدل هندسی (شش پارامتر تبدیل) و مدل رادیومتریکی (دو

جریان‌ات ظاهری به کار گرفته شده است که شامل تناظریابی کمترین مربعات و روش سلسله مراتبی Lucas and Kanade می‌باشد.

در این مقاله ابتدا به معرفی تناظریابی کمترین مربعات پرداخته شده است و سپس به معرفی روش سلسله مراتبی Lucas and Kanade پرداخته‌ایم. در ادامه تغییرات انجام گرفته در روش به کارگیری شده به منظور بهبود نتایج محاسبه جریان نوری آورده شده است و در نهایت نیز نتایج و کارائی روش بیان شده است.

### مروری بر تحقیقات مرتبط

با به کارگیری تصاویر حرارتی از سطح اقیانوس‌ها، می‌توان جریان اقیانوسی موجود را بوسیله الگوریتم‌های جستجوی عوارض با ردیابی گرایان حرارتی و حرکت افقی و سطحی<sup>۸</sup> آن استخراج نمود [۱۳]. تحقیقات در زمینه استخراج جریان‌ات سطحی دریا با استفاده از تصاویر حرارتی را می‌توان به استفاده از الگوریتم‌های جستجوی الگو و الگوریتم‌های پیدا نمودن بیشترین همبستگی مانند MCC<sup>۹</sup> را نام برد. در سال‌های پیش به کارگیری روش‌های همبستگی بیشتر از روش‌های قبل معمول بوده و بواسطه به کارگیری این روش‌ها برای استخراج جریان‌ات سطحی دریا، مشکلاتی از قبیل بزرگی جریان‌ات استخراج شده، ناهمگنی تناظرهای به دست آمده و وابستگی شدید به اندازه پنجره جستجو را می‌توان در نظر گرفت [۱۳].

در این بین به کارگیری سنجنده‌های کمکی از قبیل داده‌های آلتیمتری (مانند Topex/Poseidon) [۱۴]، داده‌های رنگی (مانند SeaWIFS) و داده‌های سرعت باد (مانند QuickSCAT) و داده‌های راداری [۱۵] از سطح دریا به درک بهتر از وضعیت آب‌های سطحی پرداخته و ما را در استخراج دقیق‌تر این جریان‌ات یاری می‌رسانند. در کل به کارگیری تصاویر پی‌درپی حرارتی، ماهواره‌های با فواصل اخذ مشخص از قبل نیز مرسوم بوده و با به کارگیری و ردیابی الگوهای حرارتی و بدنه‌های آبی در این تصاویر به استخراج جریان سطحی آب دریا دست خواهیم یافت. این روند با تلفیق روند استخراج جریان‌ات بوسیله الگوریتم‌های موجود و نیز ردیابی چشمی الگوها و بدنه‌های آبی انجام می‌گرفته است [۱۳]. در کل روند استخراج جریان‌ات سطحی بر مبنای استخراج از تصاویر پی‌درپی بیشتر بر مبنای تناظریابی همبستگی استوار بوده

تناوبی با معادله قیدها محاسبه می‌گردد و سپس برای برآورد پارامترها به کار گرفته می‌شود. برای تکرارهای بعدی می‌بایست از تصویر سمت راست،  $h(x', y')$  با استفاده از معکوس تبدیل به دست آمده (شش پارامتر آفاین) نمونه‌برداری مجدد صورت گیرد. بعد از چندین تکرار و نمونه‌برداری دوباره دو تصویر باید نسبت بهم هم راستا شده باشند. روند و مراحل پردازش تناظریابی در زیر آمده است [۳]:



### روش سلسله مراتبی کمترین مربعات Lucas and Kanade

روش‌های محاسبه تفاضلی جریان نوری (سرعت) با استفاده از مشتقات زمانی/مکانی از مقدار روشنایی تصویر یا فیلتر کردن تصویر (پایین‌گذر و باند‌گذر) به دست می‌آید. اولین نمونه‌ها از قید مشتقات درجه اول بر مبنای انتقال تصویر استفاده کردند [۵].

$$I(x, t) = I(x - Vt, 0) \quad (10)$$

در این رابطه  $V = (u, v)^T$  می‌باشد. با استفاده از بسط تیلور رابطه (۱۶) و یا در حالت کلی با فرض این که مقدار

پارامتر تبدیل) اندازه‌گیری می‌شود. سطوح خاکستری هر پیکسل در تصویر اول (که تصویر چپ در این مقاله نامیده می‌شود) به طور دلخواه به عنوان مشاهده در نظر گرفته می‌شود، در حالی که سطوح خاکستری هر پیکسل در تصویر دیگر (تصویر راست) ثابت در نظر گرفته می‌شود.

### حل معادله مشاهداتی

معادله قید ساده شده که فقط پارامترهای هندسی را در نظر می‌گیرد به شکل زیر است

$$g(x, y) = h(x', y') \quad (1)$$

در این حالت دو سیستم مختصات با شش پارامتر تبدیل بهم وابسته می‌شوند.

$$\begin{aligned} x' &= a_1x + a_2y + a_3 \\ y' &= b_1x + b_2y + b_3 \end{aligned} \quad (2)$$

مدل گسترش یافته شامل دو پارامتر رادیومتریکی روشنایی و کنتراست (gain و offset) است که به صورت

$$g(x, y) = k_1h(x', y') + k_2 \quad (3)$$

با نوشتن بفرم معادله قید، معادله (۴) حاصل می‌شود.

$$F = g(x, y) - k_1h(x', y') - k_2 = 0 \quad (4)$$

که  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, k_1, k_2$  پارامترها و مشاهدات  $x, y, h$  مقادیر ثابت هستند. در این حالت معادله به شکل زیر خطی می‌شود.

$$V + B\Delta = f \quad (5)$$

در این حالت فرض شده است که دو تصویر نسبت بهم ثبت هندسی و همچنین از لحاظ رادیومتریکی شبیه بهم هستند. با این فرضیات مقادیر اولیه بردار پارامترها به فرم زیر است.

$$\begin{bmatrix} a_1^0 & a_2^0 & a_3^0 & b_1^0 & b_2^0 & b_3^0 & k_1^0 & k_2^0 \end{bmatrix}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (6)$$

ضرایب ماتریس  $B$  با توجه به مشتقات جزئی معادله (۴) تشکیل می‌شود.

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a_1} & \frac{\partial F}{\partial a_2} & \frac{\partial F}{\partial a_3} & \frac{\partial F}{\partial b_1} & \frac{\partial F}{\partial b_2} & \frac{\partial F}{\partial b_3} & \frac{\partial F}{\partial k_1} & \frac{\partial F}{\partial k_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

پارامتر  $f$ ، قسمت سمت راست معادله (۵) بصورت زیر می‌باشد.

$$f = -F = -(g(x, y) - k_1h(x', y') - k_2) \quad (8)$$

این مقدار تقریبی به فرم زیر محاسبه می‌گردد.

$$f = h(x, y) - g(x, y) \quad (9)$$

### روند تناظریابی کمترین مربعات

معادله نرمال برای حل کمترین مربعات به صورت

تمامی جمع‌ها بر روی پیکسل‌های  $(x, y)$  در همسایگی  $\Omega$  انجام می‌شود. در این تحقیق از  $n = 5$  و نیز برای ماتریس وزن یکه برای پنجره  $W$  استفاده شد زیرا تجربه نشان داده است، استفاده از وزن گوسی تأثیر کمی بر دقت نتایج دارد.

### ساختار سلسله‌مراتبی

پردازش سلسله‌مراتبی با چهار مرحله کامل می‌شود:

۱. تشکیل هرم‌های گوسی تصویر.
  ۲. محاسبه سرعت تصویر (جریان نوری).
  ۳. پیچش تصویر  $\gamma$  و
  ۴. پالایش زبر به نرم.
- که هر کدام در بخش‌های مطرح شده به تفکیک توضیح و تفسیر داده می‌شوند.

### هرم گوسی

هرم‌های گوسی تصویر، نشان دادن تصویر در توان تفکیک‌های چندگانه از زبر به نرم می‌باشد. تصاویر زبرتر پلرتر و بیشتر نمونه‌برداری شده اند (حرکت آهسته تصویر). در این مطالعه هرم‌های تصویر با روش استاندارد تهیه شده‌اند. در لایه صفر تصویر اصلی است، لایه یک با بلرکردن لایه صفر با فیلتر گسسته دو بعدی (با انحراف معیار یک) و نمونه‌برداری تصویر بلر شده در مقیاس دوبرابر کوچکتر تهیه می‌شود. به همین ترتیب لایه  $i$  با استفاده از لایه  $i-1$  به همین شیوه بلرکردن و نمونه‌برداری تهیه می‌شود. در این روش حرکت تصویر با ۲۰ پیکسل بر فریم در لایه صفر به ۱۰ پیکسل بر فریم در لایه یک و ۵ پیکسل بر فریم در لایه دو و ۲/۵ پیکسل بر فریم در لایه سه تبدیل می‌شود (که بسیار شبیه به شیوه حرکت تصویر در این تحقیق می‌باشد). به این ترتیب، تصویر  $512 \times 512$  در لایه صفر به  $64 \times 64$  در لایه سه تبدیل می‌شود.

### محاسبه جریان نوری

- محاسبه سرعت تصویر به صورت مراحل زیر است [۶]:
۱. نرم کردن تصویر برای کاهش نویز و اثرات Antialiasing.
  ۲. محاسبه مشتقات مکانی زمانی روشنایی تصویر.
  ۳. اندازه‌گیری و یکپارچه‌سازی سرعت‌های نرمال با همسایگان در کل تصویر سرعت.

روشنایی ثابت  $dI(x, t)/dt = 0$  است، رابطه قید جریان نوری به سادگی به دست می‌آید:

$$\nabla I(x, y, t) \cdot V + I_t(x, y, t) = 0 \quad (11)$$

$I_t(x, y, t)$  نشان دهنده مشتق جزئی  $I(x, y, t)$  و گرادیان  $\nabla I(x, y, t) = (I_x(x, y, t), I_y(x, y, t))^T$  و  $\nabla I(x, y, t) \cdot V$  ضرب داخلی است. در اصل با داشتن معادله (۱۷) تنها می‌توان حرکت نرمال را در راستای یکه محاسبه نمود  $V_n = S_n$ . سرعت نرمال  $S$  و سه جهت نرمال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$S(x, y, t) = \frac{-I_t(x, y, t)}{\|\nabla I(x, y, t)\|}, n(x, y, t) = \frac{\nabla I(x, y, t)}{\|\nabla I(x, y, t)\|} \quad (12)$$

در معادله (۱۱) دو مجهول  $V$  وجود دارد که فقط با یک معادله خطی مقید شده است، بنابراین قیود دیگری برای محاسبه دو مجهول  $V$  مورد نیاز است.

### روش کمترین مربعات وزندار Lucas and Kanade

این روش با پیاده سازی روش کمترین مربعات وزندار و نیز استفاده از قید درجه اول معادله (۱۱) مدلی برای برآورد  $V$  در محدوده‌ی کوچک در اطراف محدوده مورد نظر  $\Omega$  را در نظر گرفته و رابطه زبر را کمینه می‌نماید.

$$\sum_{x, y \in \Omega} W^2(x, y) [\nabla I(x, y, t) \cdot \bar{v} + I_t(x, y, t)]^2 \quad (13)$$

که در این رابطه،  $W(x, y)$  پنجره‌ایست که بیشترین تأثیر را بر قید در همسایگی نقطه مورد نظر دارد ( $W$  معمولاً ضرایب دو بعدی گوسی می‌باشد). راه حل رسیدن به جواب معادله (۱۳) به صورت زیر است.

$$A^T W^2 A \bar{v} = A^T W^2 \bar{b} \quad (14)$$

که برای  $N$  پیکسل (برای  $n \times n$  همسایه  $n^2$ ) شامل  $(x_i, y_i) \in \Omega$  در زمان واحد  $t$ ، به صورت زیر است.

$$A = [\nabla I(x_1, y_1), \dots, \nabla I(x_N, y_N)]^T \\ W = \text{diag}[W(x_1, y_1), \dots, W(x_N, y_N)] \\ \bar{b} = -(I_t(x_1, y_1), \dots, I_t(x_N, y_N))^T \quad (15)$$

حل معادله (۱۴) به صورت  $\bar{v} = [A^T W^2 A]^{-1} A^T W^2 \bar{b}$  می‌باشد که فرم بسته حل کمترین مربعات می‌باشد و این در شرایطی است که  $A^T W^2 A$  غیر تکیه‌ناپذیر باشد. این ماتریس  $2 \times 2$  و به صورت زیر محاسبه شود.

$$A^T W^2 A = \begin{bmatrix} \sum W^2(x, y) I_x^2(x, y) & \sum W^2(x, y) I_x(x, y) I_y(x, y) \\ \sum W^2(x, y) I_x(x, y) I_y(x, y) & \sum W^2(x, y) I_y^2(x, y) \end{bmatrix} \quad (16)$$

## پیش‌نویس تصویر

- کمترین مربعات نظر گرفته شد ( $n=2,3$ ).
۲. بعد از محاسبه سرعت (و دو برابر کردن آن) در مکان  $(i,j)$  آن را در مکان‌های  $(2i,2j)$ ,  $(2i+1,2j)$ ,  $(2i+1,2j+1)$  تصویر می‌نمائیم.
  ۳. با داشتن مقدار سرعت تصویر شده در حول پیکسل مورد نظر، تصویر را پیش می‌دهیم که این کار بمنظور کاهش اثرات سرعت تصویر شده می‌باشد. تصویر پیش داده شده به سرعت تصویر شده اضافه می‌شود و به عنوان سرعت در آن لایه در نظر گرفته می‌شود.
  ۴. سپس سرعت تصویر شده دو برابر شده و به لایه بعدی با رویه مراحل قبل تصویر می‌شود و دوباره پیش انجام می‌شود.
  ۵. این تصویر کردن و پیش تا رسیدن به لایه آخر (تصویر اصلی) ادامه می‌یابد. در نتیجه سرعت در لایه آخر به عنوان جریان نوری تصویر مورد پردازش در نظر گرفته می‌شود.
- روند کلی در شکل زیر آمده است.



شکل ۱: روند کلی

مدل پارامتریک معرفی شده در قسمت قبلی برای حرکت های کوچک در تصویر دقیق می‌باشد ولی در مورد حالت‌های حرکت بزرگ تصویر، لازم است تصویر قبل از پردازش پیش‌نویس یابد. پیش‌نویس تصویر با به کارگیری حوضه جریان محاسبه شده به عنوان سرعت اولیه در هر پیکسل  $(x,y)$  در تصاویر بی‌دری صورت می‌گیرد. یک منطقه مشترک در تصاویر بی‌دری در فریم‌های مناسب و جابه جایی از مکان معلوم  $(x,y)$  باعث می‌شود که فضای تصویر به مکان و زمان تفکیک پذیر باشد. هر منطقه انتخاب شده بگونه‌ای پردازش می‌شود که گوئی به عنوان یک قطعه تصویر جداگانه برای تعیین و محاسبه مشتقات جزئی روشنایی پیکسل به کار برده شده است. این شیوه به کارگیری باعث می‌شود که محاسبه سرعت تصویر برای یک منطقه خاص به مقادیر اولیه محاسبه شده اضافه شود و محاسبه نتایج دقیق‌تر انجام گیرد. مقادیر سرعت محاسبه شده به صورت اعشاری است، بنابراین با استفاده از درون‌یابی دوخطی مقدار واقعی سطوح خاکستری در هر پیکسل محاسبه می‌شود [۱۲]. درون‌یابی دوخطی با استفاده از چهار نزدیکترین مقدار عدد صحیح به محاسبه سطوح خاکستری در مکان غیر عدد صحیح پیکسل داده شده می‌پردازد. برای مکان‌های زیر پیکسل  $(x,y)$ ، که  $i$  مقدار صحیح  $x$  و  $j$  مقدار صحیح  $y$ ، چهار همسایه نزدیک  $(i,j)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i+1,j+1)$ ,  $(i,j+1)$  اگر  $I_1, I_2, I_3, I_4$  بترتیب مقادیر خاکستری در  $(i,j)$ ,  $(i+1,j)$ ,  $(i+1,j+1)$ ,  $(i,j+1)$  باشد، بنابراین مقدار روشنایی در زیر پیکسل  $(x,y)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود.

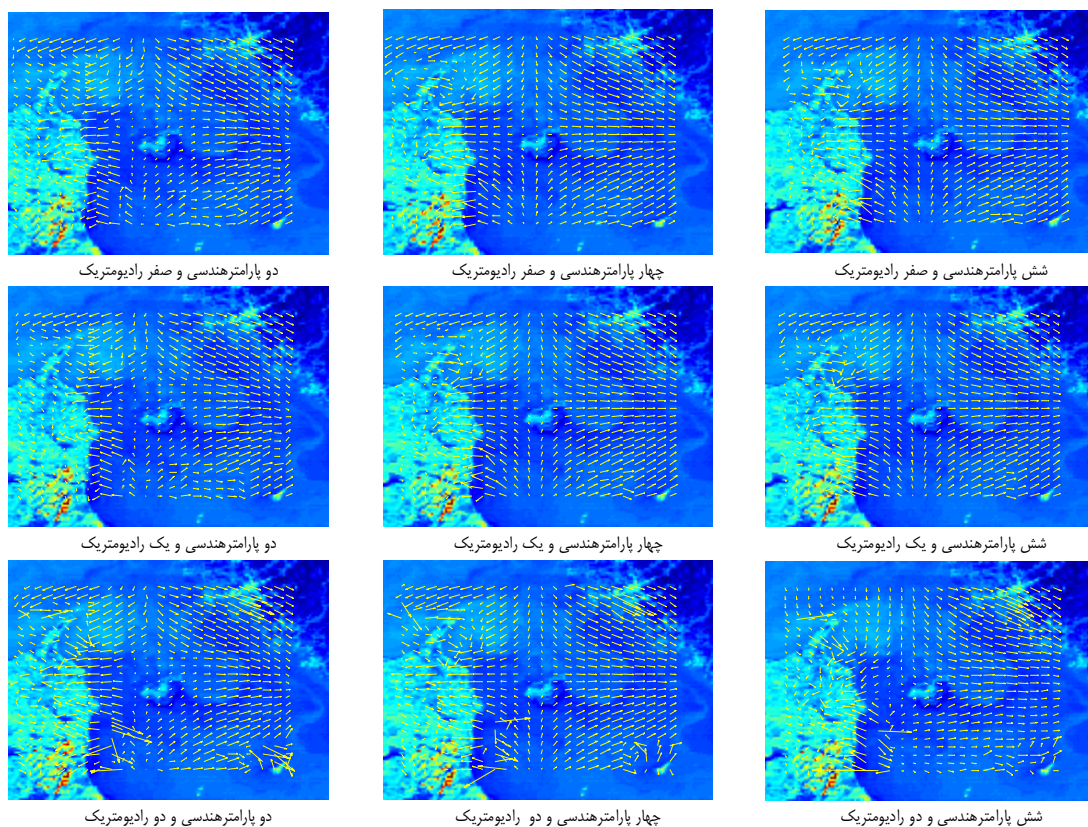
$$I(x,y) = (1-p)(1-q)I_1 + pI_2 + q(1-p)I_4 + pI_3 \quad (17)$$

در این رابطه  $p = x - i$  و  $q = y - j$  است.

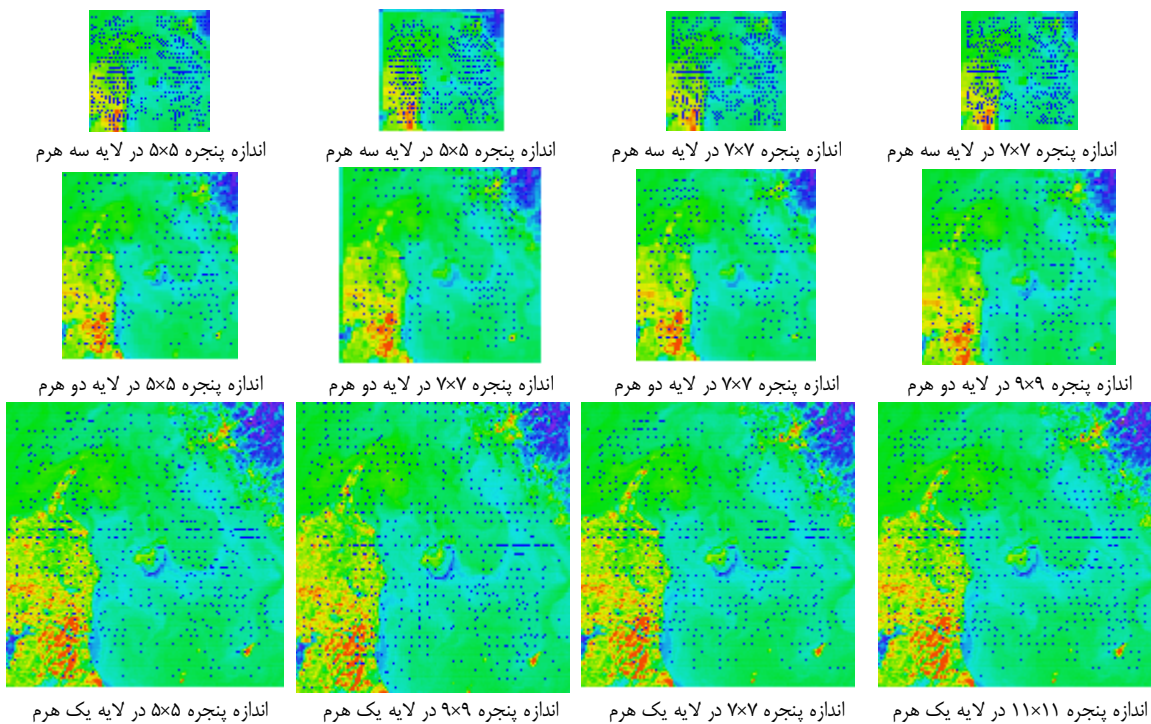
## پالایش زبر به نرم

الگوریتم‌های سلسله مراتبی زبر به نرم، یک شیوه کنترل می‌باشد که از لایه‌های بالای هرم شروع شده و لایه به لایه به سمت لایه پایین هرم (تصویر اصلی) حرکت می‌کند. در هر لایه جریان نوری به طور مستقل محاسبه شده و به لایه بعدی تصویر می‌شود. این مراحل به صورت زیر است:

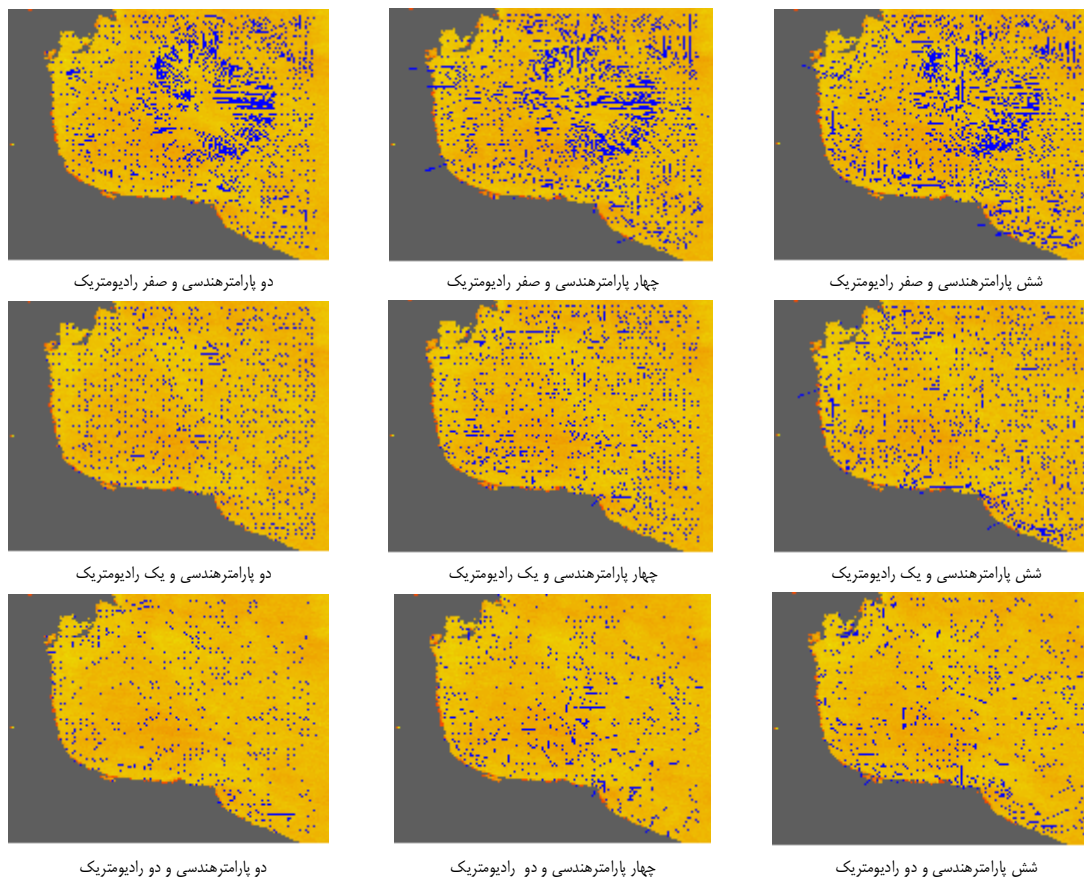
۱. محاسبه سرعت تصویر در لایه بالایی. در این تحقیق اندازه همسایگی پنجره الگو  $2n+1$ ، در حل



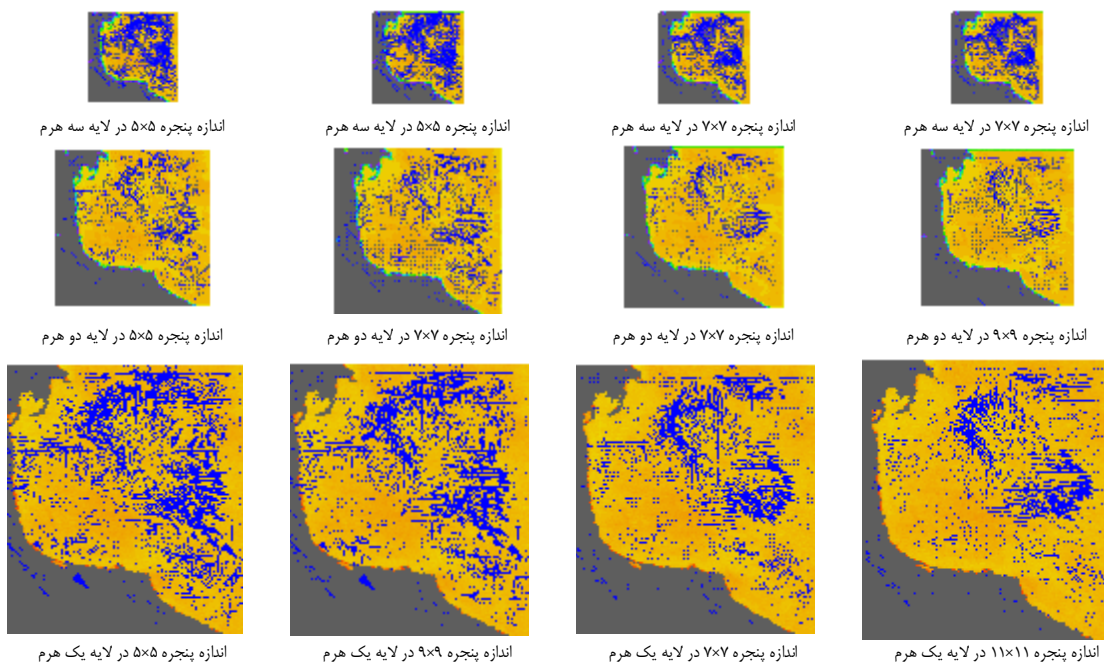
شکل ۲: جریان نوری استخراج شده در روش تناظریابی کمترین مربعات در تصویر شبیه‌سازی شده.



شکل ۳: جریان نوری استخراج شده در روش سلسله مراتبی کمترین مربعات در تصویر شبیه‌سازی شده.



شکل ۴: جریان نوری استخراج شده از تصاویر حرارتی دریای خزر بروش LSM.



شکل ۵: جریان نوری استخراج شده از تصاویر حرارتی دریای خزر به روش HLK.

## نتایج عملی و ارزیابی

در واقعیت، الگوهای دما ردیاب های مناسبی برای تحلیل حرکت آب می باشند. بنابراین حرکت آب در تصاویر ماهواره ای با به کارگیری تصاویر حرارتی سطح دریا (SST) به عنوان ورودی ارائه داده می شود. در این حالت دو تصویر حرارتی روزانه با اختلاف زمانی ۲۴ ساعته از دریای خزر اخذ شده بوسیله سنجنده MODIS مستقر بر روی ماهواره Terra استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱: داده های مورد استفاده.

تصویر اول	تصویر دوم	تاریخ اخذ تصویر
۲۰۰۵/۰۸/۱۷	۲۰۰۵/۰۸/۱۸	تاریخ اخذ تصویر
۰۷:۲۰ صبح	۰۸:۰۵ صبح	ساعت اخذ تصویر
۱۳۵۴×۲۰۳۰	۱۳۵۴×۲۰۴۰	ابعاد تصویر

این پردازش با تصحیح هندسی دو تصویر شروع می شود. ثبت هندسی یک مرحله مهم برای استخراج جریان نوری بوسیله روش های LSM, HLK می باشد و این به دلیل کیفیت مقدار تقریبی اولیه برای پنجره متناظر در تصویر سمت راست می باشد، که باعث همگرا یا واگرا شدن الگوریتم می شود. دومین مرحله پوشاندن و حذف مناطق ساحلی و ابری برای کاهش اثرات واگرایی این مناطق می باشد. در مرحله بعد در روش LSM، مقادیر اولیه برای پارامترهای هندسی و رادیومتریکی در نظر گرفته می شود. در این مرحله تعداد تکرارها نیز مشخص می شود. سپس مقدار حد آستانه برای شرط خاتمه حلقه در LSM در نظر گرفته می شود. در این تحقیق تعداد تکرارها ۳۰ و مقدار حد آستانه  $\Delta = 0.001$  تعیین شد. هنگامی که هر کدام از این شرایط برآورده شود محاسبات متوقف شده و نتایج ذخیره می شود. اندازه پنجره الگو  $31 \times 31$  در روش LSM در نظر گرفته می شود و در روش HLK اندازه پنجره الگو  $5 \times 5$  و  $7 \times 7$  در اطراف پیکسل انتخاب شده در نظر گرفته شد. تعداد لایه های هرم در این تحقیق ۳ می باشد. در اجرای این روش دو استراتژی حل وجود دارد. در استراتژی اول یک اندازه ثابت برای پنجره الگو در کلیه لایه های هرم در نظر گرفته می شود و در استراتژی دوم اندازه پنجره الگو در پردازش زبر به نرم بزرگتر می شود.

در آغاز، کارایی الگوریتم بر روی تصاویر شبیه سازی شده حرارتی که دارای یک حوضه حرکتی از قبل مشخص است، امتحان می شود. در ادامه نتایج حاصل از استخراج

جریانات دریائی بر روی تصاویر حرارتی سطح دریا آورده شده است، سپس خطاهای زاویه ای و تفاضلی توضیح داده شده است.

## حرکت آب در تصاویر حرارتی شبیه سازی

امتیاز استفاده از داده های شبیه سازی شده معلوم بودن حوضه حرکت دو بعدی است، که باعث کنترل و آزمایش در تغییر پارامترهای مختلف می شود. بعلاوه اینکه خصوصیات سیگنال تصاویر شبیه سازی شده همان سیگنال تصاویر ماهواره ای استفاده شده (MODIS) می باشد. حرکت آب شبیه سازی شده در تصاویر پی در پی بوسیله تبدیلات سینوسی در دو جهت  $x, y$  (معادله ۱۸) انجام شده است.

۲ پارامتر	۴ پارامتر	۶ پارامتر
$a_3, b_3$	$a_1, a_3, b_2, b_3$	$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$
$a_3, b_3, k_1$	$a_1, a_3, b_2, b_3, k_1$	$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, k_1$
$a_3, b_3, k_1, k$	$a_1, a_3, b_2, b_3, k_1, k$	$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, k_1, k$

$$X = x_i + 5\sin(2\pi x_i / \text{imagewidth}) \quad (18)$$

$$Y = y_i - 3\sin(2\pi y_i / \text{imagewidth})$$

با به کارگیری این تبدیلات در تصویر اصلی و نمونه برداری مجدد با روش دوخطی تصویر دیگری حاصل می شود که تمام جا به جایی های آن مشخص می باشد. شکل (۲) نتایج جریان نوری استخراج شده از تصویر اصلی و تصویر شبیه سازی شده در روش تناظریابی کمترین مربعات می باشد. شکل (۳) نتایج جریان نوری استخراج شده از تصویر اصلی و تصویر شبیه سازی شده در روش سلسله مراتبی کمترین مربعات Lucas and Kanade را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، استفاده از روش هرمی و پردازش زبر به نرم باعث افزایش دقت استخراج جریان نوری شده و نیز در نرم تر شدن جریان های استخراج شده نسبت به نتایج روش تناظریابی کمترین مربعات می شود.

## حرکت واقعی آب در تصاویر پی در پی حرارتی

یک جفت تصاویر پی در پی حرارتی سطح دریا از دریای خزر که توسط سنجنده MODIS اخذ شده است مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر ابتدا ثبت هندسی شدند و در ادامه مناطق ساحلی و پیکسل های ابری از



جدول ۳: نتایج جریان نوری در تصاویر شبیه‌سازی.

تصویر تبدیل داده شده (روش LSM)			
انحراف معیار	میانگین خطا	تبدیلات	
		رادیومتریک	هندسی
۲/۲۹°	۲/۸۵°	۰	۲
۲/۵۳°	۳/۰۹°	۰	۴
۲/۵۶°	۳/۰۹°	۰	۶
۲/۲۷°	۲/۷۶°	۱	۲
۲/۴۴°	۳/۰۳°	۱	۴
۲/۵۸°	۳/۱۳°	۱	۶
۲/۴۹°	۲/۹۹°	۲	۲
۲/۵۳°	۳/۰۶°	۲	۴
۱/۹۷°	۲/۷۶°	۲	۶

جدول (۴) نتایج میانگین و انحراف معیار در خطای زاویه‌ای در تحلیل حرکت سینوسی در روش HLK را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نتایج جریان نوری در تصاویر شبیه‌سازی.

تصویر تبدیل داده شده (روش HLK)			
انحراف معیار	میانگین خطا	پارامترهای روش	
		ثابت ماندن اندازه پنجره الگو	اندازه پنجره الگو
۰/۹۲°	۰/۹۷°	بله	۵×۵
۰/۹۳°	۰/۹۸°	خیر	۹×۹
۰/۹۷°	۱/۰۳°	بله	۷×۷
۱/۰۰°	۱/۰۵°	خیر	۱۱×۱۱

در تحلیل نتایج جدول (۳)، با ترکیب پارامترهای استفاده شده در روش LSM، واضح است که اگر در یک تصویر فقط تبدیلات هندسی انجام شده باشد و جریان نوری بدست آمده با استفاده از ترکیبی از پارامترهای هندسی انجام شده باشد، دقت مورد نیاز به دست می‌آید. همچنین با افزایش پارامترهای هندسی به سمت مدل کامل افاین، بسته به پیچیدگی مدل هندسی به کار گرفته شده و نیز استفاده از پیچیدگی های تصویر به کار گرفته شده، جریان نوری با دقت بالاتری بدست می‌آید. در عین حال از جدول (۴) نتیجه می‌شود که با بزرگتر شدن اندازه پنجره‌های الگو، نتایج دقیقتر نمی‌گردد که به علت پیچیدگی الگوهای حرارتی قرار گرفته در پنجره‌های الگو بزرگتر می‌باشد، زیرا در پنجره‌های الگو کوچکتر الگوهای حرکتی برای الگوریتم قابل تشخیص می‌باشد.

### نتیجه گیری

دو روش کمترین مربعات برای تحلیل حرکت تصویر و استخراج جریان نوری با استفاده از تصاویر حرارتی سنجنده MODIS مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که

تصویر حذف شدند. شکل (۴) جریان های نوری استخراج شده از تصاویر SST در روش LSM را نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز جریان نوری استخراج شده از تصاویر SST در روش هرمی و سلسله مراتبی را نشان می‌دهد. جریان های استخراج شده نشان از بهتر بودن نتایج در روش هرمی و سلسله مراتبی با توجه به حرکات الگوهای حرارتی موجود در تصاویر SST به کار گرفته شده، است.

### تحلیل نتایج به دست آمده

ترکیبات پارامترهای مختلف روش LSM در دو داده مختلف شبیه‌سازی شده و حقیقی مورد آزمایش قرار گرفت. این ترکیبات شامل تبدیلات هندسی با ۲، ۴، ۶ پارامتر به همراه تبدیلات رادیومتریکی با ۰، ۱ و ۲ پارامتر می‌باشد.

سرعت  $V = (u, v)$  را می‌توان به عنوان جا به جایی در واحد زمان که همان پیکسل بر فریم یا بردار جهت دار در فضای مکان/زمان با  $(u, v, 1)$  نشان داد. این بردار دارای واحد (pixel, pixel, frame) می‌باشد. البته مقدار سرعت در هر جهت بوسیله تقسیم هر المان  $(u, v)$  به مؤلفه سوم (تعداد تناوبات بین فریم های به کار گرفته شده) به دست می‌آید. هنگامی که سرعت در فضای زمان و مکان اندازه گیری و جهت دهی شد، به طور طبیعی خطای اندازه گیری به عنوان خطای زاویه‌ای از جهت صحیح خواهد بود. بنابراین اندازه گیری خطای زاویه‌ای در اینجا مورد استفاده قرار گرفت. در این حالت  $V = (u, v, 1)^T$  نماینده بردار سه بعدی در فضا و به شکل زیر می‌باشد.

$$\vec{V} \equiv \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2 + 1}} (u, v, 1)^T \quad (۱۹)$$

خطای زاویه‌ای بین بردار صحیح  $\vec{V}_e$  و بردار تخمین زده شده  $\vec{V}_c$ ، بصورت زیر می‌باشد.

$$\psi_E = \arccos(\vec{V}_c \cdot \vec{V}_e) \quad (۲۰)$$

خطای اندازه گیری شده به این شیوه مناسب می‌باشد، زیرا سرعت های بزرگ و کوچک را بدون تقویت خطای ذاتی در اندازه گیری بردارهای تفاضلی در نظر می‌گیرد. این روش ممکن است کمی بایاس دار باشد [۱۱]. مثلاً خطای جهت در سرعت های کوچک خطای زاویه‌ای بزرگی به اندازه خطای جهتی در سرعت های بزرگ ایجاد نمی‌کند. جدول (۳) نتایج میانگین و انحراف معیار در خطای زاویه‌ای در تحلیل حرکت سینوسی در روش LSM را نشان می‌دهد.

قرار گرفته است، در ادامه معلوم شد، استخراج جریان نوری بکمک روش کمترین مربعات سلسله مراتبی Lucas and Kanade نتایج بهتری نسبت به روش تناظریابی کمترین مربعات تولید می‌نماید. این روش را می‌توان بر داده‌های مشابه مانند تحلیل حرکت ابر و جابجائی بخار آب نیز مورد استفاده قرار داد. برای درکت بهتر نتایج استخراج شده به کارگیری روش های دیداری و نیز ردیابی الگوهای حرارتی در تصاویر پی‌درپی می‌توان به صحت و دقت روش های پیشنهادی پی برد. به کارگیری تصاویر نمونه حرارتی برای تنظیم پارامترهای الگوریتم و تست این الگوریتم بوده است و این کارایی خود را برای استخراج چنین عوارضی نشان داده است و همان طور که توضیح داده شد با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات جریان سنجی در سطح وسیعی مانند دریای خزر، متخصصین این امر با مشاهده تصویر و ردیابی الگوی حرارتی به جابه جایی‌های سطح آب واقف می‌شوند.

در این مطالعه نشان داد شد، استفاده از تصاویر حرارتی سطح دریا به کمک الگوهای حرارتی به عنوان ردیاب بدنه‌های آبی در دریای خزر در نظر گرفته شده است. جریانات استخراج شده با روش های LSM و HLK انجام شده است. ردیابی نقطه به وسیله تناظریابی سطوح خاکستری، باعث افزایش دقت و اعتماد پذیری روند تناظریابی می‌شود. بنابراین استفاده از روش هرمی برای ردیابی حرکت باعث تاثیراتی مانند (۱) افزایش دقت تناظریابی، (۲) تعریف پیچش تصویر در هر لایه باعث تخمین بهتر نقطه مزدوج در تصویر متناظر می‌شود. (۳) تغییر اندازه پنجره الگو باعث نرم تر شدن جریانات استخراج شده می‌شود. امتیاز دیگر این روش محاسبات سبکتر و آسانتری نسبت به روش تناظریابی کمترین مربعات می‌باشد و دارای نتایج قابل قبول تری می‌باشد. همچنین اعتمادپذیری روش LSM به واسطه ترکیب های مختلف پارامترهای هندسی و رادیومتریکی مورد بررسی

## مراجع

- 1 - Gruen, A. W. (1985). "Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique." *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14, No.3, PP.175-187.
- 2 - Ackermann, F. (1988). "Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in Photogrammetry." *Presented at Thompson Symposium*, Birmingham.
- 3 - Bethel, J. (1997). *Least squares image matching for CE604*, Purdue University.
- 4 - Ackermann, F. (1983). "High Precision Digital Image Correlation." *Proceedings 39th Photogrammetric Week, Institute fur Photogrammetry*, University at Stuttgart, Stuttgart, GER, Heft 9.
- 5 - Horn, B. K. P. and Schunck, B. G. (1981). "Determining optical flow." *Artificial Intelligence*, Vol. 16, No. 1-3, August, PP. 185-203.
- 6 - Barron, J. L., Fleet, D. J. and Beauchemin, S.S. (1994). "Performance of optical flow techniques." *IJCV*, Vol. 12, No. 1, PP. 43-77.
- 7 - Beauchemin, S. S. and Barron, J. L. (1995). *The Computation of Optical Flow*, Department of Computer Science, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B7.
- 8 - Yang, Q., Parvin, B. and Mariano, A. (2000). *Detection of Vortices and Saddle Points in SST Data*, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of Miami.
- 9 - Barron, J. L., Beauchemin, S. S. and Fleet, D. J. (1994). "On optical flow." *AIICSR*, Bratislava, Slovakia PP. 3-14.
- 10 - Lauze, F., Kornprobst, P. and Memin, E. (2000). *A Coarse To Fine Multiscale Approach For Linear Least Squares Optical Flow Estimation*, IT University of Copenhagen, Denmark, INRIA Sophia Antipolis, France, INRIA/IRISA University of Rennes, France.

- 11 - Barron, J. L. and Khurana, M. (2000). *Determining Optical Flow for Large Motions Using Parametric Models in a Hierarchical Framework*, Department. of Computer Science, The University of Western Ontario, London, Ontario, N6A 5B7.
- 12 - Bergen, J. R., Anandan, P., Hanna, K. J. and Hingorani, R. (1992). "Hierarchical model-based motion estimation." *In Proceedings of ECCV*, Santa Margherita, Italy, PP. 237-252. Springer-Verlag.
- 13 - Emery, W. J., Bowen, M., Knewton, B., Baldwin, D. and Shannon, B. (2000). *Merging Infrared Sea Surface Temperature with Satellite Altimetry to map Ocean Currents in two Coastal Domains*, University of Colorado.
- 14 - Laury Miller, *Satellite Altimetry and the NOAA/NESDIS sea-surface height science team*, NOAA/NESDIS, Silver Spring, Maryland.
- 15 - Lynn K. Shay, Thomas M. Cook, Hartmut Peters, Arthur J. Mariano, Robert Weisberg, P. Edgar An, Alexander Soloviev, and Mark Luther, (2002). "Very High-Frequency Radar Mapping of Surface Currents." *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 27, No. 2, PP. 155.

#### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Sea Surface Temperature
- 2 - Least Square Matching
- 3 - Hierarchical Lucas and Kanade
- 4 - Optical Flow
- 5 - Cross-Correlation
- 6 - Resampling
- 7 - Image Warping
- 8 - Advective surface motion
- 9 - Maximum Cross Correlation