

## بهبود پیش‌بینی یقینی بارش با استفاده از میانگین وزنی سامانه همادی بر روی ایران

مأده فتحی<sup>۱</sup>، مجید آزادی<sup>۲\*</sup>، غلامعلی کمالی<sup>۳</sup>، امیرحسین مشکوتی<sup>۴</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- پژوهشکده هواشناسی، تهران، ایران،

۳- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۴- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۱۶، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۲۶)

### چکیده

نتایج حاصل از توسعه یک سامانه پیش‌بینی همادی برای مدل WRF برای پیش‌بینی بارش روی ایران در تحقیق حاضر ارائه می‌شود. سامانه همادی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، از اجرای مدل WRF با نه پیکره بندی فیزیکی متفاوت تشکیل شده است. در این مقاله، روش میانگین وزنی (ENSWM) برای بهبود پیش‌بینی های بارش ۲۴ ساعته در پاییز و زمستان ۱۳۹۰ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این روش، وزن برای هر عضو سامانه همادی در هر نقطه شبکه بر اساس ضریب همبستگی بین اعضای سامانه همادی و بارش دیدبانی در طول دوره آموزشی تعیین می‌شود. به غیر از روش (ENSWM)، پیش‌بینی بارش با استفاده از میانگین ساده سامانه همادی (ENSM) نیز تولید شده است. پیش‌بینی ۲۴ ساعته بارش با استفاده از میانگین خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و آنومالی ضریب همبستگی (ACC) و همچنین شاخص‌های TS و POD در آستانه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش ENSWM نتایج بهتری نسبت به هر یک از اعضای سامانه همادی و همچنین پیش‌بینی به روش ENSM در ایران ارائه می‌دهد، بطوریکه ضریب همبستگی بهبود قابل توجهی داشته است، بطوریکه در روش ENSWM نسبت به ENSM ۱۵ درصد بهبود یافته است و مقدار RMSE ۵ درصد کاهش یافته است. پس نتایج مزیت استفاده از سامانه همادی در مقایسه با پیش‌بینی منفرد برای پیش‌بینی بارش در کشور بخصوص برای کارهای عملیاتی را به وضوح نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** پیش‌بینی عددی وضع هوا، سامانه همادی، میانگین سامانه همادی، میانگین وزنی سامانه همادی، مدل WRF

### مقدمه

در مدل‌ها، توپوگرافی پیچیده سطح زمین ساده‌سازی می‌شود و بعضی از خطاها از این عامل موثر ناشی می‌شوند. در نتیجه برونداد مدل‌های عددی همواره با خطای سامانمند و تصادفی همراه است. بارش از جمله کمیت‌هایی است که پیش‌بینی آن از لحاظ تعیین منطقه و شدت آن شامل خطاهای ذکر شده می‌باشد. ابشتاین (۱۹۶۹) و لیت (۱۹۷۴) با هدف بهبود دادن پیش‌بینی‌ها، پیشنهاد دادند که به جای اینکه فقط یک پیش‌بینی قطعی داشته باشیم از مجموعه ای از پیش‌بینی‌ها استفاده شود که در واقع این روش پیش‌بینی، پیش‌بینی همادی نام دارد [۲، ۱]. روش‌های متعددی برای ساختن اعضای یک سامانه همادی وجود دارد از جمله ایجاد

پیش‌بینی وضع هوا از دیرباز اهمیت فوق‌العاده‌ای داشته است. مسائل مربوط به خشکسالی، آب‌شناسی، کشاورزی و پیش‌بینی سیل‌ها از کلیدی‌ترین مسائل جوی به شمار می‌آیند، از این رو پیش‌بینی دقیق بارش اهمیت بسزایی دارد.

اساس مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا حل معادلات ترمودینامیک و دینامیک ساده شده با استفاده از روش‌های عددی مختلف می‌باشد. به دلیل ساختار پیچیده و آشوبناک جو، معادلات حاکم بر آن بسیار پیچیده است و حل دقیق آن میسر نیست. از طرفی

باعث بهبود پیش‌بینی شد. میترا<sup>۶</sup> و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۱ برای باران‌های مونسونی ۲۰۰۹ پیش‌بینی به روش MME انجام دادند. مهارت پیش‌بینی به دست آمده با استفاده از روش MME بهتر از مهارت میانگین ساده و پیش‌بینی مدل‌های قطعی است. ریچاردسون<sup>۷</sup> [۷] در سال ۲۰۰۱ برای تولید پیش‌بینی یقینی و پیش‌بینی احتمالاتی از روش MME استفاده کرد، و نتایج نشان داد که میانگین ساده پیش‌بینی‌های مفیدی را تولید می‌کند.

در این مطالعه، یک سامانه همادی با استفاده از پیکربندی مختلف مدل WRF تشکیل شده است، که از ۹ پیکربندی متفاوت مدل از جمله پارامترهای فیزیکی لایه مرزی سیاره‌ای، لایه سطحی و سطح زمین استفاده شده است. برای هر یک از اعضای سامانه، پیش‌بینی بارش ۲۴ ساعته در یک شبکه با تفکیک ۰/۱ در ۰/۱ درجه را استخراج شده است. از آنجایی که داده‌های دیدبانی را در ایستگاه-های هواشناسی داریم و برای درستی سنجی نتایج به داده دیدبانی در همان نقاط شبکه نیاز داریم در نتیجه داده‌های ایستگاه دیدبانی را با روش درون‌یابی GIDS به داده‌های شبکه‌ای منظم با همان تفکیک ۰/۱ در ۰/۱ درجه تبدیل کردیم [۸]، با استفاده از ضریب همبستگی وزن هر یک از اعضای همادی محاسبه شده و میانگین وزنی آنها در طول دوره آزمون با هر یک از اعضای سامانه و میانگین گیری بدون وزن (ENSM<sup>۸</sup>) مقایسه شده است، که بهبود قابل توجهی داشته‌ایم. در ادامه با استفاده از ضریب همبستگی، میانگین وزنی (ENSWM<sup>۹</sup>) گرفته شده که این روش منجر به کاهش RMSE در مقایسه با اعضای سامانه و میانگین گیری بدون وزن شد.

#### ۲- روش تحقیق

برای تولید پیش‌بینی کالیبره شده از روش ENSWM استفاده شده است. در این روش وزن هر یک از اعضای سامانه با استفاده از ضریب همبستگی بین پیش‌بینی‌های اعضای سامانه و دیدبانی

پیش‌بینی در شرایط آغازین، ایجاد پیش‌بینی در پیکربندی و ایجاد پیش‌بینی در شرایط مرزی مدل عددی. در این مطالعه برای ایجاد سامانه همادی از روش پیش‌بینی در پیکربندی مدل استفاده شده است. اگرچه پیش‌بینی‌های همادی مفید هستند و اطلاعات زیادتری نسبت به پیش‌بینی منفرد ارائه می‌دهند، اما هدف اصلی پیش‌بینی همادی حذف گروهی خطاهای چند مدل است. ساده‌ترین روش پیش‌بینی همادی روش متوسط‌گیری بدون وزن می‌باشد، در این روش مولفه‌های غیر قطعی پیش‌بینی‌های منفرد با متوسط‌گیری از آن‌ها خارج می‌شود (کریشنا مورتی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۰) [۳]. اشکال اصلی روش میانگین‌گیری ساده تعیین یک وزن برای هر مدل است و ممکن است که چندین مدل ضعیف وجود داشته باشد و میانگین این‌ها نتیجه نهایی را تضعیف کند. برای رفع این مشکل سامانه همادی، کریشنامورتی و همکاران (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰) روش MME<sup>۲</sup> را معرفی کردند که این روش پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی نشان داد. در این روش وزن هر مدل بر اساس عملکرد فضایی و زمانی آن مدل اختصاص داده می‌شود. استراتژی روش MME شامل دو مرحله است، دوره آموزش و دوره پیش‌بینی. در مرحله اول با استفاده از مدل‌های مختلف استفاده شده در روش MME و داده‌های دیدبانی وزن هر یک از مدل‌ها مشخص می‌شود و در مرحله بعد با استفاده از پیش‌بینی‌های مدل‌های مختلف و آمارهای مرحله اول پیش‌بینی‌های MME صادر می‌شود. روی بومیک<sup>۳</sup> و دورای<sup>۴</sup> [۴] در سال ۲۰۱۰ از روش ضریب همبستگی (CC<sup>۵</sup>) برای پیدا کردن وزن برای مدل عضو استفاده کرده و سپس یک پیش‌بینی MME ارائه دادند. در سال ۲۰۱۲ روی بومیک و همکاران [۵]، برای پیش‌بینی بارش به روش MME در منطقه هند از روش میانگین‌گیری وزنی با استفاده از ضریب همبستگی استفاده کردند، که در نتیجه

<sup>6</sup> Mitra

<sup>7</sup> Richardson

<sup>۸</sup> Ensemble Mean

<sup>۹</sup> Ensemble weighted Mean

<sup>1</sup> Krishnamurti

<sup>۲</sup> Multimodel ensemble

<sup>3</sup> Roy Bhowmik

<sup>4</sup> Durai

<sup>5</sup> Correlation Coefficient

۳- داده و منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، داده های پیش بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته با استفاده از مدل WRF<sup>۶</sup> بدست آمده است. زمان شروع اجرای مدل UTC ۱۲ در طول دوره از ۱ سپتامبر ۲۰۱۱ تا ۲۶ فوریه ۲۰۱۲ است. برای شرایط مرزی و اولیه مدل ها از داده های جهانی GFS<sup>۷</sup> با تفکیک یک درجه استفاده شده است. مدل WRF با دو حوزه اجرا می شود. حوزه بزرگ دارای تفکیک افقی ۴۵ کیلومتر می باشد و محدوده ۵۱-۱۰ درجه شمالی و ۸۰-۲۰ درجه شرقی (منطقه خاورمیانه) را می پوشاند و حوزه کوچک دارای تفکیک افقی ۱۵ کیلومتر می باشد و محدوده ۴۱-۲۳ درجه شمالی و ۶۵-۴۲ درجه شرقی (کشور ایران) را می پوشاند. پیش بینی های مدل به یک شبکه منظم با تفکیک ۰/۱ درجه درونیابی شده است.

داده های مشاهداتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می گیرند، شامل داده های مشاهداتی بارش تجمعی است که در ساعت UTC ۰۶ اندازه گیری شده اند. به منظور مقایسه پیش بینی بارش با داده های دیدبانی مربوطه، بارش تجمعی ۲۴ ساعته بر روی یک شبکه منظم به روش GIDS درونیابی شده است. برای ارزیابی عملکرد ENSWM، داده ها به دو دوره آموزش و آزمون تقسیم می شوند. دوره آموزش از اول سپتامبر تا ۳۰ نوامبر ۲۰۱۱ در نظر گرفته شده است و دوره آزمون شامل روزهای بین ۱ دسامبر ۲۰۱۱ و ۲۶ فوریه ۲۰۱۲ است. سامانه همادی مورد استفاده در شامل ۹ عضو است که از طرحواره های فیزیکی مختلف مدل WRF بدست آمده است.

#### ۴- نتایج

برای ارزیابی پیش بینی از روش های راستی آزمایی نظیر TS و PC و همچنین RMSE، MAE و ACC استفاده شده است. الگوی

متناظرشان در دوره آموزش بدست می آید [۹]. پیش بینی به روش ENSM از رابطه (۱) بدست می آید.

ENSM

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} F_k \quad (1)$$

که  $F_k$  عضو  $k$ ام سامانه همادی و  $N$  تعداد کل اعضای سامانه می باشد.

تعداد نقاط در شبکه منظم ذکر شده  $۱۸۰ \times ۲۳۰$  است. از اینرو پیش بینی ENSWM تولید شده برای هر عضو  $K$  سامانه بر روی همه نقاط شبکه  $(i, j)$  با استفاده از رابطه (۲) بدست می آید.

$$ENSMW = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} W_{ij,k} F_{i,j,k} \quad i = 1, 2, \dots, 230; \quad j = 1, 2, \dots, 180 \quad (2)$$

که  $W_{ij,k}$  وزن  $k$ امین عضو سامانه همادی برای هر نقطه شبکه  $(i, j)$  است. وزن هر عضو از رابطه (۳) بدست می آید.

$$W_{i,j,k} = \frac{C_{i,j,k}}{\sum_{k=1}^N C_{i,j,k}} \quad (3)$$

که  $C_{i,j,k}$  ضریب همبستگی بین دیدبانی و پیش بینی بارش برای نقطه شبکه  $(i, j)$  عضو  $k$ ام سامانه همادی است. برای هر عضو سامانه همادی، پیش بینی ۲۴ ساعته بارش تجمعی برای نقاط شبکه ای منظم ۰/۱ درجه بر روی ایران بدست آمده است. علاوه بر این داده های دیدبانی ایستگاه های سینوپتیکی بر روی نقاط شبکه ذکر شده به روش GIDS درونیابی شده است.

برای مقایسه داده های بارش روزانه تحلیل بر روی شبکه منظم با روش ENSM، ENSWM و اعضای سامانه همادی میانگین مجذور مربعات خطا ( $RMSE^2$ ) و بی هنجاری ضریب همبستگی ( $ACC^3$ ) محاسبه شده است. همچنین برای درستی سنجی پیش بینی بارش در آستانه های مختلف سنجه های  $TS^4$  و  $HR^5$  محاسبه شده است.

<sup>۵</sup> Hit Rate

<sup>۶</sup> Weather Research and Forecasting

<sup>۷</sup> Global Forecast System

<sup>۱</sup> Gradient plus Inverse-Distance-Squared

<sup>۲</sup> Root-Mean-Square Error

<sup>۳</sup> Anomaly Correlation Coefficient

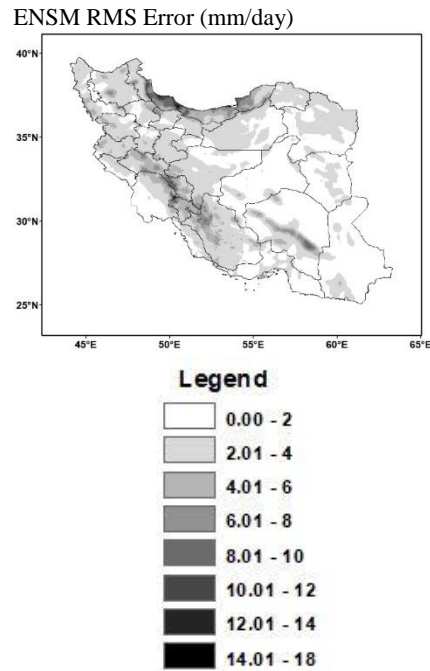
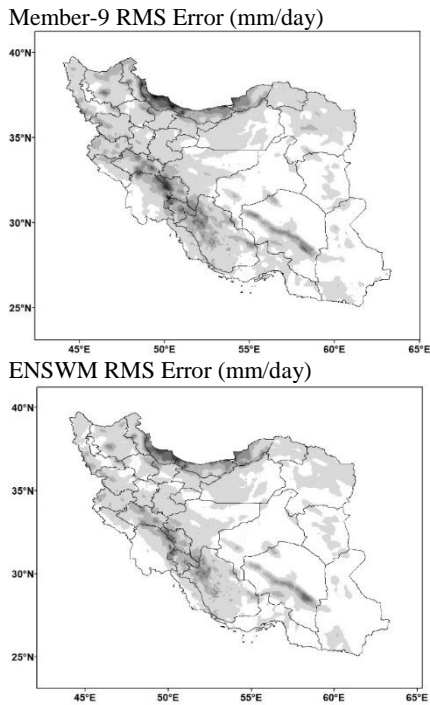
<sup>۴</sup> Threat Score

مرکزی در استان کرمان مقدار خطا بین ۴ تا ۸ است که این مقدار خطا به علت وجود رشته کوه هراز در آن منطقه است. همچنین خطای قابل توجهی در نزدیکی دریاچه ارومیه با مقدار ۲ تا ۶ وجود دارد که این خطا وابسته به رشته کوه سهند می باشد. در ناحیه شمالی کشور نیز مقدار خطا زیاد می باشد که در روش ENSWM مقدار خطا ۸ تا ۱۲ میلی متر کاهش یافته است. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می شود، مقدار خطا در روش ENSWM در مقایسه با اعضای سامانه همادی و همچنین ENSM کمتر است و این نشان دهنده بهبود پیش بینی پس از پس پردازش می باشد.

فضایی RMSE پیش بینی بارش ۲۴ ساعته در دوره مورد نظر (۱ دسامبر ۲۰۱۱ تا ۲۶ فوریه ۲۰۱۲) بدست آمده است.

#### ۴-۱- میانگین مجذور مربعات خطا

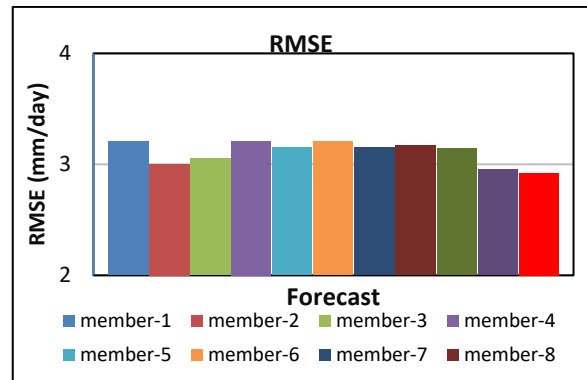
الگوی فضایی RMSE برای یک عضو سامانه همادی، ENSM و ENSWM در دوره مورد نظر (۱ دسامبر ۲۰۱۱ تا ۲۶ فوریه ۲۰۱۲) در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که RMSE الگویی مشابه با الگوی بارش در ایران دارد. در مناطقی که بیشترین مقدار باران داریم، بیشترین خطا را نیز شامل شده است. در همه اعضای سامانه همادی بیشترین خطا در ناحیه زاگرس با مقداری در بازه ۸ تا ۱۸ است، اما پس از انجام پس پردازش این خطا به ۴ تا ۱۰ در روش ENSWM کاهش یافته است. در ناحیه



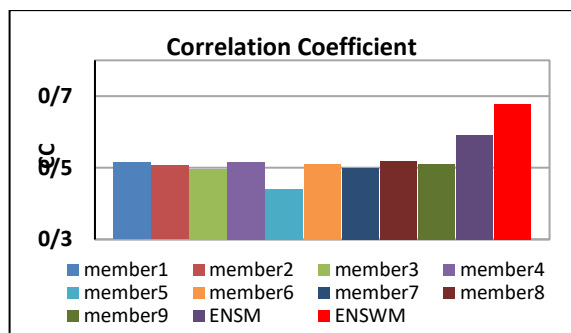
شکل ۱: توزیع RMSE (میلی تر/روز) در یک عضو سامانه همادی، ENSM و ENSWM

#### ۴-۲- ضریب همبستگی

ضریب همبستگی بین پیش بینی بارش ۲۴ ساعته و داده های دیدبانی در زمستان ۲۰۱۱-۲۰۱۲ محاسبه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار ضریب همبستگی در روش ENSWM و ENSM نسبت به اعضای سامانه همادی بیشتر بوده و مقدار ضریب همبستگی در روش ENSWM نسبت به روش ENSM ۱۵ درصد افزایش یافته است.



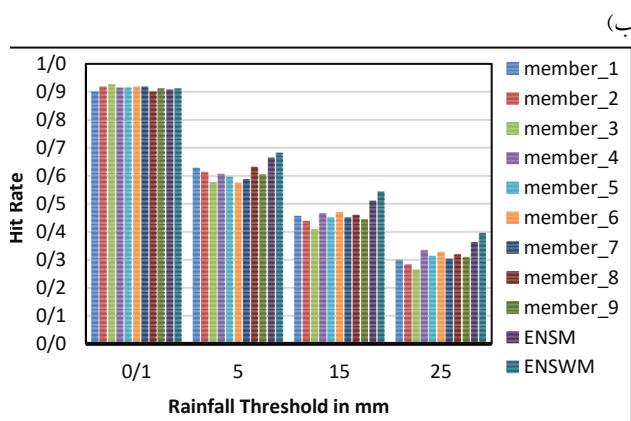
شکل ۲: مقدار RMSE برای اعضای سامانه همادی، ENSM و ENSWM



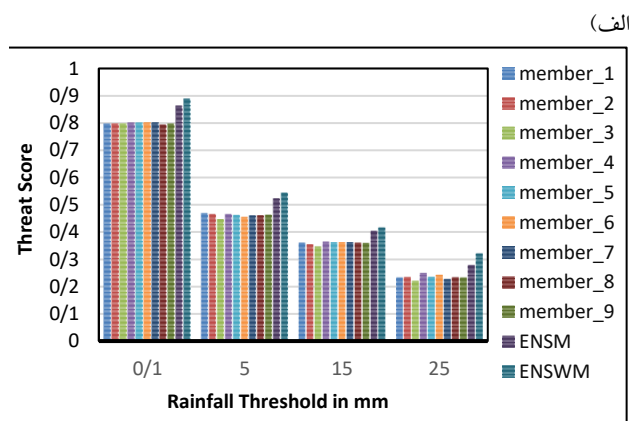
شکل ۳: ضریب همبستگی برای اعضای سامانه همادی، ENSM و ENSWM

۳-۴- POD و TS در پیش بینی بارش در آستانه های مختلف برای درستی سنجی پیش بینی بارش در آستانه های مختلف از دو روش HR و TS استفاده شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل در چهار آستانه مختلف ۰/۱، ۵، ۱۵ و ۲۵ این کمیت ها اندازه گیری شده است. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. هرچه مقدار TS بیشتر باشد، پیش بینی کاملتر است، به طوری که اگر TS برابر یک باشد، به این معنی است که پیش بینی کامل است. شکل ۴ (الف) نشان می دهد که با افزایش مقدار آستانه ها، TS کاهش یافته است. علاوه بر این، مقدار TS در روش ENSM و ENSWM در همه آستانه ها در مقایسه با اعضای سامانه همادی مقدار بیشتری دارد. سنججه دیگر درستی سنجی HR است که نسبت پیش بینی های صحیح به کل دیدبانی ها را نشان می دهد. HR برای آستانه های بارش ۰/۱، ۵، ۱۵ و ۲۵ پیش بینی ۲۴ ساعته در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است. مقدار HR در ENSM و ENSWM در مقایسه با اعضای سامانه همادی در همه آستانه ها بیشتر است.

بی هنجاری ضریب همبستگی که همبستگی بین دیدبانی و پیش بینی را نشان می دهد، یک روش موثر برای درستی سنجی پیش بینی می باشد. اگر الگوی بارش مشاهداتی و پیش بینی کاملاً یکسان باشد که بهترین حالت را دارد، مقدار ACC برابر یک است. برای محاسبه بی هنجاری همبستگی از داده های مشاهداتی اقلیمی ۱۵ ساله باز تحلیل ERA-Interim استفاده شده است. بی هنجاری بین داده های مشاهداتی و پیش بینی ۲۴ ساعته بارش محاسبه شده است. مقدار ACC پس از انجام پس پردازش در روش ENSM و ENSWM افزایش یافته است. در اکثر مناطق کشور مقدار ACC اعضای سامانه همادی بین ۰/۴ و ۰/۸ است، بجز مناطقی در مرکز، جنوب شرق و منطقه کوچکی در شمال غرب کشور که مقدار ACC بین ۰/۱ تا ۰/۳ است. مقایسه بین روش ENSM با سایر اعضای سامانه همادی و روش ENSM نشان می دهد که مقدار ACC پس از انجام عملیات آماری افزایش یافته است. در روش ENSWM در مرکز کشور، جنوب شرق و شمال غرب مقدار ACC بین ۰/۳ تا ۰/۵ و در دیگر مناطق کشور ۰/۷ تا ۱ می باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۴: (الف) TS (ب) HR برای پیش بینی بارش ۲۴ ساعته اعضای سامانه همادی، ENSM و ENSWM در زمستان ۲۰۱۱-۲۰۱۲ در کشور

## مراجع

- 6- Mitra, AK., Iyengar, GR., Durai, VR., Sanjay, J., Krishnamurti, TN., Mishra, A., Sikka DR., 2011: Experimental Real-Time Multi-Model Ensemble (MME) prediction of rainfall during monsoon 2008: large-scale medium-range aspects. *Journal of Earth System Science* 120(1): 1–22.
- 7- Richardson, DS., 2001: Ensembles using multiple models and analyses. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127: 1847–1864.
- 8- Nalder, I.A., and R.W. Wein, 1998: Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 211-225.
- 9- Durai, V. R. and Bhardwaj, R., 2013: Improving precipitation forecasts skill over India using a multi-model ensemble technique, *Geofizika*. 30: 2, 119-141.
- 1- Epstein, E. S., 1969: Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 6: 739–759.
- 2- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 102: 409–418.
- 3- Krishnamurti, T. N., C. M. Kishtawal, Z. Zhang et al., 2000: Multi-model Ensemble forecasts for weather and seasonal climate, *Journal of Climate*,. 13 (23): 4196–4216.
- 4- Roy Bhowmik, SK., Durai, VR., 2010: Application of multi-model ensemble techniques for real time district level rainfall forecasts in short range time scale over Indian region. *Meteorology and Atmospheric Physics* 106(1–2): 19–35.
- 5- Kumar, A., Mitra, A. K., Bohra, A. K., Iyengar, G. R. and Durai, V. R. (2012): Multi-model ensemble (MME) prediction of rainfall using neural networks during monsoon season in India. *Meteorol. Appl.*, 19: 161–169.