

بررسی عملکرد روش‌های ترکیب سه‌گانه و ترکیب سه‌گانه همبسته در ارزیابی محصولات بارندگی بزرگ-مقیاس در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران

آرش قملاقی، محسن ناصری

دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده: اطلاعات بارش یکی از مهم‌ترین داده‌هایی است که در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک به‌کار می‌رود. در سال‌های اخیر، محصولات بارش بزرگ-مقیاس متعددی توسط محققان توسعه یافته است. در این تحقیق، عملکرد دو روش آماری ترکیب سه‌گانه و ترکیب سه‌گانه همبسته در ارزیابی ۴ محصول بارش CHIRPS، ERA5-Land، MSWEP (V2) و TRMM-3B43 با مقیاس زمانی ماهانه و مقیاس مکانی ۰/۲۵ درجه بررسی شده است. به کمک این روش‌ها می‌توان سه تخمین از یک متغیر را در غیاب مقادیر واقعی (بدون خطا) آن ارزیابی نمود و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا را برای هر تخمین محاسبه کرد. محل مورد مطالعه این تحقیق حوضه آبریز فلات مرکزی، یکی از ۶ حوضه اصلی ایران با وسعت بیش از ۸۰۰ هزار کیلومتر مربع است. به منظور بررسی ارضاء شرایط پیش‌نیاز برای اعمال روش‌های آماری مذکور، از اطلاعات بارش زمینی ۵۸۲ ایستگاه باران‌سنجی واقع در این حوضه استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده، رفتار دو روش در تعیین دقیق‌ترین محصول متفاوت است؛ این در حالی است که هر دو آن‌ها محصول TRMM-3B43 را به عنوان کم‌دقت‌ترین محصول معرفی می‌کنند. همچنین، عموماً مقادیر خطای بدست آمده از روش ترکیب سه‌گانه همبسته نسبت به روش دیگر بزرگ‌تر است.

واژه‌های کلیدی: ترکیب سه‌گانه، ترکیب سه‌گانه همبسته، محصولات بارندگی بزرگ-مقیاس
کد موضوع‌بندی ریاضی (۲۰۱۰): ۱۱M۶۰، ۳۰M۶۰

۱ مقدمه

بارندگی یکی از مهم‌ترین متغیرهایی است که در مطالعات هیدرولوژی و اقلیم نقش ایفا می‌کند (حسین و همکاران، ۲۰۲۱). به‌طور کلی، اطلاعات بارندگی از دو منبع اصلی، یعنی اندازه‌گیری‌های زمینی و محصولات بزرگ-مقیاس، به‌دست می‌آیند.

* نام و آدرس پست الکترونیکی ارائه‌دهنده مقاله: محسن ناصری، mnasseri@ut.ac.ir

محصولات بزرگ-مقیاس خود دارای انواع متنوعی نظیر داده‌های آنالیز مجدد و اطلاعات ماهواره‌ای هستند. لازم به ذکر است که این محصولات بر خلاف اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی، که متداول‌ترین نوع اندازه‌گیری‌های زمینی هستند، دارای پوشش مکانی-زمانی پیوسته هستند. با توجه به اینکه دقت داده‌های بزرگ-مقیاس در بعد مکان متغیر است، برای استفاده از آن‌ها در یک ناحیه جغرافیایی باید دقت آن‌ها را ارزیابی نمود. یکی از روش‌های ارزیابی محصولات بارندگی بزرگ-مقیاس، استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی به عنوان اطلاعات مبنا است و محققین (آقا کوچک و همکاران، ۲۰۱۲؛ لو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ما و همکاران، ۲۰۲۱) از این روش بهره جسته‌اند.

علی‌رغم متداول بودن این رویکرد، در نظر گرفتن اطلاعات زمینی به عنوان اطلاعات مبنا و مقادیر واقعی (عاری از خطا)، الزاما فرض دقیقی نیست. به‌طور مثال، میزان تبخیر بر دقت دستگاه‌های باران‌سنج تأثیرگذار است. به‌علاوه، دقت اندازه‌گیری‌های زمینی بدست آمده از رادارهای هواشناسی در مناطق دارای ناهمواری‌های توپوگرافیک کاهش می‌یابد. هم‌چنین، تراکم محدود و غیر یکنواخت ایستگاه‌های باران‌سنجی در بسیاری از مناطق، یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این رویکرد ارزیابی است (آل‌محمد و همکاران، ۲۰۱۵؛ مساری و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده از روش‌های مبتنی بر ترکیب سه‌گانه برای ارزیابی محصولات بارندگی بزرگ‌مقیاس، رویکرد نسبتاً جدیدی است که برخی از محققین مانند آل‌محمد و همکاران (۲۰۱۵)، مساری و همکاران (۲۰۱۷)؛ تنگ و همکاران (۲۰۱۲)؛ تیم و همکاران (۲۰۲۱) در راستای غلبه بر محدودیت‌های بیان شده به‌کار برده‌اند. به کمک این روش‌ها می‌توان ۳ تخمین مختلف از یک متغیر را در غیاب مقادیر واقعی و عاری از خطا ارزیابی نمود و میزان خطای هر تخمین را نیز محاسبه کرد. در این تحقیق، از دو روش ترکیب سه‌گانه^۱ (TC)، و ترکیب سه‌گانه همبسته^۲ (CTC)، برای ارزیابی ۴ محصول بیشتر مورد توجه CHIRPS، ERA5-Land، MSWEP (V2) و TRMM-3B43 استفاده شده و عملکرد این دو روش با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است که روش دوم بر مبنای روش اول و در راستای کاهش محدودیت‌هایی که به‌صورت پیش‌فرض در توسعه آن مورد توجه بوده، توسعه یافته است و تاکنون عملکرد آن در ارزیابی محصولات بارندگی با روش پایه مقایسه نشده است.

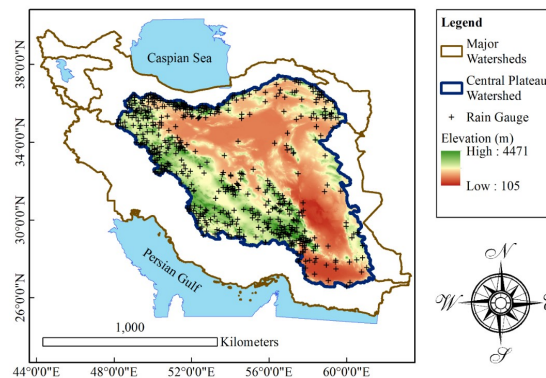
۲ منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه این تحقیق، حوضه آبریز فلات مرکزی ایران است. این حوضه آبریز با وسعت بیش از ۸۰۰ هزار کیلومتر مربع، بزرگترین حوضه ایران است که در شمال و غرب به ترتیب به دامنه‌های رشته کوه‌های البرز و زاگرس محدود می‌شود. هم‌چنین مناطق مرکزی و جنوب شرقی این حوضه به ترتیب دربرگیرنده دشت‌های کویر و لوت هستند. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی این حوضه را به انضمام تغییرات ارتفاعی آن نشان می‌دهد. موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی نیز در این شکل نمایش داده شده است. در این تحقیق از اطلاعات ماهانه بارندگی در ۵۸۲ ایستگاه باران‌سنجی در فاصله سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ استفاده شده است. این اطلاعات توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران جمع‌آوری شده است.

در ادامه به شرح مختصر هر یک از محصولات بارش مورد استفاده در این تحقیق پرداخته می‌شود. محصول CHIRPS (فانک و همکاران، ۲۰۱۵) که توسط مرکز مخاطرات اقلیمی دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا توسعه داده شده است، اطلاعات بارش را با دقت مکانی ۰/۵ درجه و دقت زمانی روزانه بدست می‌دهد. پوشش مکانی این محصول از عرض ۵۰ درجه جنوبی تا ۵۰ درجه شمالی بوده و پوشش زمانی آن از سال ۱۹۸۱ به بعد است. محصول ERA5-Land (هرزباخ و همکاران، ۲۰۲۰) که از نوع محصولات آنالیز مجدد است، اطلاعات بارش را با دقت مکانی ۰/۱ درجه، دقت زمانی ساعتی، پوشش مکانی جهانی، و پوشش زمانی از سال ۱۹۸۱ به بعد بدست می‌دهد. محصول MSWEP

¹ Triple Collocation

² Correlated Triple Collocation



شکل ۱: آبخوان فلات مرکزی و تغییرات ارتفاعی آن به انضمام موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی

(V2) (بک و همکاران، ۲۰۱۹) که توسط محققین آزمایشگاه GLoH2O توسعه داده شده است، نسخه جدیدتر محصول MSWEP (V1) است. این محصول دارای دقت مکانی ۰/۱ درجه و دقت زمانی ۳ ساعته است و اطلاعات جهانی بارش را از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۷ تامین می‌کند. TRMM-3B43 (هافمن و همکاران، ۲۰۰۷) آخرین محصول به کار رفته در این تحقیق است که با همکاری سازمان‌های فضایی آمریکا و ژاپن توسعه داده شده است. این محصول که دقت مکانی ۰/۲۵ درجه دارد، اطلاعات ماهانه بارش را از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۰ بر روی عرض‌های ۵۰ درجه جنوبی تا ۵۰ درجه شمالی تامین می‌کند. در انتخاب این چهار محصول، علاوه بر در نظر گرفتن مسائلی نظیر میزان شناخته شده بودن، به فرآیند توسعه آن‌ها نیز توجه شده است. با توجه به اینکه نسخه‌های متفاوتی از داده‌های TRMM در توسعه محصولات CHIRPS و MSWEP (V2) به کار رفته است، احتمال وجود همبستگی در خطای این محصولات افزایش می‌یابد و این مسئله در به کار بستن روش CTC حائز اهمیت است. در انتها لازم بذکر است که برای ارزیابی این محصولات، از داده‌های با دقت زمانی ماهانه آن‌ها استفاده شده است و شبکه مکانی آن‌ها نیز به یک شبکه واحد با دقت ۰/۲۵ درجه تبدیل شده است.

۳ روش‌شناسی

روش TC، نخستین بار توسط استفلن (۱۹۹۸) و به منظور ارزیابی تخمین‌های مختلف میزان سرعت باد به کار بسته شد. به کمک روش TC، می‌توان سری زمانی سه تخمین از یک متغیر را در غیاب مقادیر واقعی آن مورد ارزیابی قرار داد و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا^۳، (RMSE)، را برای هر تخمین محاسبه کرد. به این منظور، ابتدا باید مقدار خطای هر تخمین را مطابق رابطه خطی

$$Y_i = m_i + n_i\tau + e_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.3)$$

مدل‌سازی کرد که در آن Y_i نشان‌دهنده i امین تخمین، τ بیانگر مقدار واقعی ندانسته (با خطای صفر)، m_i و n_i به ترتیب عرض از مبدا و شیب رابطه خطی و e_i خطای باقیمانده i امین تخمین است. به کار بستن روش TC سه پیش فرض اصلی دارد. اول، امید ریاضی خطای باقیمانده برای هر تخمین باید برابر صفر باشد ($E(e_i) = 0$). دوم، کوواریانس خطای باقیمانده هر تخمین و مقدار واقعی ندانسته باید برابر صفر باشد ($Cov(e_i, \tau) = 0$). سوم، خطای باقیمانده تخمین‌ها باید با یکدیگر متعامد باشند. ($Cov(e_i, e_j) = 0, i \neq j$). لزوم برقراری این مفروضات در ادامه شرح داده می‌شود. پس از

³Root Mean Squared Error

مدل‌سازی خطا در گام اول، باید کوواریانس میان تخمین‌ها را محاسبه نمود:

$$u_{ij} = \text{Cov}(Y_i, Y_j) = n_i n_j \sigma_\tau^2 + n_i \text{Cov}(\tau, e_j) + n_j \text{Cov}(\tau, e_i) + \text{Cov}(e_i, e_j) \quad (2.3)$$

که در آن u_{ij} کوواریانس تخمین‌های i ام و j ام، و σ_τ^2 واریانس مقدار واقعی ندانسته است. با لحاظ کردن پیش‌فرض‌های دوم و سوم، رابطه (۲.۳) ساده می‌شود و به صورت

$$u_{ij} = \text{Cov}(Y_i, Y_j) = \begin{cases} n_i n_j \sigma_\tau^2 & i \neq j \\ n_i^2 \sigma_\tau^2 + \sigma_{e_i}^2 & i = j \end{cases} \quad (3.3)$$

بازنویسی می‌شود که در آن $\sigma(e_i)^2$ واریانس خطای باقیمانده تخمین i ام است. با انجام یک تغییر متغیر و لحاظ کردن $n_i \sigma_\tau$ به عنوان یک متغیر جدید (Φ_i) ، رابطه (۳.۳) ساده‌تر می‌شود و به صورت

$$u_{ij} = \text{Cov}(Y_i, Y_j) = \begin{cases} \varphi_i \varphi_j \sigma_\tau^2 & i \neq j \\ \varphi_i^2 + \sigma_{e_i}^2 & i = j \end{cases} \quad (4.3)$$

درمی‌آید. لازم به ذکر است که هدف از این تغییر متغیر، کاهش تعداد مجهولات است. در نهایت، با حل یک دستگاه ۶ معادله-۶ مجهولی که در آن مقادیر ماتریس کوواریانس (مقادیر u_{ij} به ازای حالات مختلف i و j) معلوم هستند، مقادیر RMSE برای هر تخمین مطابق رابطه (۵.۳) محاسبه می‌شود. به بیانی دقیق‌تر، با لحاظ کردن پیش‌فرض اول روش TC، مقدار RMSE برای هر تخمین برابر با انحراف از معیار خطای باقیمانده آن است.

$$\begin{aligned} \text{RMSE}(Y_1) &= \sigma_{e_1} = (u_{11} - \frac{u_{12}u_{13}}{u_{22}})^{0.5} \\ \text{RMSE}(Y_2) &= \sigma_{e_2} = (u_{22} - \frac{u_{12}u_{23}}{u_{13}})^{0.5} \\ \text{RMSE}(Y_3) &= \sigma_{e_3} = (u_{33} - \frac{u_{13}u_{23}}{u_{12}})^{0.5} \end{aligned} \quad (5.3)$$

از آنجایی که عدم برقراری هم‌زمان هر سه شرط می‌تواند به کاهش دقت نتایج منجر شود و از سویی برقراری هم‌زمان آن‌ها در بسیاری از موارد ممکن نیست، گونزالز و همکاران (۲۰۲۰) به توسعه روش TC در موارد وجود همبستگی در خطای باقیمانده اطلاعات اولیه پرداخته و روش CTC را توسعه دادند. تفاوت اصلی روش CTC و روش TC، در پیش‌فرض سوم آن‌ها است. در روش CTC، خطای باقیمانده ۲ تخمین می‌تواند متعامد نباشند، هر چند تعامد آن‌ها با خطای باقیمانده تخمین سوم ضروریست. با ایجاد این تغییر آزادی عمل بیشتری در انتخاب ورودی‌های مدل (تخمین‌ها) بوجود خواهد آمد. برای اطلاعات بیشتر در ارتباط با روش‌های TC و CTC، خوانندگان به گونزالز و همکاران (۲۰۲۰) ارجاع داده می‌شوند.

۴ نتایج

به منظور تعیین چینش سه‌گانه‌ها، ابتدا به بررسی تعامد خطای باقیمانده محصولات با یکدیگر پرداخته شد. به این منظور، میزان بارش در هر ۵۸۲ ایستگاه به کمک هر محصول استخراج شد و با در نظر گرفتن داده‌های ایستگاهی به عنوان مقادیر مبنا، مقادیر خطای باقیمانده هر محصول محاسبه شد. سپس مقدار کوواریانس خطاهای باقیمانده با یکدیگر بدست آمد. جدول ۱، این مقادیر را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، خطاهای باقیمانده دو محصول CHIRPS و TRMM-3B43 با کوواریانس ۱۶۳/۵۶ میلی‌متر مربع، بیشترین کوواریانس را دارند. با توجه به این مسئله، دو سه‌گانه مختلف جهت ارزیابی محصولات به کمک روش‌های TC و CTC در نظر گرفته شد که به شرح زیر هستند: CHIRPS و TRMM-3B43 I و

جدول ۱: مقادیر کوواریانس خطاهای باقیمانده محصولات با یکدیگر

TRMM-3B43	MSWEP(V2)	ERA5-Land	کوواریانس (میلی متر مربع)
۱۶۳/۵۶	۶۷/۹۱	۱۰۳/۳۵	CHIRPS
۸۸/۹۵	۶۱/۸۲		ERA5-Land
۷۶/۱۵			MSWEP(V2)

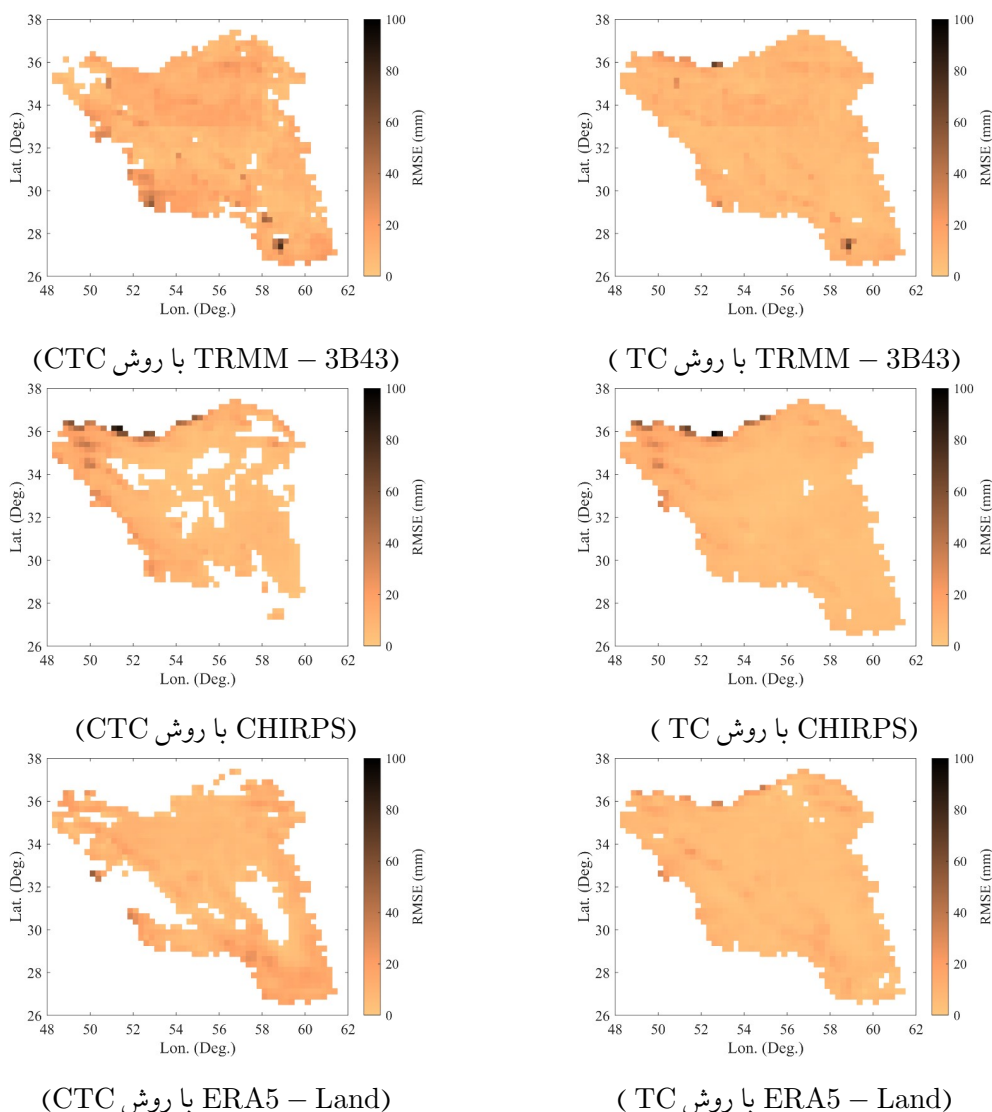
جدول ۲: نتایج به کار بستن روش های TC و CTC را بر روی سه گانه های مذکور نشان می دهد. مطابق این جدول، درصد مقادیر مثبت RMSE در روش TC با میانگین ۹۸/۹ درصد، بیشتر از روش CTC با میانگین ۷۹/۷ درصد است. هم چنین خطای بدست آمده برای محصولات در روش TC (میانگین: ۶/۸۹ میلی متر) کوچک تر از روش CTC (میانگین: ۱۰/۳۳ میلی متر) است. در سه گانه اول، نتایج هر دو

جدول ۲: نتایج ارزیابی محصولات به کمک روش های TC و CTC

ERA5-Land	CHIRPS	TRMM-3B43	داده ها	روش ارزیابی	شماره سه گانه
۹۸/۷	۹۹/۵	۹۹/۱	درصد مقادیر مثبت	TC	I
۶/۲۴	۷/۱۵	۸/۰۲	RMSE (میلی متر)		
۸۰/۴	۷۱/۷	۹۲/۰۸	درصد مقادیر مثبت	CTC	
۹/۵۳	۹/۰۲	۱۱/۳۳	RMSE (میلی متر)		
۹۷/۶	۹۹/۹	۹۸/۷	درصد مقادیر مثبت	TC	II
۵/۲۷	۷/۶۸	۷/۰۰	RMSE (میلی متر)		
۸۰/۴	۶۳/۸	۸۸/۹	درصد مقادیر مثبت	CTC	
۱۰/۱۸	۱۰/۱۷	۱۱/۷۳	RMSE (میلی متر)		

روش حاکی از آن است که محصول TRMM-3B43 بیشترین خطا را داشته است. این در حالی است که روش های TC و CTC به ترتیب محصولات ERA5-Land و CHIRPS را با مقادیر خطای ۶/۲۴ میلی متر و ۹/۰۲ میلی متر دقیق ترین محصول گزارش می کنند. در سه گانه دوم، کم ترین تشابه میان نتایج روش ها به چشم می خورد. روش TC، محصولات (MSWEP(V2)، TRMM-3B43 و CHIRPS را با خطاهای به ترتیب ۵/۲۷ میلی متر، ۷/۰۰ میلی متر و ۷/۶۸ میلی متر دقیق ترین تا ضعیف ترین محصولات گزارش می کند. این در حالی است که روش CTC ترتیب دیگری را ارائه می دهد و محصولات CHIRPS، MSWEP(V2) و TRMM-3B43 را با خطاهای به ترتیب ۱۰/۱۷ میلی متر، ۱۰/۱۸ میلی متر و ۱۱/۷۳ میلی متر دقیق ترین تا ضعیف ترین گزارش می کند. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از هر دو سه گانه می توان به این نتیجه رسید که روش TC، محصولات ERA5-Land و MSWEP(V2) را دقیق تر از سایرین ارزیابی می کند. این روش محصولات CHIRPS و TRMM-3B43 را به ترتیب در جایگاه های سوم و چهارم قرار می دهد. نتایج کلی روش CTC یک تفاوت عمده با روش TC دارد. محصول CHIRPS در این روش نه تنها در جایگاه سوم قرار نمی گیرد، بلکه پیش از محصولات ERA5-Land و MSWEP(V2) رتبه اول را کسب می کند. ذکر این نکته ضروری است که مقادیر خطای گزارش شده در جدول ۲، میانگین خطا بر روی کل حوضه آبریز هستند و برای تحلیل رفتار مکانی محصولات، باید پهنه بندی های مکانی مقادیر خطا را ترسیم نمود. شکل ۲ این پهنه بندی ها را برای محصولات سه گانه اول (برای هر دو روش) به تصویر کشیده است. مطابق این شکل، یکنواخت ترین رفتار مکانی در این سه گانه متعلق به محصول ERA5-Land است. هم چنین، رفتار محصول TRMM-3B43 نیز به غیر از نواحی جنوبی و جنوب غربی نسبتاً یکنواخت است. محصول CHIRPS اما در نواحی شمالی و شمال غربی (مناطق کوهستانی) خطایی زیاد و غیر یکنواخت با سایر مناطق را نشان

می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است، پهنه‌بندی‌های بدست آمده از روش CTC حفره‌های بیشتری دارند. این حفره‌ها نمایانگر پیکسل‌هایی هستند که مقدار RMSE به‌دست آمده برای آن‌ها غیر معتبر (منفی) است.



شکل ۲: توزیع مکانی مقادیر RMSE بدست آمده برای سه‌گانه I

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد دو روش آماری TC و CTC در ارزیابی ۴ محصول بارندگی CHIRPS، ERA5-Land، MSWEP، و (V2) با TRMM-3B43 با مقیاس زمانی ماهانه و مقیاس مکانی ۲۵/۰ درجه بررسی شده است. محل مورد مطالعه این تحقیق حوضه آبریز فلات مرکزی، یکی از ۶ حوضه اصلی ایران با وسعت بیش از ۸۰۰ هزار کیلومتر مربع (حدود نیمی از مساحت کشور)، است. به منظور ارزیابی محصولات مذکور و با در نظر گرفتن مقادیر کوواریانس خطای باقیمانده محصولات با یکدیگر، دو سه‌گانه مختلف ساخته شده است. سه‌گانه اول حاوی محصولات TRMM-3B43، CHIRPS و ERA5-Land است. در این سه‌گانه، هر دو روش محصول اول را کم‌دقت‌ترین محصول ارزیابی کرده‌اند. همچنین، پهنه‌بندی‌های خطای رسم شده برای محصولات این سه‌گانه حاکی از آن هستند که محصول CHIRPS در نواحی شمالی

و شمال غربی حوضه خطای زیادی دارد. سه‌گانه دوم حاوی محصولات TRMM-3B43، CHIRPS و MSWEP(V2) است. در این سه‌گانه، نتایج روش‌های TC و CTC مشابه هم نیستند. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از هر دو سه‌گانه، روش TC، محصولات ERA5-Land و MSWEP(V2) را دقیق‌ترین و محصول TRMM-3B43 را کم‌دقت‌ترین ارزیابی می‌کند. این در حالی است که مطابق با نتایج روش CTC، محصول CHIRPS نه تنها در جایگاه سوم قرار نگرفته، بلکه پیش از محصولات ERA5-Land و MSWEP(V2) رتبه اول را کسب می‌کند. در انتها می‌توان گفت که هر دو روش در ارزیابی عملکرد نسبی تمامی محصولات به غیر از CHIRPS رفتار نسبتاً یکسانی دارند. پیشنهاد می‌شود برای فهم بهتر دلایل اختلاف نتایج و تعیین روش دقیق‌تر، به تحلیل و بررسی مواردی نظیر ارضاء/عدم ارضاء پیش‌فرض‌های اول و دوم روش‌ها، میزان تطابق محصولات با اطلاعات زمینی و بررسی داده‌های مورد استفاده در توسعه هر یک از محصولات پرداخت.

مراجع

- AghaKouchak, A., Mehran, A., Norouzi, H., Behrangi, A., 2012. Systematic and random error components in satellite precipitation data sets. *Geophys. Res. Lett.* 39, L09406. <https://doi.org/10.1029/2012GL051592>
- Alemohammad, S. H., McColl, K. A., Konings, A. G., Entekhabi, D., & Stoffelen, A. (2015), Characterization of Precipitation Product Errors Across the United States Using Multiplicative Triple Collocation, *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**, 3489-3503.
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I., ... and Adler, R. F. (2019), MSWEP V2 Global 3-hourly 0.1 Precipitation: Methodology and Quantitative Assessment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **100**, 473-500.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... and Michaelsen, J. (2015), The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations—a New Environmental Record for Monitoring Extremes, *Scientific Data*, **2**, 1-21.
- González-Gambau, V., Turiel, A., González-Haro, C., Martínez, J., Olmedo, E., Oliva, R., and Martín-Neira, M. (2020), Triple Collocation Analysis for Two Error-Correlated Datasets: Application to L-Band Brightness Temperatures over Land, *Remote Sensing*, **12**, 3381.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... and Thepaut, J. N. (2020), The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... and Stocker, E. F. (2007), The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, **8**, 38-55.
- Hussain, F., Nabi, G., and Wu, R. S. (2021), Spatiotemporal Rainfall Distribution of Soan River Basin, Pothwar Region, Pakistan, *Advances in Meteorology*, 2021.

Lu, X., Wei, M., Tang, G., and Zhang, Y. (2018), Evaluation and correction of the TRMM 3B43V7 and GPM 3IMERGM satellite precipitation products by use of ground-based data over Xinjiang, China, *Environmental Earth Sciences*, **77**, 1-18.

Ma, Q., Li, Y., Feng, H., Yu, Q., Zou, Y., Liu, F., and Pulatov, B. (2021), Performance Evaluation and Correction of Precipitation Data Using the 20-year IMERG and TMPA Precipitation Products in Diverse Subregions of China, *Atmospheric Research*, **249**, 105304.

Massari, C., Crow, W., and Brocca, L. (2017), An Assessment of the Performance of Global Rainfall Estimates Without Ground-Based Observations, *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**, 4347-4361

Stoffelen, A. (1998), Error Modeling and Calibration; Towards the True Surface Wind Speed. *J. Geophys. Res.*, **103**, 7755-7766.

Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., and Hong, Y. (2020), Have Satellite Precipitation Products Improved Over Last two Decades, A Comprehensive comparison of GPM IMERG with Nine Satellite and Reanalysis Datasets, *Remote Sensing of Environment*, **240**, 111697.

Tanim, A. H., Mullick, M. R. A., and Sikdar, M. S. (2021), Evaluation of Spatial Rainfall Products in Sparsely Gauged Region Using Copula Uncertainty Modeling with Triple Collocation, *Journal of Hydrologic Engineering*, **26**, 04021004.