

ارائه روشی نوین برای بهبود دقت بازسازی داده حالت پلاریمتری کامل از روی داده حالت پلاریمتری دو دایروی

سارا قدس^۱، سید وهاب شجاع الدینی^{۲*}، یاسر مقصودی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مخابرات سیستم - پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات - سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
s.ghods@irost.ir

^۲ استادیار پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات - سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
shojadini@irost.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ymaghsoudi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۴، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۵)

چکیده

علیرغم این که داده حالت پلاریمتری کامل اطلاعات بسیار خوبی از اهداف زمینی فراهم می آورد، مشکلاتی از قبیل کافی نبودن عرض پوشش‌دهی برای اهداف نظارتی و بالا بودن توان ارسالی، حجم داده، هزینه و پیچیدگی سیستم، پژوهشگران این حوزه را به سمت استفاده از حالت پلاریمتری فشرده سوق داد. در این حالت با سعی بر اینکه اطلاعات دریافتی تا حد ممکن به اطلاعات حالت پلاریمتری کامل نزدیک باشد، مشکلات حالت پلاریمتری کامل مرتفع می‌گردد. با توجه به کاستی‌هایی که در مقالات پیشین برای تبیین روش بازسازی داده کامل از روی داده حالت فشرده دو دایروی وجود دارد، در این مقاله این روش به طور مبسوط تشریح می‌شود و فرضیات مطرح شده در این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد و نقاط ضعف هریک با استفاده از نتایج تجربی روشن خواهد شد. برای بازسازی داده کامل از داده حالت فشرده دو دایروی دو فرضیه تقریبی در نظر گرفته می‌شود که این دو موجب کم شدن دقت بازسازی می‌گردند. با توجه به این که در سال‌های اخیر مقالاتی جهت بهبود بازسازی در نواحی اقیانوسی ارائه شده است، در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی نواحی شهری و مناطق با پوشش گیاهی قرار داده شده است و فرضیه ای ارائه می‌شود که نسبت به فرضیات پیشین دقیقتر بوده و در نتیجه دقت بازسازی را بالا می‌برد. با استفاده از داده‌های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 دقت فرضیات و روش‌های بازسازی آزمایش شده و برتری روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین نشان داده می‌شود.

واژگان کلیدی: رادار با روزه ترکیبی، پلاریمتری حالت کامل، پلاریمتری حالت فشرده، حالت دو دایروی، سنجنده RADARSAT-2.

۱- مقدمه

امروزه تصویر برداری پلاریمتریک با استفاده رادارهای روزنه ترکیبی روشی توسعه یافته برای بدست آوردن اطلاعات سنجش از دور برای سطح زمین می باشد. در حالت تصویر برداری پلاریمتری کامل (FP)^۱ دو موج الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون های متعامد در دو پالس متوالی ارسال می گردند و بازپراکنش هر یک از آنها توسط دو آنتن گیرنده با دو نوع پلاریزاسیون عمود بر هم دریافت می گردد. در این سیستم ها بدلیل ارسال دو موج برای هر هدف، توان ارسالی، فرکانس تکرار پالس و حجم دیتای ذخیره شده دو برابر حالتیست که تنها یک موج ارسال می گردد. همچنین عرض ناحیه پوشش دهی کمتر بوده و پیچیدگی و هزینه سیستم بیشتر می باشد. بنابراین در سال های اخیر پژوهشگران این حوزه به حالت پلاریمتری فشرده (CP)^۲ روی آورده اند [۱-۴]. در حالت پلاریمتری فشرده به جای ارسال دو موج یک موج با پلاریزاسیون خاص فرستاده می شود و در گیرنده نیز دو آنتن با پلاریزاسیون های عمود برهم پاسخ آن را دریافت می کنند. سه کاندیدا برای حالت پلاریمتری فشرده مطرح می باشد که در اولی ارسال بصورت پلاریزاسیون خطی ۴۵ درجه و دریافت به صورت پلاریزاسیون عمودی و افقی می باشد. در دومی ارسال دایروی راستگرد و دریافت دایروی راستگرد و چپگرد می باشد و در سومی ارسال دایروی و دریافت عمودی و افقی می باشد. این سه حالت به ترتیب ۴۵ درجه ($\pi/4$)، دودایروی (DCP)^۳ و ارسال دایروی دریافت خطی (CTRL)^۴ نامیده می شوند. با استفاده از حالت CP مشکلات مربوط به حالت FP مرتفع می شود ولی اطلاعات نسبت به حالت FP کمتر می باشد. هم اکنون ماهواره RISAT-1 مربوط به کشور هند که در سال ۲۰۱۲ پرتاب گردید و همچنین ماهواره ALOS-2 مربوط به کشور ژاپن که در سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد مجهز به سیستم پلاریمتری فشرده راداری هستند. در سالهای اخیر با ظهور پروژه های ماهواره ای نظیر- SAO COM مربوط به کشور آرژانتین، RADARSAT مربوط به کشور کانادا و NISAR مربوط به کشور هند که قرار است

در آن ها از سیستم های پلاریمتریک فشرده استفاده گردد، تجزیه تحلیل و ارائه روش هایی جهت بدست آوردن اطلاعاتی نزدیک به اطلاعات حالت پلاریمتری کامل از داده های پلاریمتری فشرده بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵-۱۲].

در ابتدای مطرح شدن مفهوم پلاریمتری فشرده، Souyris در [۱] با در نظر گرفتن ۲ فرضیه تقریبی، یکی بر مبنای تقارن نسبت به صفحه گذرنده از خط دید رادار و دیگری برون یابی رابطه بین کوهرنس خطی و نسبت پلاریزاسیون متقابل روشی ارائه کرد که با استفاده از آن می توان مولفه های ماتریس کواریانس حالت FP را از روی داده $\pi/4$ بازسازی نمود یا به عبارتی ماتریس شبه تمام پلاریمتریک (PQ)^۵ را از روی داده CP بدست آورد. بازسازی داده PQ از روی داده CP این مزیت را فراهم می نماید که بتوان از روش ها و کاربردهای ارائه شده برای داده FP برای داده های CP نیز استفاده نمود. در [۲] این روش برای داده DCP بسط داده شد. در فرضیه دوم روش Souyris کوهرنس خطی و نسبت پلاریزاسیون متقابل با پارامتر N به یکدیگر مربوط می شوند [۱]. با توجه به این که این فرضیه تقریبی می باشد، نتایج حاصل از آن دارای خطا می باشند و هر چه این فرضیه دقیقتر شود نتایج بازسازی بهبود پیدا می کنند. در [۴] دقت روش Souyris برای کاندیداهای مختلف CP مورد بررسی قرار گرفت و فرضیه مربوط به مقدار N اصلاح گشت و با اصلاح این فرضیه نشان داده شد که دقت بازسازی بالا می رود. در سال های اخیر در مقالات [۱۳ و ۱۴] روش هایی جهت بهبود الگوریتم بازسازی داده FP از روی داده CTRL برای کاربردهای دریایی ارائه شدند که در آن ها نیز با اصلاح مقدار اولیه و رابطه مربوط به N دقت بازسازی برای نواحی اقیانوسی و دریا بیشتر شده است.

با توجه به اینکه مطالعات برای بازسازی داده حالت فشرده DCP، اندک بوده اند و مقاله [۲] دارای اشکالاتی می باشد همچنین حالت DCP در مقاله [۴] نیز به صورت تلویحی اشاره شده است و به صورت کامل تشریح نشده است، در این مقاله روش بدست آوردن داده PQ از روی داده DCP به طور مفصل تشریح می گردد و دقت فرضیات مطرح شده در روش های پیشین برای بدست آوردن داده PQ مورد

^۱ Full polarimetry^۲ Compact Polarimetry^۳ Dual Circular Polarisation^۴ Circular Transmit Linear Receive^۵ Pseudo_Quad

اطلاعات پلاریمتری سیگنال‌های بازتاب شده به صورت ماتریس پراکندگی زیر در گیرنده ثبت می‌شوند [۱۵].

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن S نشان دهنده ضریب پراکندگی می‌باشد که از تصاویر پلاریمتریک استخراج می‌شود و H و V به ترتیب پلاریزاسیون‌های خطی افقی و عمودی را نشان می‌دهند و به طور مثال S_{HV} نمایشگر ضریب پراکندگی مربوط به ارسال موج با پلاریزاسیون افقی و دریافت عمودی می‌باشد. اگر فرستنده و گیرنده بر روی یک سنجنده نصب شده باشند و با فرض محیط با خاصیت متقابل^۱ خواهیم داشت:

$$S_{HV} = S_{VH} \quad (2)$$

به منظور بدست آوردن اطلاعات مربوط به همبستگی بین نقاط مختلف همجوار در تصاویر و بدست آوردن مشخصه‌های آماری مرتبه دوم ماتریس پراکندگی را به صورت برداری تبدیل کرده و با میانگین گیری بر روی نقاط مجاور ماتریس کواریانس تشکیل می‌گردد.

$$k_{FP} = [S_{HH} \quad \sqrt{2} S_{HV} \quad S_{VV}]^T \quad (3)$$

$$C_{FP} = \langle k \cdot k^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} |S_{HH}|^2 & \sqrt{2}(S_{HH} \cdot S_{HV}^*) & S_{HH} \cdot S_{VV}^* \\ \sqrt{2}(S_{HV}^* \cdot S_{HH}) & 2|S_{HV}|^2 & \sqrt{2}(S_{HV} \cdot S_{VV}^*) \\ S_{VV} \cdot S_{HH}^* & \sqrt{2}(S_{VV} \cdot S_{HV}^*) & |S_{VV}|^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

۲-۲- پلاریمتری فشرده در حالت DCP

اگر موجی با پلاریزاسیون دایروی راستگرد ارسال گردد پاسخ اهداف تحت تابش از ضرب ماتریس پراکندگی در بردار جونز یک دایروی راستگرد بدست می‌آیند [۱۵].

$$k_{CTLR} = S \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} - iS_{HV} \quad -iS_{VH} + S_{VV}]^T \quad (5)$$

که در آن $CTLR$ مخفف ارسال دایروی و دریافت خطی خطی می‌باشد. بنابراین برای بدست آوردن بردار هدف برای داده دو دایروی فشرده که موج الکترومغناطیسی با

بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در مقالات [۱۳ و ۱۴] روش‌هایی جهت بالابردن دقت بازسازی داده FP در نواحی اقیانوسی و دریا ارائه شده است، در این پژوهش بر روی بازسازی داده PQ در نواحی شهری و نواحی با پوشش گیاهی تمرکز شده است. با بررسی پارامتر N و نسبت پلاریزاسیون متقابل (R) در این نواحی همبستگی زیادی بین این دو پارامتر مشاهده می‌گردد. اگر همبستگی بین دو پارامتر زیاد باشد می‌توان با استفاده از روش‌های رگرسیون یکی را از روی دیگری با دقت خوبی بدست آورد. بنابراین در این مقاله رابطه بین پارامترهای N و R با استفاده از رگرسیون غیر خطی به روش کمینه کردن مربعات خطا بدست آمده است و نشان داده می‌شود که مدل کسری که در آن صورت و مخرج به صورت چند جمله‌ای درجه ۱ از R هستند مدلی مناسب جهت تخمین پارامتر N می‌باشد. در نتیجه رابطه مربوط به فرضیه N در نواحی شهری و پوشش گیاهی اصلاح می‌گردد. با توجه به بهتر بودن دقت رابطه اصلاح شده نسبت به فرضیات پیشین، انتظار می‌رود که دقت الگوریتم بازسازی داده FP نیز بالا برود که با استفاده از داده‌های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 برتری دقت این روش نسبت به روش‌های پیشین نشان داده خواهد شد.

در این مقاله در بخش ۲ مبانی نظری مورد نیاز برای این پژوهش به صورت اجمالی آورده شده است. روش بدست آوردن داده PQ از روی داده DCP در بخش ۳ به طور مفصل تشریح می‌گردد. در بخش ۴ روش پیشنهادی جهت بازسازی داده FP از روی داده DCP برای نواحی شهری و نواحی با پوشش گیاهی ارائه می‌شود و در بخش ۵ با استفاده از داده‌های مربوط به سنجنده RADARSAT-2 روش‌های پیشین و مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه می‌گردند و برتری دقت مدل پیشنهادی برای بازسازی داده FP نشان داده خواهد شد و بالاخره در بخش ۶ خلاصه‌ای از کارهای انجام گرفته در این مقاله ارائه شده و نتیجه گیری خواهد شد.

۲-۲- مبانی نظری

۲-۱- پلاریمتری حالت کامل

در سیستم‌های راداری سنجش از دور در حالت پلاریمتری کامل، دو پالس الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون متعامد یکی پس از دیگری به اهداف زمینی تابیده شده و

^۱ Reciprocity

^۲ Circular Transmit Linear Receive

پلاریزاسیون دایروی راستگرد ارسال و با دو آنتن با پلاریزاسیون های دایروی راستگرد و چپگرد دریافت می شود، باید پایه های متعامد بردار هدف k_{CTLR} را از افقی-عمودی به راستگرد-چپگرد به صورت زیر تغییر دهیم:

$$k_{DCP} = [S_{RR} \ S_{RL}] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ 1 & i \end{bmatrix} \cdot k_{CTLR} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{2} [S_{HH} - S_{VV} - 2iS_{HV} \ S_{HH} + S_{VV}]^T$$

که در آن R و L به ترتیب پلاریزاسیون های دایروی راستگرد و چپگرد را نشان می دهند. ماتریس کواریانس برای داده دو دایروی فشرده به صورت معادله (۷) تشکیل می گردد.

$$C_{DCP} = \langle k_{DCP} \cdot k_{DCP}^* \rangle = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} - S_{VV}) \cdot (S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})^* \cdot (S_{HH} + S_{VV}) \rangle & \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$+ \frac{1}{4} \begin{bmatrix} \langle 4|S_{HV}|^2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -4\text{Imag}((S_{HH} - S_{VV}) \cdot S_{HV}^*) & -2i(S_{HH} + S_{VV})^* S_{HV} \\ 2i(S_{HH} + S_{VV}) S_{HV}^* & 0 \end{bmatrix}$$

$$C'_{DCP} = \langle k'_{DCP} \cdot k'^*_{DCP} \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{HH}^* \cdot S_{VV} \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \langle |S_{HV}|^2 \rangle & -\langle |S_{HV}|^2 \rangle \\ -\langle |S_{HV}|^2 \rangle & \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$+ \begin{bmatrix} 2\text{Imag}(\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle) & -i(\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle + \langle S_{VV}^* \cdot S_{HV} \rangle) \\ i(\langle S_{HH}^* \cdot S_{HV} \rangle + \langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle) & -2\text{Imag}(\langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle) \end{bmatrix}$$

۳- پیشینه

۳-۱- بازسازی داده PQ از روی داده DCP

در مقاله [۲] که به طور خاص بازسازی داده PQ از روی داده DCP مورد نظر بوده است اشکالاتی وجود دارد^۱ و در مقاله بعدی [۴] که جهت تشریح و بررسی روش های بازسازی برای داده های CP ارائه شده است، بازسازی داده حالت DCP به صورت تلویحی اشاره شده و به طور کامل تشریح نشده است. بنابراین در این بخش روش بازسازی داده PQ از روی داده DCP به طور کامل تبیین خواهد شد. در بخش قبل بردار هدف داده DCP ارائه گردید که در مقالات [۲ و ۴] به درستی ارائه نشده است ولی حالت صحیح آن در مقاله [۱۶] ارائه شده است. برای بدست آوردن داده PQ از روی داده DCP بردار هدف جدیدی را به صورت زیر تعریف می نماییم:

$$k'_{DCP} \triangleq [S_{RR} + S_{RL} \ S_{RL} - S_{RR}]^T \quad (8)$$

$$= [S_{HH} - iS_{HV} \ S_{VV} + iS_{HV}]^T$$

و از روی آن ماتریس کواریانس را مطابق رابطه (۹) تعریف می کنیم.

مساله مورد نظر بدست آوردن ماتریس C_{FP} ازماتریس C'_{DCP} می باشد^۲. ۴ مقدار معلوم وجود دارد: $\hat{C}_{DCP11}$ و $\hat{C}_{DCP22}$ و $\hat{C}_{DCP12}$ که دو مقدار اول حقیقی و سومی مختلط می باشد که شامل مقادیر حقیقی و موهومی می باشد. بدلیل اینکه $\hat{C}_{DCP21}$ مزدوج $\hat{C}_{DCP12}$ می باشد اطلاعات بیشتری بدست نمی دهد.

مجهولات مساله مقادیر حقیقی $\langle |S_{HH}|^2 \rangle$ و $\langle |S_{VV}|^2 \rangle$ و $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ و مقادیر مختلط $\langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle$ و $\langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle$ و $\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle$ می باشند؛ یعنی ۹ مجهول وجود دارد. برای حل مساله با ۴ معلوم و ۹ مجهول لازم است از فرضیاتی برای ساده سازی مساله و کم کردن مجهولات یا افزودن به معادلات استفاده نمود.

۳-۱-۱- مدل Souyris

برای حل مساله فوق فرضیه اول مطرح می شود که فرضیه تقارن حول خط دید رادار می باشد [۱]. در این صورت فرض می شود که ضرایب همفاز و فاز متقابل در ماتریس پراکندگی کاملاً ناهمبسته هستند:

$$\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle = \langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle = 0 \quad (10)$$

^۲ در مقاله [۴] این ماتریس تعریف نشده است ولی روابط بازسازی برای این ماتریس ارائه شده است.

^۱ در مقاله [۲] روابط ۸ و ۱۰ و ۱۳ به ترتیب می بایست به صورت روابط ۷ و ۹ و ۲۱ این مقاله تصحیح گردند.

Souyris با استفاده از درون یابی بین دو حالت فوق مقدار N را برابر ۴ در نظر گرفت و رابطه خطی زیر را پیشنهاد کرد:

$$\frac{\langle |S_{HV}|^2 \rangle}{\langle |S_{VV}|^2 \rangle + \langle |S_{HH}|^2 \rangle} \approx \frac{1 - |\rho|}{4} \quad (17)$$

برای بدست آوردن $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ با استفاده از رابطه فوق، مقادیر اولیه (۱۸) و (۱۹) برای کوهرنس خطی و $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ در نظر گرفته می شود، که برای بدست آوردن مقدار اولیه ρ مقدار اولیه $\langle |S_{HV}|^2 \rangle = 0$ در رابطه (۱۴) در نظر گرفته شده و ρ با استفاده از تعریف (۱۵) تبیین شده است. سپس از روی ρ بدست آمده مقدار $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ از رابطه (۱۷) با قرار دادن مقادیر رابطه (۱۴) بدست آمده است.

$$\rho(0) = \frac{\hat{C}_{DCP12}}{\sqrt{\hat{C}_{DCP11} \cdot \hat{C}_{DCP22}}} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \langle |S_{HV}|^2 \rangle (0) \\ &= \frac{\hat{C}_{DCP11} + \hat{C}_{DCP22}}{2} \cdot \left(\frac{1 - |\rho(0)|}{3 - |\rho(0)|} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

روابط (۲۰) و (۲۱) تکرار می شوند تا به یک مقدار برای $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ همگرا گردند.

$$\begin{aligned} & \rho(i+1) \\ &= \frac{\hat{C}_{DCP12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle (i)}{\sqrt{(\hat{C}_{DCP11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle (i)) \cdot (\hat{C}_{DCP22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle (i))}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \langle |S_{HV}|^2 \rangle (i+1) = \\ & \frac{\hat{C}_{DCP11} + \hat{C}_{DCP22}}{2} \cdot \left(\frac{1 - |\rho(i)|}{3 - |\rho(i)|} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

۳-۱-۲- Nord مدل

Nord در [۴] نشان داد که مدل ارائه شده در رابطه (۱۷) برای مناطقی که مکانیسم پراکندگی در آنها حجمی می باشد مناسبتر است و در حالت کلی از دقت خوبی برخوردار نیست. در حالت کلی رابطه زیر برقرار می باشد [۴]:

$$(1 - |\rho|)(|S_{VV}^2| + |S_{HH}^2|) \leq |S_{HH} - S_{VV}|^2 \quad (22)$$

Nord نشان داد که حداقل برای داده مورد آزمایش آنها می توان از تساوی رابطه فوق با دقت خوبی استفاده کرد.

بنابراین سومین ماتریس در رابطه (۹) برابر صفر در نظر گرفته می شود. برای اینکه چنین فرضی در مساله صدق کند می بایست روابط (۱۱) تا (۱۳) برقرار باشند.

$$|2\text{Imag}(\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle)| \ll \langle |S_{HH}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle \quad (11)$$

$$|2\text{Imag}(\langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle)| \ll \langle |S_{VV}|^2 \rangle + \langle |S_{HV}|^2 \rangle \quad (12)$$

$$|\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle + \langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle| \ll |\langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle - \langle |S_{HV}|^2 \rangle| \quad (13)$$

پس از اعمال فرضیه تقارن حول خط دید رادار می توان ماتریس کواریانس بازسازی شده PQ را با مقایسه رابطه (۴) با رابطه (۹) در حالتی که در هر دو آن ها مقادیر مربوط به $\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle$ و $\langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle$ برابر صفر قرار داده شود به صورت معادله ۱۴ نوشت.

$$(14)$$

$$C_{PQ} = \begin{bmatrix} \hat{C}_{DCP11} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 & \hat{C}_{DCP12} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle \\ 0 & 2|S_{HV}|^2 & 0 \\ \hat{C}_{DCP21} + \langle |S_{HV}|^2 \rangle & 0 & \hat{C}_{DCP22} - \langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix}$$

همان گونه که مشاهده می گردد در رابطه بالا با مشخص شدن مقدار $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ ماتریس شبه حالت کامل بدست خواهد آمد. با در نظر گرفتن فرضیه تقارن تعداد مجهولات به ۵ مجهول $\langle |S_{HH}|^2 \rangle$ و $\langle |S_{HV}|^2 \rangle$ و همچنین ۴ $\langle |S_{VV}|^2 \rangle$ و $\langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle$ کاهش یافت و همچنان ۴ معادله وجود دارد. مساله فوق به یک معادله مستقل دیگر بین مجهولات نیازمند است. برای تامین چنین معادله ای در [۱] رابطه ای بین نسبت شدت مولفه با پلاریزاسیون متقابل به مجموع شدت های مولفه های همپلاریزه و اندازه کوهرنس خطی همپلاریزه، ρ ، پیشنهاد گردید:

$$\rho = \frac{\langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \quad (15)$$

در حالتی که موج دریافتی کاملاً پلاریزه باشد روابط $\langle |S_{HV}|^2 \rangle = 0$ و $|\rho| = 1$ صدق می کنند و در حالتی که موج دریافتی کاملاً غیر پلاریزه باشد، روابط $\langle |S_{VV}|^2 \rangle \approx \langle |S_{HH}|^2 \rangle$ و $|\rho| = 0$ برقرار هستند. بنابراین اگر برای هر نقطه تصویر رابطه (۱۶) را در نظر بگیریم:

$$\frac{|S_{HV}|^2}{|S_{VV}|^2 + |S_{HH}|^2} = \frac{1 - |\rho|}{N} \quad (16)$$

بنابراین فرضیه زیر را پیشنهاد داد:

$$(1 - |\rho|)(|S_{VV}^2| + |S_{HH}^2|) \approx |S_{HH} - S_{VV}|^2. \quad (23)$$

که از آن خواهیم داشت:

$$\frac{|S_{HV}|^2}{|S_{VV}|^2 + |S_{HH}|^2} \approx \frac{1 - |\rho|}{\frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2}} \quad (24)$$

بنابر این در فرضیه Nord مقدار N برابر $\frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2}$ قرار داده شد.

با استفاده از معادله فوق روابط بازسازی به صورت زیر اصلاح می گردند. مقدار دهی اولیه:

$$|S_{HV}|^2(0) = 0 \quad (25)$$

$$\rho(0) = \frac{\hat{C}_{DCP12}}{\sqrt{\hat{C}_{DCP11} \cdot \hat{C}_{DCP22}}} \quad (26)$$

$$N(0)=4 \quad (27)$$

روابط تکرار شونده:

$$|S_{HV}|^2(i+1) = (\hat{C}_{DCP11} + \hat{C}_{DCP22}) \cdot \left(\frac{1 - |\rho(i)|}{N(i) + 2(1 - |\rho(i)|)} \right) \quad (28)$$

$$\rho(i+1) = \frac{\hat{C}_{DCP12} + |S_{HV}|^2(i)}{\sqrt{(\hat{C}_{DCP11} - |S_{HV}|^2(i)) \cdot (\hat{C}_{DCP22} - |S_{HV}|^2(i))}} \quad (29)$$

$$N(i+1) = \frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2(i)}{|S_{HV}|^2(i)}. \quad (30)$$

که رابطه (30) در هر مرحله با استفاده از مقادیر بازسازی شده پارامترها در همان مرحله محاسبه می گردد.

۴- روش پیشنهادی

در سال های اخیر مقالات [۱۳-۱۴] برای بالا بردن دقت بازسازی داه PQ برای نواحی اقیانوس و دریا و کاربردهای مربوط به آن ارائه شده اند که در آنها فرضیات مربوط به مقدار N بهبود یافته و دقت بازسازی را بالا برده است. در این بخش مدلی جهت بالا بردن دقت تخمین پارامتر N برای نواحی شهری و مناطق با پوشش گیاهی به منظور بالا بردن دقت بازسازی داده FP در این نواحی ارائه می شود. نسبت توان مولفه های با پلاریزاسیون مخالف به

توان مولفه های همپلاریزه که در این نوشتار با R نشان داده خواهد شد، در پلاریزاسیون پارامتری مهم می باشد که مکانیسم پراکندگی اهداف را مشخص می نماید و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$R = \frac{|S_{HV}|^2}{|S_{VV}|^2 + |S_{HH}|^2}. \quad (31)$$

در [۱۴] نشان داده شده است که در نواحی اقیانوسی پارامترهای N و R دارای همبستگی زیادی می باشند و با استفاده از این همبستگی رابطه ای نمایی بین این دو پارامتر در نواحی اقیانوسی ارائه شده است. در این پژوهش پس از بررسی مقادیر R و N در نواحی شهری و مناطق با پوشش گیاهی این نتیجه حاصل گشت که در این مناطق همبستگی بین پارامترهای N و R حتی بیشتر از نواحی اقیانوسی می باشد. بنابراین با استفاده از روش های رگرسیون می توان مدل مناسبی جهت تخمین پارامتر N از روی R بدست آورد. برای بدست آوردن مدل مناسب، از رگرسیون غیر خطی به روش کمینه کردن مربعات خطا استفاده شد. در این روش مدل به صورت پارامتریک در نظر گرفته شده و مجموع مربعات خطای مدل به صورت پارامتریک بدست می آید. با صفر قرار دادن مشتقات نسبی مجموع مربعات خطا نسبت به هر کدام از پارامترهای مجهول، دستگاهی به تعداد مجهولات تشکیل می شود که با حل آن پارامترهای مدل به دست خواهند آمد [۱۷]. با توجه به اینکه روش پیشنهادی با استفاده از نتایج تجربی بدست می آید، در قسمت ۵-۳ به صورت مفصل شرح داده شده و نشان داده خواهد شد که مدل مناسب انتخابی به صورت زیر می باشد:

$$N = \frac{-2.76R + 0.9533}{R + 0.0054} \quad (32)$$

برای بدست آوردن داده PQ از روی داده DCP در روابط (۲۵) تا (۳۰) مقدار اولیه $N(0)$ با متوسط N بدست آمده در مناطق شهری و جنگلی که برای داده های مورد بررسی ۲۴ بوده است جایگزین شده و رابطه (۳۴) جایگزین رابطه (۳۰) می گردد. بنابراین خواهیم داشت:

$$N(0)=\bar{N} = 24 \quad (33)$$

$$N(i+1) = \frac{-2.76R(i) + 0.9533}{R(i) + 0.0054} \quad (34)$$

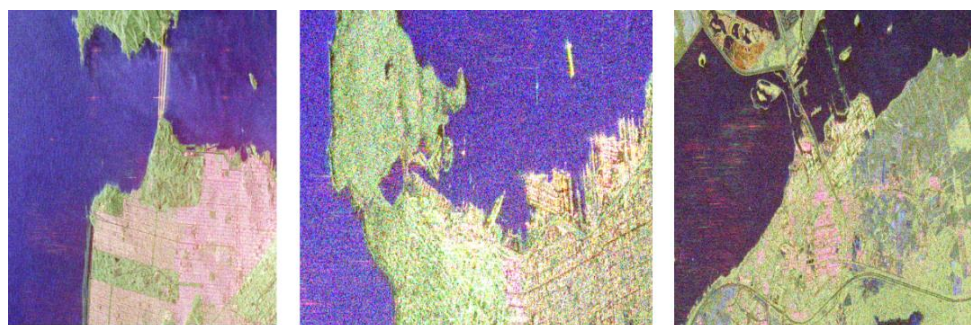
۵- نتایج و بحث

در این بخش داده مورد مطالعه معرفی شده و سپس با استفاده از روابط و روش های مربوط به بازسازی داده FP از روی داده DCP مورد بررسی قرار می گیرد. روش پیشنهادی به صورت تجربی تبیین می گردد و نسبت به روش های پیشین مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۵-۱- داده مورد مطالعه

در این پژوهش از تصاویر مربوط به سنجنده RADARSAT2 در باند C استفاده شده است که در حالت پلاریمتری کامل گرفته شده اند. داده شهر سانفرانسیسکو به دلیل اینکه شامل مکانیسم های مختلف پراکندگی از

جمله شهر، اقیانوس و جنگل می باشد و تعداد نقاط تصویر تا حد مورد نیاز زیاد می باشند، برای بدست آوردن مدلی عمومی مناسب است و در بسیاری از مقالات مرجع از این داده برای گرفتن نتیجه گیری کلی استفاده شده است. با این وجود برای بررسی درستی نتایج از تصاویر مربوط به شهر ونکور و فلوند نیز استفاده شده است. شکل ۱ تصاویر پاولی این داده ها را نشان می دهد. برای داده ها ابتدا ماتریس کوهرنسی با استفاده از نرم افزار POLSARpro_v4.2.0 استخراج گردیده و سپس توسط نرم افزار MATLAB_2009 داده حالت دو دایروی فشرده شبیه سازی شده است. برای شبیه سازیها از میانگین مکانی با طول و عرض ۷ استفاده شده است.



سانفرانسیسکو

ونکور

فلوند

شکل ۱- تصاویر پاولی مربوط به داده های مورد مطالعه

مقادیر میانگین نسبت های فوق بر مبنای تعداد نقاطی که به صورت مکانی میانگین گیری شده اند برای داده سانفرانسیسکو در شکل ۲ نشان داده شده است. همان گونه که از شکل ۲ مشخص است با افزایش تعداد نقاط میانگین مکانی گرفته شده، نسبت های (۳۵) تا (۳۷) کاهش یافته و دقت روابط (۱۱) تا (۱۳) بیشتر می شود. کمترین دقت برای رابطه (۱۳) می باشد که نسبت (۳۷) مربوط به آن در مورد داده سانفرانسیسکو در بهترین حالت به ۰/۲۳ و برای داده های فلوند و ونکور به ۰/۲ رسیده است. بنابراین روابط (۱۱) و (۱۲) که در آنها نسبت مورد نظر از ۰/۱ کمتر شده است قابل قبول می باشند ولی رابطه (۱۳) از دقت خوبی برخوردار نبوده و بازسازی را دچار خطا می نماید.

۵-۲- بررسی فرضیات روش های پیشین

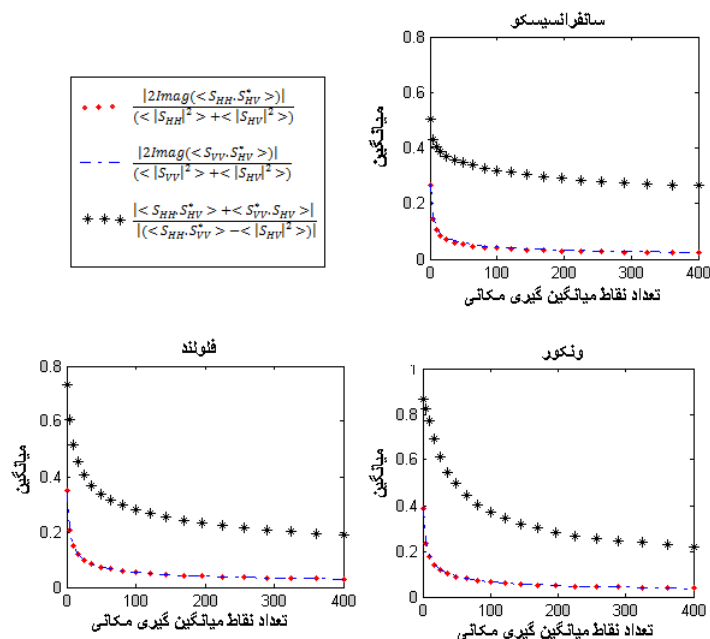
۵-۲-۱- بررسی فرضیه تقارن نسبت به خط دید رادار

برای بررسی درستی فرضیه اول که تقارن حول خط دید رادار می باشد، باید روابط (۱۱) تا (۱۳) مورد بررسی قرار گیرند. بدین منظور نسبت های (۳۵) تا (۳۷) تشکیل داده شده است.

$$\frac{|2\text{Imag}(< S_{HH} \cdot S_{HV}^* >)|}{(< |S_{HH}|^2 > + < |S_{HV}|^2 >)} \quad (35)$$

$$\frac{|2\text{Imag}(< S_{VV} \cdot S_{HV}^* >)|}{(< |S_{VV}|^2 > + < |S_{HV}|^2 >)} \quad (36)$$

$$\frac{|< S_{HH} \cdot S_{HV}^* > + < S_{VV}^* \cdot S_{HV} >|}{|(< S_{HH} \cdot S_{VV}^* > - < |S_{HV}|^2 >)|} \quad (37)$$

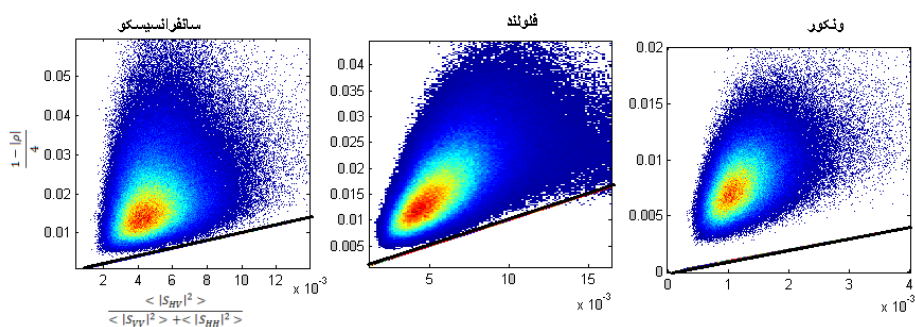


شکل ۲- میانگین نسبتهای مربوط به شرط تقارن حل خط دید رادار برای داده DCP، به ازای تعداد نقاط میانگین گیری شده مکانی

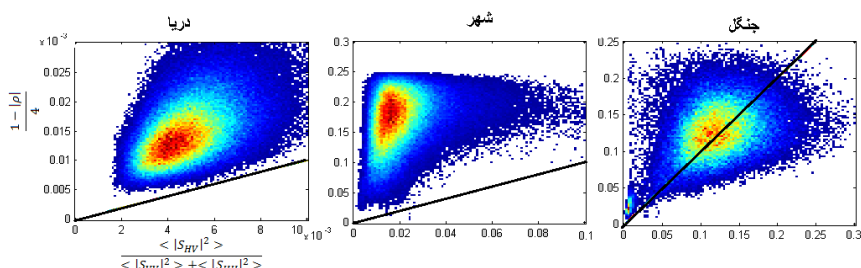
۵-۲-۲- بررسی فرضیه دوم مدل Souyris

تایید می گردد. همان گونه که مشاهده می گردد نقاط نسبت به خط مایل پراکندگی زیادی دارند. شکل ۴ نمودار تجمع نقاط را که به طور مجزا برای قسمتهای جنگل، شهر و اقیانوس داده سانفرانسیسکو تشکیل شده است نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می گردد تنها برای منطقه جنگل نقاط حول خط مایل جمع شده اند هر چند که در این منطقه نیز پراکندگی و انحراف آنها از خط مایل زیاد می باشد. در مقاله [۴] نیز اشاره شده است که این مدل برای مناطق با پراکنش حجمی می تواند مناسب باشد.

برای بررسی درستی فرضیه دوم مدل Souyris دو طرف رابطه (۱۷) بر روی محورهای عمودی و افقی نمایش داده شده و نمودار تجمع نقاط در شکل ۳ ترسیم شده است. در نمودار تجمع نقاط میل کردن طیف رنگی از سمت آبی پر رنگ به سمت قرمز نمایانگر افزایش لگاریتمی تعداد نقاط می باشد. هر چه تجمع نقاط به سمت خط مایل نشان داده شده در شکل که در واقع خط $\frac{\langle |S_{HH}|^2 \rangle}{\langle |S_{VV}|^2 \rangle + \langle |S_{HH}|^2 \rangle} = \frac{1-|p|}{4}$ می باشد بیشتر باشد دقت رابطه پیشنهادی (۱۷) بیشتر



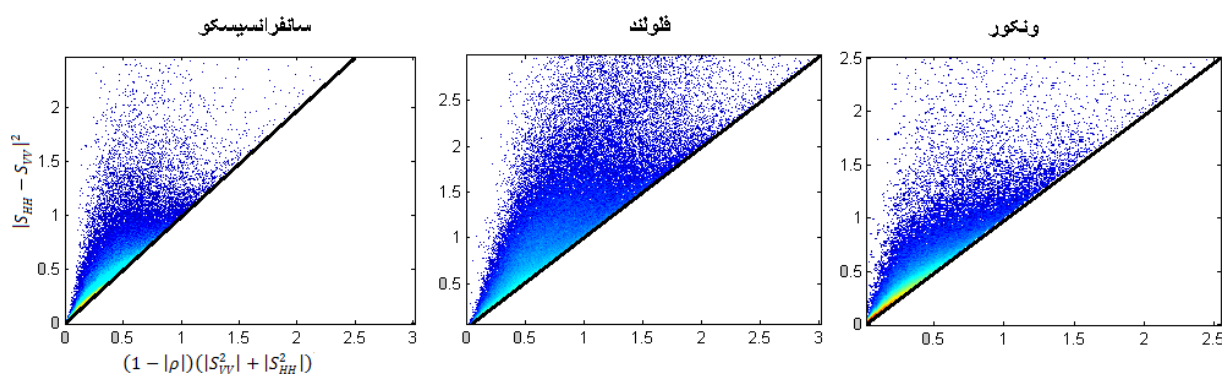
شکل ۳- بررسی دو طرف معادله فرضیه دوم Souyris نسبت به یکدیگر برای داده های مختلف (خط مایل برابری را نشان می دهد).



شکل ۴- بررسی دو طرف معادله فرضیه دوم Souyris نسبت به یکدیگر برای مناطق با مکانیسم های پراکندگی مختلف (خط مایل برابری مقادیر دو محور را نشان می دهد).

۵-۲-۳- بررسی فرضیه دوم مدل Nord

رابطه (۲۳) بیانگر فرضیه Nord می باشد. برای بررسی دقت این فرضیه مشابه روشی که برای بررسی فرضیه Souyris انجام شد، دو طرف رابطه (۲۳) بر روی محورهای عمودی و افقی نشان داده می شود. شکل ۵ نمودارهای تجمع نقاط مربوطه را برای داده های مورد بررسی نشان می دهد. همان گونه که از شکل ۵ استنباط می شود

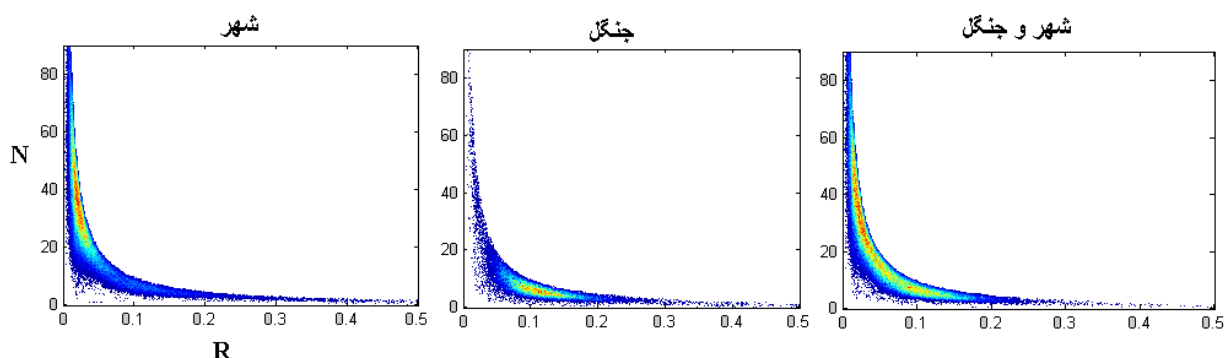


شکل ۵- بررسی دو طرف معادله فرضیه دوم Nord نسبت به یکدیگر برای داده های مختلف (خط مایل برابری را نشان می دهد).

۵-۳- فرضیه پیشنهادی

در شکل ۶ مقادیر پارامتر N نسبت به مقادیر مختلف پارامتر R در محدوده هایی از داده سانفرانسیسکو که مناطق شهری و جنگلی وجود دارند نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می گردد مقادیر N و R همبستگی زیادی دارند و از روی شکل ها می توان حدس زد که مدل های توانی و نسبی می توانند مدل هایی مناسب جهت تخمین مقدار N از روی R باشند.

از رگرسیون غیر خطی به روش کمینه کردن مربعات خطا برای بدست آوردن پارامترهای مدل ها استفاده شده است. همان گونه که در بخش ۴ گفته شد در این روش مدل به صورت پارامتریک در نظر گرفته شده و مجموع



شکل ۶- بررسی روابط همبستگی بین مقادیر R و N برای مناطق شهری و جنگلی داده سانفرانسیسکو

جدول ۱- مقادیر $RMSE$ و R^2 برای مدل های مختلف مناسب با همبستگی بین پارامترهای N و R (برای داده سانفرانسیکو)

نوع مدل	مدل	R^2	$RMSE$
مدل توان	$N = a.R^b$ $a = 1/60.8$ $b = -0.7703$	0.7747	9/025
مدل کسری صورت ثابت و مخرج چند جمله ای درجه ۱	$N = \frac{a}{R+b}$ $a = 0.8272$ $b = 0.04359$	0.7961	7/836
مدل کسری صورت و مخرج چند جمله ای درجه ۱	$N = \frac{a.R+b}{R+c}$ $a = 2/76$ $b = 0.9533$ $c = 0.05484$	0.7987	7/881
مدل کسری صورت چند جمله ای درجه ۱ و مخرج چند جمله ای درجه ۲	$N = \frac{a.R+b}{R^2+c.R+d}$ $a = 8687$ $b = 27870$ $c = 40970$ $d = 85/54$	0.7787	8/946

شوند داده واقعی به صورت تک رنگ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می گردد که مدل پیشنهادی برای هر سه داده مورد بررسی به خوبی تطبیق دارد.

۴-۵- مقایسه روش ها

برای بررسی دقت فرضیات مطرح شده مقدار $RMSE$ مقادیر تخمین زده شده N در روش های پیشین و مدل پیشنهادی نسبت به مقدار واقعی N بدست آمده از داده FP برای داده های مختلف در نواحی مختلف شهری و جنگلی محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲ خطای ایجاد شده در تخمین N با استفاده از روش پیشنهادی کمترین میزان $RMSE$ را ایجاد کرده است. بنابراین دقت فرضیه پیشنهادی نسبت به فرضیه های پیشین بیشتر می باشد.

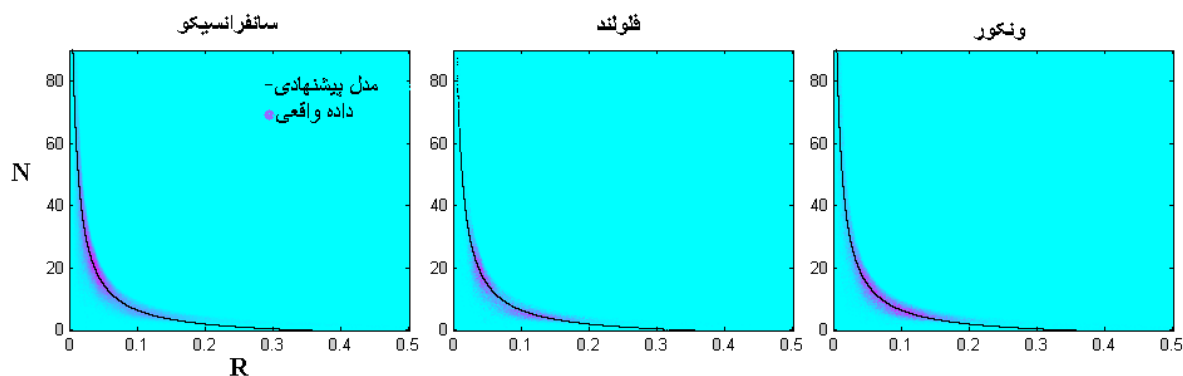
با توجه به اینکه دو مدل کسری صورت ثابت، مخرج درجه ۱ و صورت و مخرج درجه ۱ عملکرد نزدیکی دارند، مقادیر R^2 و $RMSE$ برای چندین محدوده شهر و جنگل دیگر برای داده های مختلف نیز آزمایش شدند و نتایج حاصل شده برتری مدل نسبی $N = \frac{a.R+b}{R+c}$ را از میان مدل های مورد بررسی نشان دادند. ضرایب بدست آمده به صورت زیر می باشند:

$$a = -2/76 \quad (-2/84, -2/68)$$

$$b = 0.9533 \quad (0.9492, 0.9575)$$

$$c = 0.05484 \quad (0.05426, 0.05542)$$

مقادیری که داخل پرانتز آمده است فاصله اطمینان ۹۵٪ هریک از پارامترهای تخمین را نشان می دهد. برای اینکه تطابق این مدل برای داده های دیگر نیز نشان داده شود، شکل ۷ ارائه شده است که در آن بدلیل این که مدل پیشنهادی و داده واقعی از یکدیگر بهتر تشخیص داده



شکل ۷- بررسی تطبیق مدل پیشنهادی با مقادیر واقعی برای داده های مختلف

جدول ۲- مقادیر RMSE پارامتر N تخمین زده شده برای مدل های پیشین و مدل پیشنهادی

RMSE	سانفرانسیسکو شهر	سانفرانسیسکو جنگل	سانفرانسیسکو شهر و جنگل	فلولند شهر و جنگل	ونکور شهر و جنگل
Souyris مدل	۴۱/۵۲	۸/۲۲	۲۷/۷۰	۱۶/۴۳	۲۷/۵۷
Nord مدل	۴۱/۵۱	۵/۳۳	۲۲/۳۲	۹/۴۴	۲۵/۱۳
مدل پیشنهادی	۱۲/۱۸	۲/۹۰	۷/۸۸	۳/۷۰	۸/۳۵

مورد مقایسه قرار گیرند، مقادیر میانگین و انحراف معیار خطای نسبی برای پارامترهای $|S_{HV}|^2$ و $|S_{HH}|^2$ و $|S_{VV}|^2$ میانگین و انحراف معیار مطلق برای $|\rho|$ محاسبه شدند که در جدول ۳ ارائه شده اند. خطای نسبی برای پارامترهای $|S_{HV}|^2$ و $|S_{HH}|^2$ به ترتیب به صورت زیر تعریف می گردند:

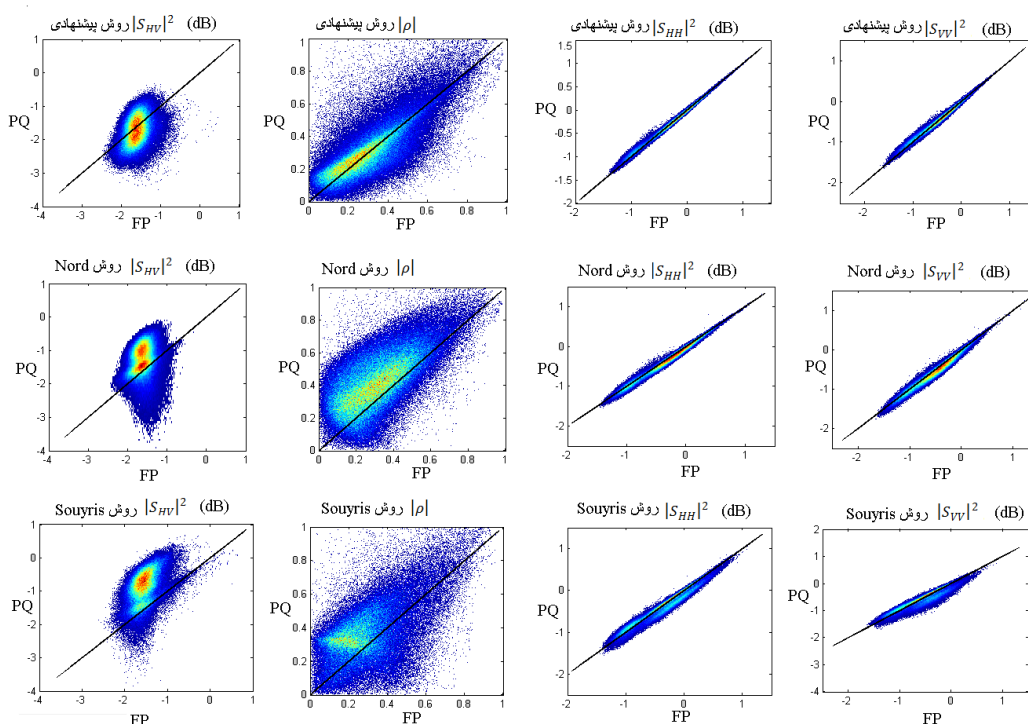
$$(|S_{HV}|^2_{FP} - |S_{HV}|^2_{PQ}) / |S_{HV}|^2_{FP} \quad (40)$$

$$(|S_{HH}|^2_{FP} - |S_{HH}|^2_{PQ}) / |S_{HH}|^2_{FP} \quad (41)$$

$$(|S_{VV}|^2_{FP} - |S_{VV}|^2_{PQ}) / |S_{VV}|^2_{FP} \quad (42)$$

با مقایسه مقادیر بدست آمده در جدول ۳ اینگونه استنباط می شود که عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش Nord و روش Souyris بهتر بوده است. به خصوص برای مولفه های $|S_{HV}|^2$ و $|\rho|$ که بازسازی آنها دچار بیشترین میزان خطا می گردد این برتری مشهود می باشد.

برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای بازسازی داده FP، روش های پیشین و روش پیشنهادی شبیه سازی شدند. به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم های بازسازی، مطابق رویکردی که در مقالات بازسازی استفاده می شود [۱]، [۴] و [۱۴]، نمودارهای تجمع نقاط برای ناحیه ای شامل شهر و جنگل در داده سانفرانسیسکو در شکل ۸ ارائه شده است که در آن محور افقی نشان دهنده مقادیر اصلی مربوط به داده FP و محور عمودی نشان دهنده مقدار بازسازی شده PQ می باشد. نمودارهای تجمع نقاط هر چه بیشتر حول خط قطری متمرکز باشند دقت شبیه سازی بیشتر می باشد. با توجه به شکل مشاهده می گردد که بیشترین مقدار انحراف مربوط به مقادیر $|S_{HV}|^2$ و $|\rho|$ می باشد و مقادیر بازسازی شده در روش پیشنهادی نسبت به دو روش پیشین تطابق بیشتری با داده FP دارند و نقاط حول خط قطری قرار گرفته اند و انحراف و پراکندگی شان نسبت به خط قطری کمتر می باشد. برای اینکه به صورت کمی نیز روش های بازسازی



شکل ۸- نمودارهای تجمع نقاط برای نتایج حاصل از بازسازی از روش های پیشین و روش پیشنهادی، (خط مایل برابری نتایج بازسازی شده را با مقادیر اصلی نشان می دهد).

جدول ۳- میانگین و انحراف معیار خطاهای نسبی برای مقادیر $|S_{HH}|^2$ و $|S_{VV}|^2$ و میانگین و انحراف معیار مطلق برای $|\rho|$ برای روش های بازسازی پیشین و روش پیشنهادی

روش Souyris	روش Nord	روش پیشنهادی	
-۱/۶۶۷۹	-۱/۴۰۴۰	-۰/۰۵۶۷	میانگین خطای نسبی $ S_{HV} ^2$
۴/۳۶۸۹	۱/۵۵۰۸	۰/۹۷۱۴	انحراف معیار خطای نسبی $ S_{HV} ^2$
-۰/۳۴۴۵	-۰/۱۲۰۷	-۰/۰۱۲۶	میانگین خطای $ \rho $
۰/۳۵۲۸	۰/۱۵۹۳	۰/۱۲۳۹	انحراف معیار خطای $ \rho $
۰/۰۴۱۳	۰/۰۴۹۳	۰/۰۳۹۰	میانگین خطای نسبی $ S_{HH} ^2$
۰/۲۲۶۱	۰/۱۷۸۷	۰/۱۷۳۹	انحراف معیار خطای نسبی $ S_{HH} ^2$
۰/۰۶۴۱	۰/۰۷۰۲	۰/۰۵۶۲	میانگین خطای نسبی $ S_{VV} ^2$
۰/۳۲۸۴	۰/۲۴۲۲	۰/۲۳۱۹	انحراف معیار خطای نسبی $ S_{VV} ^2$

۶- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه به کمبودهایی که در مطالعات پیشین در رابطه با چگونگی بازسازی داده FP از روی داده DCP وجود داشت روش های بازسازی این نوع داده شرح داده شد و نقاط ضعف هریک مورد بررسی قرار گرفت. در روش های بازسازی از دو فرضیه تقریبی کمک گرفته می شود تا از تعداد مجهولات کاسته شده و بتوان مساله بازسازی را حل نمود. فرضیه اول تقارن حول خط دید رادار می باشد که در کاستن تعداد مجهولات نقش اصلی را ایفا می کند. نتایج شبیه سازی ها مشخص کرد که این فرضیه، برای داده DCP دارای دقت خوبی نبوده و نسبت رابطه (۳۷) برای پنجره های میانگین گیری با تعداد پیکسل های زیاد در بهترین حالت به ۰/۲ می رسد. دو روش پیشین که هر کدام فرضیاتی برای حل مساله بازسازی در حالت کلی ارائه داده بودند مورد بررسی قرار گرفتند و مشخص گردید که فرضیه Nord نسبت به فرضیه Souyris دارای دقت بیشتری می باشد. با توجه به اینکه در سال های اخیر مقالاتی جهت

بالا بردن دقت بازسازی در مناطق اقیانوسی با مکانیسم پراکندگی سطحی ارائه شده است، در این پژوهش تمرکز بر روی مناطق شهری و جنگلی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی ها همبستگی بالایی بین دو پارامتر N و R در این مناطق نشان داد. بنابراین فرضیه ای جدید پیشنهاد گردید که در آن با استفاده از رگرسیون غیر خطی مدل کسری بین این دو پارامتر بدست آمد. با محاسبه RMSE برای فرضیات مربوط به مدل های پیشین و مدل پیشنهادی مشاهده گردید که مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل پیشین خطای کمتری ایجاد کرده و دارای دقت بهتری می باشد. روش های پیشین و روش پیشنهادی برای بازسازی داده FP شبیه سازی شده و نتایج حاصل از شبیه سازی به صورت کمی و کیفی ارائه شدند (جدول ۳ و شکل ۸) و در هر دو حالت بالاتر بودن دقت روش پیشنهادی مشخص گردید. بنابراین می توان نتیجه گرفت که در مناطق شهری و جنگلی روش پیشنهادی می تواند جایگزینی مناسب برای روش های پیشین جهت بازسازی داده FP باشد.

مراجع

- [1] Souyris, J. C. Imbo, P. F. jortoft, R. Mingot, S. and Lee, J. S. (2005). "Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 3, pp. 634–646.
- [2] Stacy, N. and Preiss, M. (2006). "Compact Polarimetric Analysis of X-Band SAR Data", Proc. EUSAR 2006, 16-18 May, Munich.
- [3] Raney, R.K. (2007). "Hybrid-polarity SAR architecture", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, no. 11, pp. 3397–3404.
- [4] Nord, M. E. Ainsworth, T. L. Lee, J. S. and Stacy, N. J. S. (2009). "Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 1, pp. 174–188.
- [5] Ainsworth, T. Kelly, J. and Lee, J. S. (2009). "Classification comparisons between dual-pol, compact polarimetric and quad-pol SAR imagery," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, no. 5, pp. 464–471.

- [6] Charbonneau, F.J. Brisco, B. Raney, R.K. McNairn, H. Liu, C. Vachon, P.W. Shang, J. DeAbreu, R. Champagne, C. Merzouki, A. and Geldsetzer, T. (2010). "Compact polarimetry overview and applications assessment," *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 36, Suppl. 2, pp. S298–S315.
- [7] Dubois-Fernandez, P. C. Souyris, J. C. Angelliaume, S. and Garestier, F. (2008). "The compact polarimetry alternative for spaceborne SAR at low frequency," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 3208–3222.
- [8] Cloude, S. Goodenough, D. and Chen, H. (2008). "Compact decomposition theory," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 28–32.
- [9] Shirvany, R. Chabert, M. and Tourneret, J. Y. (2012). "Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, no. 3, pp. 885–892.
- [10] Raney, R. K. Cahill, J.T.S. Patterson, G. W. and Bussey, D. B. J. (2012). "The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data," *proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2012)*, Munich, pp. 5093–5096.
- [11] Guo, R. Liu, Y. B. Wu, Y. H. Zhang, S. X. Xing, M. D. and He, W. (2012). "Applying H/ α decomposition to compact polarimetric SAR," *IET Radar Sonar and Navigation*, vol. 6, no. 2, pp. 61–70.
- [12] Zhang, L. Xie, C. Wang, F. Wu, B. Zhang, (Year). "Investigation of the Capability of H- α Decomposition of Compact Polarimetric SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 868 - 872. 2014
- [13] Collins, M. J. Denbina, M. and Atteia, G. (2013). "On the reconstruction of quad-pol SAR data from compact polarimetry data for ocean target detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 51, no. 1, pp. 591–600.
- [14] Li, Y. Zhang, Y. Chen J. and Zhang, H. (2014). "Improved compact polarimetric sar quad-pol reconstruction algorithm for oil spill detection," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 1139-1142.
- [15] Lee, J.S. Pottier, E. (2009). "Polarimetric radar imaging: from basics to applications." CRC Press, Taylor and Francis, London.
- [16] Truong-Loï, M.L. Freeman, A. Dubois-Fernandez P. C. and Pottier, E. (2009). "Estimation of Soil Moisture and Faraday Rotation from Bare Surfaces Using Compact Polarimetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 11, pp. 3608-3615.
- [17] Seber, G.A.F. Wild, C.J. (1989). "Nonlinear Regression." Wiley, New York.