

بررسی نقش واداشت های پوشن سپهری-وردسپهری تاوه قطبی در رخداد بارش های سنگین و فراگیر ایران

حسن حاجی محمدی

دانشجوی دکترای آب و هواشناسی سینوپتیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۲/۰۵ ، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

چکیده

طی دهه های اخیر تئوری های جدیدی در پی شناسایی برهمکنش بین جریان های پوشن سپهری و وردسپهری مطرح شد. در همین راستا سعی شد تا به بررسی نقش واداشت های پوشن سپهری و وردسپهری تاوه قطبی در ارتباط با بارش های سنگین و فراگیر ایران پرداخته شود. بدین منظور از داده های شبکه بندی شده GPM برای الگوی فضایی بارش و داده های مرکز ملی پیش بینی محیطی/علوم جو (NCEP/NCAR) و مرکز پیش بینی های میان مدت اروپا (ECMWF) جهت تحلیل شرایط جوی استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که گردش پوشن سپهری تاوه قطبی با تغییر شکل به حالت بیضوی و با تعمیق شدن هسته مرکزی تاوه قطبی، تاوایی پتانسیل و ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل پوشن سپهر زیرین وارد وردسپهر فوقانی شده است. با افزایش تاوایی پتانسیل و شارش آن از مرکز بیشینه خود از شمال شرق روسیه به منطقه، سبب تاخوردگی ورد ایست و در نهایت افت ژئوپتانسیل بر روی خاورمیانه شده است. شکل گیری ناهنجاری در دوره های همراه با بارش سنگین و فراگیر ایران را می توان بین ۱۸ الی ۲۰ روز قبل از وقوع این رویداد در پوشن سپهر میانی و فوقانی پیش بینی نمود. از طرفی تغییر فشار ورد ایست در منطقه قطب و خاورمیانه نشان داد که با افزایش فشار در ورد ایست قطبی با تاخیر ۲ الی ۳ روزه در روزهای همراه با بارش سنگین بر کاهش ارتفاع ژئوپتانسیل وردسپهری تاثیر می گذارد. در جریان جت جنب قطبی و انحنای آن نیز از عوامل مهم در انتقال پایین سو و جنوب سوی تاوایی پتانسیل و در نهایت افزایش شیو سرعت جریان جت جنب حاره در منطقه می باشد.

کلمات کلیدی: تاوه قطبی تعمیق یافته، گردش پوشن سپهری-وردسپهری، تاوایی پتانسیل، بارش سنگین، ایران

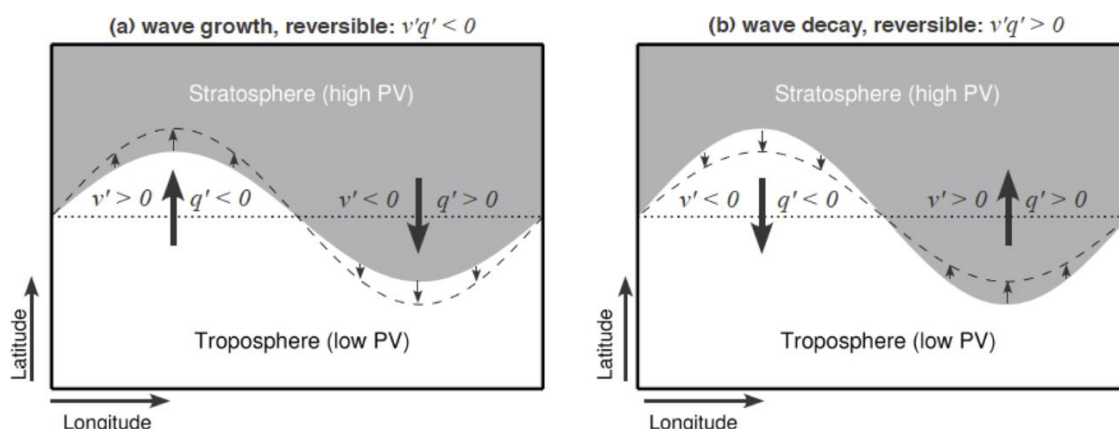
مقدمه

جفت شدگی دینامیکی بین وردسپهر و پوشن سپهر یکی از جنبه های مهم مباحث دینامیک جو بوده که دارای اثرات مهم هواشناختی بر روی سطح زمین است (تامسون و والاس، ۱۹۹۸). همبستگی و ارتباط بین این دو لایه و تغییرپذیری این دو لایه در واکنش به یکدیگر سبب شده تا بتوان از دو هفته قبل از وقوع یک رویداد جوی آن را در پوشن سپهر پیش بینی نمود. از طرفی پیش بینی ها در وردسپهر که بصورت روزانه بوده نشان از آن دارد که سازوکار حاکم در این دو لایه جو متفاوت است. درک جامع از اصول بنیادی برهمکنش های وردسپهر- پوشن سپهر می تواند به بهبود دقت پیش بینی های آب و هوا کمک کرده و از طرفی می تواند شاخصی مناسب جهت پیش بینی های اقلیمی کوتاه مدت و میان مدت باشد (الدوین، ۲۰۰۳؛ اسکایف و همکاران، ۲۰۱۶؛ زیگموند و همکاران، ۲۰۱۳؛ تیریپاتی و همکاران، ۲۰۱۵). جفت دینامیکی وردسپهر- پوشن سپهر از طریق امواج سیاره ای گردش پوشن سپهری بالاسو (چارنی و دریزن، ۱۹۶۱؛ ماسونو، ۱۹۷۱) و توسعه پایین سوی امواج در زمان رخداد ناپهنجاری های بزرگ در وردسپهر همسو با تغییرات ناگهانی و شدید در پوشن سپهر می باشد (الدوین و دانکرتون، ۲۰۰۱؛ دومیسن و باتلر، ۲۰۲۰). یکی از راه های مفید برای مطالعه برهمکنش بین پوشن سپهر و وردسپهر بررسی و تجزیه و تحلیل رفتار و کنش های ناگهانی پوشن سپهر و تاثیر آن بر روی وردسپهر و بالعکس می باشد. در اصل مکانیسم های ناپهنجاری ناگهانی جفت شده، لزوماً برای گردش های ضعیف یا قوی با رفتاری نامتقارن نمی باشد. اما تمایز مربوطه بطور بالقوه مهم می باشد (دومیسن و همکاران، ۲۰۲۰). در سطح دنیا ادبیات گسترده ای به بررسی برهمکنش بین وردسپهر و پوشن سپهر پرداخته است. عمده این تحقیقات بر این نظر بودند که شکست تاوه قطبی حاصل برهمکنش بین گرمایش ناگهانی پوشن سپهر (SSW) می باشد (چارلتون و همکاران، ۲۰۱۸؛ کارپچکو و همکاران، ۲۰۱۷؛ کاوتز و همکاران، ۲۰۲۰؛ تامیسین و همکاران، ۲۰۱۲). چنین شرایطی اغلب با وقوع امواج سیاره ای در حال انتشار به سمت بالا که منجر به گرم شدن غیرعادی پوشن سپهر و کاهش سریع بادهای

پوشن سپهری می شود، پیش می آید (الدوین، ۲۰۲۱). اما لازمه تغییرات گردش تاوه قطبی در شکست استراتوسفری نیست. پدیده دیگری تحت عنوان کاهش ناگهانی پوشن سپهر (SSD) بوقوع می پیوندد که به مانند گرمایش ناگهانی پوشن سپهر دارای یک جریان زمینه غربی بوده که شدت این جریان غربی نسبت به SSW کمتر می باشد. چنین رویدادی سبب شده تا یک جریان پایین سو بوجود آید که طی آن جریان جت با یک پرش جنوب سو به سمت استوا بوقوع پیوسته و در ادامه سبب بوجود آمدن ناپهنجاری های منفی در وردسپهر می شود (برلی و گرامس، ۲۰۱۹؛ دومیسن، ۲۰۱۹). روپ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی پیوندهای بالقوه گردش های حدی بین وردسپهر و پوشن سپهر پرداختند. آنها دریافتند که شدت تاوه قوی، مرتبط با بازتاب امواج سیاره ای در حال انتشار به سمت سطوح فوقانی تر بوده و از طرفی بروز این انعکاس و بازتاب، به جزئیات ساختار تاوه قطبی مربوط است.

در ایران نیز تحقیقات مختلفی بر روی تاوه قطبی وردسپهری و پوشن سپهری انجام شده که از دیدگاه های مختلف به بررسی اثرات این سامانه بزرگ مقیاس بر روی کمیت های هواشناختی ایران و خاورمیانه پرداخته است.

عباس زاده و همکاران (۱۳۹۳) با تحقیقی تحت عنوان بررسی اثرهای اقلیم شناختی تاوه قطبی پوشن سپهر در منطقه جنوب غرب آسیا به این نتیجه رسیدند که میزان تاثیر شدت تاوه قطبی پوشن سپهر در وضعیت آب وهوایی ایران از برخی نقاط کره زمین مانند شمال قاره امریکا کمتر است، اما این آثار می تواند در بحث پیش بینی بلندمدت وضع هوا در این منطقه حائز اهمیت باشد. برهانی و همکاران (۱۳۹۹) در بررسی ارتباط تاوه قطبی پوشن سپهری با ساختار وردایست دینامیکی در منطقه جنوب غرب آسیا به این نتیجه رسیدند که طی رخداد های تاوه قطبی ضعیف، بخش های زیادی از منطقه مورد مطالعه و ایران در ناحیه شکست امواج راسبی قرار داشتند و در نتیجه، آثار ناشی از تاوه ها بر این منطقه زیاد نیست. اما در رخداد های تاوه قوی، عرض های بالاتر در منطقه مورد مطالعه و برخی نواحی از عرض های میانی آن، در محدوده درون تاوه واقع هستند؛ بنابراین به دنبال رخداد های تاوه قوی می توان تغییرات ناشی



شکل ۱. شماتیک رشد موج در حالت برگشت پذیری (a) و فروپاشی (b) در وردیست در یک صفحه افقی.

های سنگین غرب و جنوب غرب ایران ابتدا از داده های ثبت شده ایستگاهی واقع در منطقه استفاده شد. این داده ها شامل مجموع بارش ۲۴ ساعته برای بازه زمانی مارس تا آوریل ۲۰۱۹ بود. در ادامه با مراجعه به پایگاه داده GPM^۴ داده های شبکه بندی شده با توان تفکیک ۱۰ کیلومتر برای منطقه اخذ گردید. هدف اصلی استفاده از این داده ها، برآورد بارش برای مناطق فاقد ایستگاه و نمایش بهتر الگوی فضایی بارش در منطقه غرب و جنوب غرب ایران بود. در ادامه با مراجعه به مراکز پیش بینی محیطی/علوم جو (NCEP/NCAR) و مرکز پیش بینی میان مدت اروپا (ECMWF) به ترتیب داده هایی با توان تفکیک ۰.۵ و ۲.۵ درجه جغرافیایی جهت دریافت مولفه های جوی اقدام شد. پس از استخراج روزهای بارشی مشاهده شد که در محدوده بسیار وسیعی بارش ها به وقوع پیوسته و از طرفی سعی بر آن شد تا به علت یابی مکانیسم اصلی رخداد این بارش ها پرداخته شود (شکل ۳). بدین منظور در ابتدا به گردش بزرگ مقیاس در محدوده نیمکره شمالی اقدام شد. در این راستا جهت تبیین سازوکار حاکم ترازهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ هکتوپاسکال برای نیمکره شمالی مورد بررسی قرار گرفت. بدین دلیل که تئوری اصلی این تحقیق بر این بنا بود که عامل اصلی رخداد این بارش ها در منطقه گردش پوشش سپهر و ورد سپهر تاوه قطبی بوده است. در ادامه برای درک بهتر این سازوکار از پارامتر تاوایی پتانسیل بر روی سطوح فشاری بهره گرفته شد. برای اثبات این نظر سعی شد تا ابتدا به گردش قائم

از تاوه قطبی را در کمیت های وردایست بر فراز منطقه مورد مطالعه انتظار داشت. کاکاوند و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی موردی نقش تاوه پیرا قطبی بر بارش های ایلام دریافتند که با گسترش موج حاصل از تاوه پیرا قطبی بر روی مدیترانه، یک کم فشار دینامیکی در سطح زمین تشکیل شده که شرایط را برای رخداد بارش های شدید در منطقه مورد مطالعه فراهم نموده است. مرادی (۱۳۹۹) ارتباط گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی با تغییرات تاوه قطبی مورد بررسی قرار داد. ایشان نتیجه گرفت که طی دوره آماری هسته تاوه قطبی به دو سلول تبدیل شده که نوع فعالیت آن به هسته مادر وابسته است.

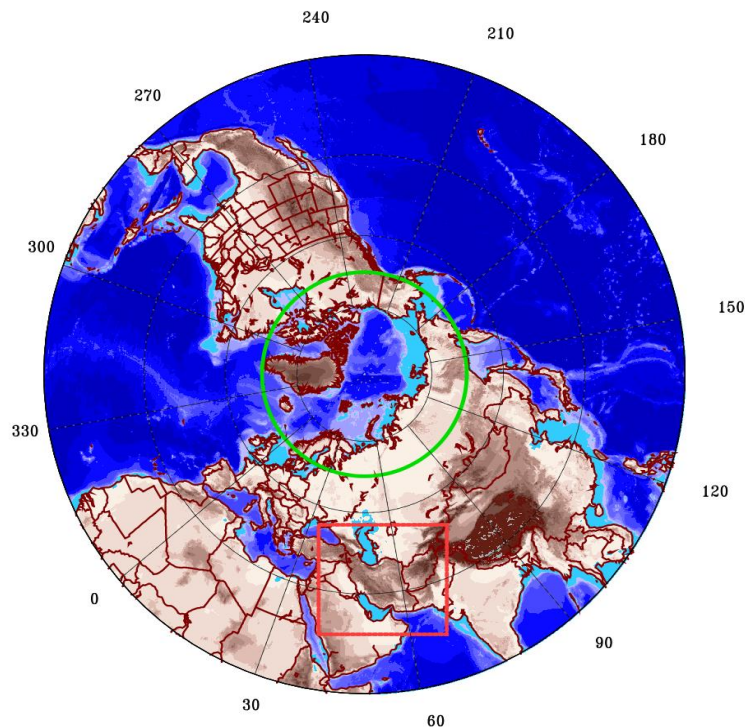
در شکل ۱ شماتیکی از رشد امواج در وردسپهر و پوشش سپهر به نمایش در آمده است. رنگ خاکستری نشان دهنده هوای با PV^+ زیاد است (از استراتوسفر؛ PV^- نیز به طور کلی به سمت قطب افزایش می یابد) و بدون سایه (سفید) نشان دهنده هوای کم PV است (از وردسپهر؛ PV^- نیز به طور کلی به سمت استوا کاهش می یابد). در این تصویر فلش ها حرکات امواج در حین رشد و منحنی شدن نمایش می دهد. در این شکل v' نشان دهنده جریان های نصف النهاری است، q' نشان دهنده تغییرات مقدار PV در ادامه گسترش آن در راستای نصف النهارات می باشد (بولیکا و بیرنر، ۲۰۲۰).

مواد و روش ها

به منظور بررسی واداشت های تاوه قطبی در رخداد بارش

4 - Global Precipitation Measurement

3 - Potential Vorticity



شکل ۲. محدوده مورد مطالعه: رنگ سبز قلمرو مطالعه منطقه قطب و رنگ قرمز محدوده مورد مطالعه جهت همبستگی

جفت شدگی بین پوشش سپهر و ورد سپهر سر انجام می شود که طی آن انتقال جرم و تکانه و در نهایت شار فعالیت موج را به همراه دارد.

روابط موجود در مدل عددی بکار رفته برای برآورد تاوایی پتانسیل به شرح زیر است:
رابطه ۱:

$$PV = -g(fK + \nabla p \times V) \cdot \nabla P\theta$$

یا

رابطه ۲:

$$PV = -g \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_p + f \frac{\partial p}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right) \right\} \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

که g شتاب گرانشی، p فشار، f پارامتر کوریولیس تابعی از عرض جغرافیایی، u و v مولفه های افقی سرعت و θ دمای پتانسیل است. فرض تاوایی پتانسیل بصورت $PV = -fg \frac{\partial \theta_s}{\partial p}$ ، همبسته با جو ایده ال ساکن موسوم به جو

در منطقه قطبی پرداخته شود. بر این اساس برای محدوده ۶۰ تا ۹۰ درجه شمالی و ۰ تا ۳۶۰ درجه شرقی نمودار هافمولری برای ترازهای ۱۰۰۰ تا ۱۰ هکتوپاسکال از نابهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تهیه شد. در نهایت به منظور درک بهتر و تاثیر واداشت های پوشش سپهری بر ورد سپهر، مقادیر وردایست و ارتفاع ژئوپتانسیل منطقه خاورمیانه مورد بررسی قرار گرفتند و مقادیر همبستگی آنها جهت ارتباط سنجی محاسبه گردید (شکل ۲). همانطور که ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) بدان اشاره کرده اند که جفت شدن تاوه قطبی پوشش سپهری با تاوه قطبی وردسپهری سبب ایجاد بارش های سنگین و سیل آسا می شود، بدین دلیل که با انتقال تاوایی پتانسیل پوشش سپهری و افزایش فعالیت موج در وردسپهر سبب رخداد چنین نابهنجاری های می شود. هدف اصلی در این تحقیق نیز آشکار سازی این رویداد بر روی خاورمیانه بوده که در نهایت سبب بارش های سیل آسا در منطقه شده است. اساس این نظریه بر اساس گفته بولیکا و بیرنر (۲۰۲۰) بوده که معتقدند منبع اصلی امواج ناپایدار در محدوده وردایست و وردسپهر به یک

وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و ناهنجاری آن در تراز ۱۰ هکتوپاسکال حاکی از آن بود که با توسعه بیضی شکل مرکز تاوه به روی شمال آمریکا و اوراسیا و تقویت دو پرتافت در دوسوی تاوه سبب شده تا موج حاصل از این برهمکنش تا شمال دریای مدیترانه گسترش یابد. با تقویت پرفشار آلتوشین و پرفشار شمال اروپا شکل مرکز تاوه طی دوره مورد مطالعه دستخوش تغییر شده و ناهنجاری بوجود آمده در آن به ترازهای زیرین نیز منتقل شده است. در تراز ۲۰ هکتوپاسکال دامنه موج گسترش یافته حاصل از تاوه بر روی اروپا و آسیا از گستردگی بالاتری برخوردار بوده و از طرفی تمرکز گسترش تاوه به سمت شمال شرق روسیه می باشد. در تراز ۳۰ هکتوپاسکال از ناهنجاری مثبت شمال اروپا کاسته شده و هسته بیشینه ارتفاع ژئوپتانسیل بر شمال روسیه منطبق شده که مقدار آن به بیش از ۸۰۰ ژئوپتانسیل متر می رسد. در تراز ۵۰ هکتوپاسکال، حاصل ناهنجاری تاوه قطبی برای نیمکره شرقی، دو موج در دو غالب نسبتا کوتاه و وسیع در بر داشته است. موج نسبتا کوتاه در قسمت شرق روسیه و موج دوم بر روی دریای سرخ و دریای مدیترانه مشاهده می شود. بررسی ها حاکی از آن بود که تعمیق تاوه قطبی در تراز ۱۰ هکتوپاسکال سبب شده تا ناهنجاری در منطقه کلاک قطبی به شدت افزایش یابد و طی آن ترازهای زیرین پوشش سپهر دچار دگرگونی شوند. نکته دیگر آنکه گردش تراز ۱۰ هکتوپاسکال به تراز ۵۰ هکتوپاسکال حاکی از آن است که شدت ناهنجاری پرفشار آلتوشین کاسته شده و هسته آن متمرکزتر و از طرفی ناهنجاری مثبت آن از مناطق شرقی روسیه به شمال اقیانوس آرام منتقل شده است. از سویی پرفشار شمال اروپا که با ناهنجاری شدید بیش از ۱۵۰۰ ژئوپتانسیل متر مشاهده می شد تضعیف شده و از سویی هسته بیشینه بر روی شمال روسیه شکل گرفته است (شکل ۴). تمرکز موج نسبتا کوتاه تاوه بر روی شمال شرق روسیه سبب شده تا کانون اصلی ناپایداری و تکانه در جو پوشش سپهر، منطقه یاد شده باشد. برای اثبات این ادعا نقشه های تاوایی پتانسیل ترازهای یاد شده تهیه گردید (شکل ۵).

تاوایی پتانسیل پوشش سپهری

بررسی جریان هوا و تاوایی پتانسیل در تراز ۱۰ هکتوپاسکال

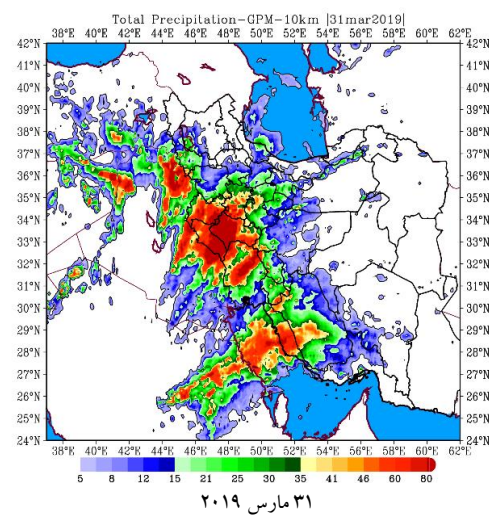
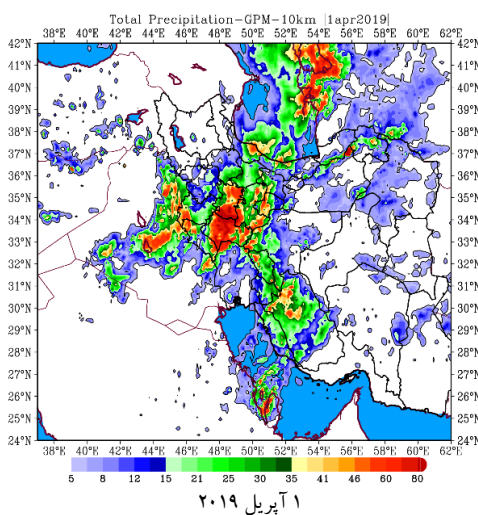
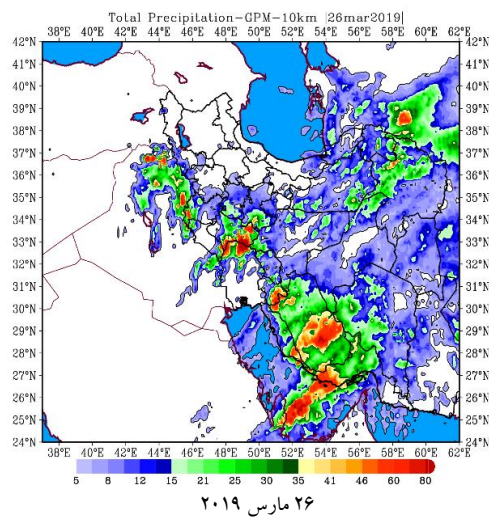
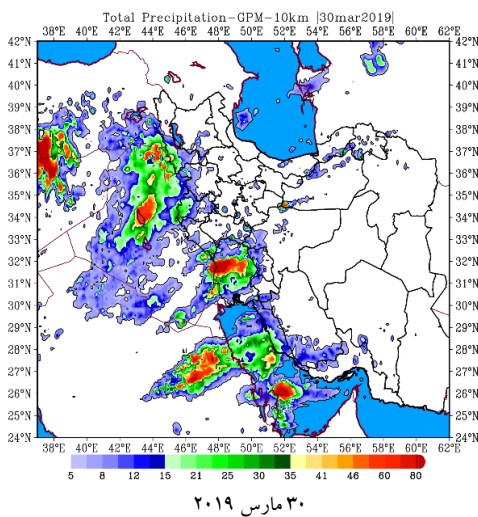
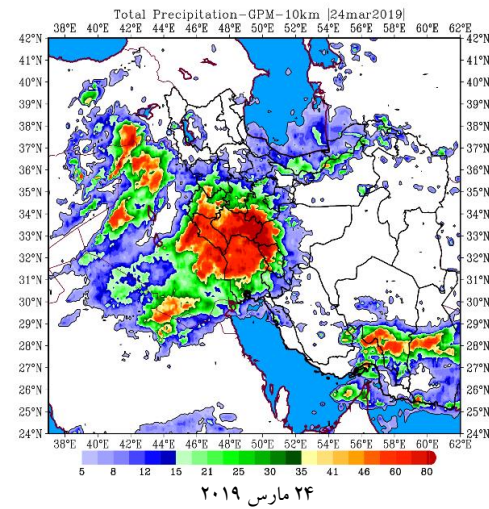
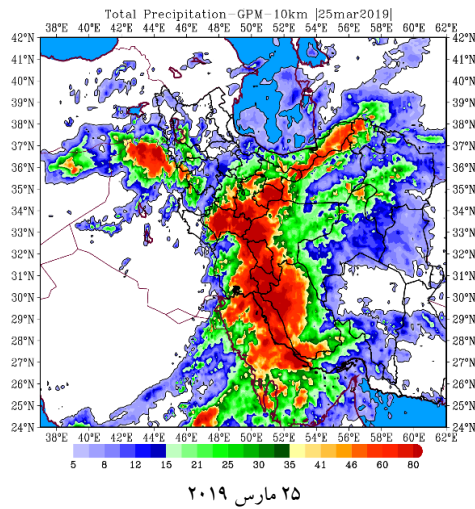
استاندارد به درک مقادیر عددی PV کمک می کند. عبارت فوق برای جو استاندارد نشان می دهد که به ازای $f = 10^{-4} s^{-1}$ و تغییر دمای پتانسیلی ۱۰ K در سطح فشاری ۱۰۰ هکتوپاسکال، مقدار PV تقریباً $10^{-6} m^2 s^{-1} K kg$ معادل یک واحد PV در نظر می گیرند و به اختصار به صورت PVU^5 نشان می دهند. در سطح مقطع قائم PV، جو، مقادیر نزدیک به PVU ۲ حوالی وردایست مناطق برون حاره ای دیده می شود که این مقدار برای تعریف وردایست دینامیکی این مناطق، بالاتر از ۲۰ درجه شمالی و پایین تر از ۲۰ درجه جنوبی به کار می رود (احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۵).

نتایج و بحث

با بررسی های انجام شده در بازه زمانی مورد نظر ۶ روز با بیشینه بارش در منطقه شناسایی شد (شکل ۳). بازه زمانی رخداد این بارش های بین روزهای ۱۹ مارس تا ۲۴ آوریل ۲۰۱۹ بود که از داده های شبکه ای برای برآورد بارش در مناطق مختلف استفاده شد. در این بین ۶ روز انتخاب شد که حجم بارش نازل شده و مناطق درگیر در آن بیش از سایرین بود. بررسی ها نشان داد که حجم بارش نازل شده در یک روز در برخی مناطق به بیش از ۸۰ میلیمتر در یک روز رسیده و این وضعیت در اکثر نقاط کشور از جمله، جنوب و جنوب غرب، غرب، شمال و شمال شرق کشور نمود بیشتری را دارا می باشد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود وجود چنین بارشی در منطقه تنها نمی تواند توسط یک ناهنجاری منطقه ای صورت پذیرفته باشد بدین صورت که هم از تداوم بالایی برخوردار بوده و هم از حجم بسیاری بالایی حکایت دارد. بر همین اساس و فرضیه مطرح شده، توسعه جنوب سوی جریانات شمالگان و وجود ناهنجاری در تاوه (پوشش سپهری و وردسپهری) عامل اصلی رخداد این پدیده بوده که توسط بولیکا و بیرنر (۲۰۲۰) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۲) مطرح شده بود، که در همین راستا و در ادامه بررسی شرایط جوی، ترازهای منتخب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ هکتوپاسکال انتخاب شد.

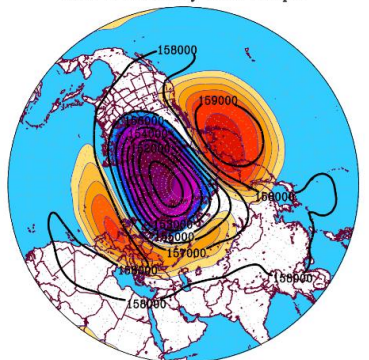
ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل پوشش سپهری

5 I-Potential Vorticity Unite



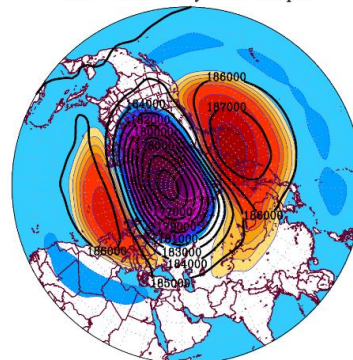
شکل ۳. برآورد بارش های فراگیر و سنگین بوقوع پیوسته با استفاده از سنجنده GPM

HGT & Anomaly HGT 20hpa



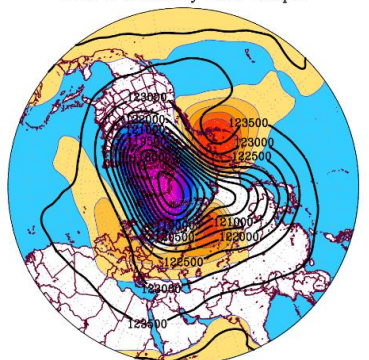
ناهنجاری و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۲۰ هکتوپاسکال

HGT & Anomaly HGT 10hpa



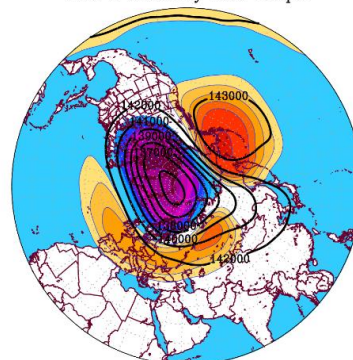
ناهنجاری و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۱۰ هکتوپاسکال

HGT & Anomaly HGT 50hpa



ناهنجاری و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰ هکتوپاسکال

HGT & Anomaly HGT 30hpa



ناهنجاری و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۳۰ هکتوپاسکال

شکل ۴. ناهنجاری و ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ هکتوپاسکال متوسط گیری شده برای ۶ روز بارش سنگین

پتانسیل نیز دستخوش جابجایی گردد. پرفشار شمال اروپا نیز در قسمت شرقی خود جریان چرخندی را نیز بوجود آورده که با افزایش تاوایی پتانسیلی همراه بوده که از شمال شرق روسیه به شمال آفریقا و دریای مدیترانه شارش یافته است. در تراز ۳۰ هکتوپاسکال هسته متمرکز واچرخند شمال اروپا تضعیف شده و طی آن هسته چرخندی قوی در شمال غرب آفریقا شکل گرفته است. در شرق این جریان چرخندی، موجی با هسته تاوایی پتانسیل بیش از ۶۵ واحد تاوایی پتانسیل بر روی دریای مدیترانه شکل گرفته است. با متمرکز شدن پرفشار آلتوشین هسته بیشینه تاوایی پتانسیل با یک جابجایی، به لبه بیرونی منطقه کلاهدک قطبی منتقل شده و با جریانی شمال شرق-جنوب غرب به خاورمیانه با فرافت مثبت تاوایی

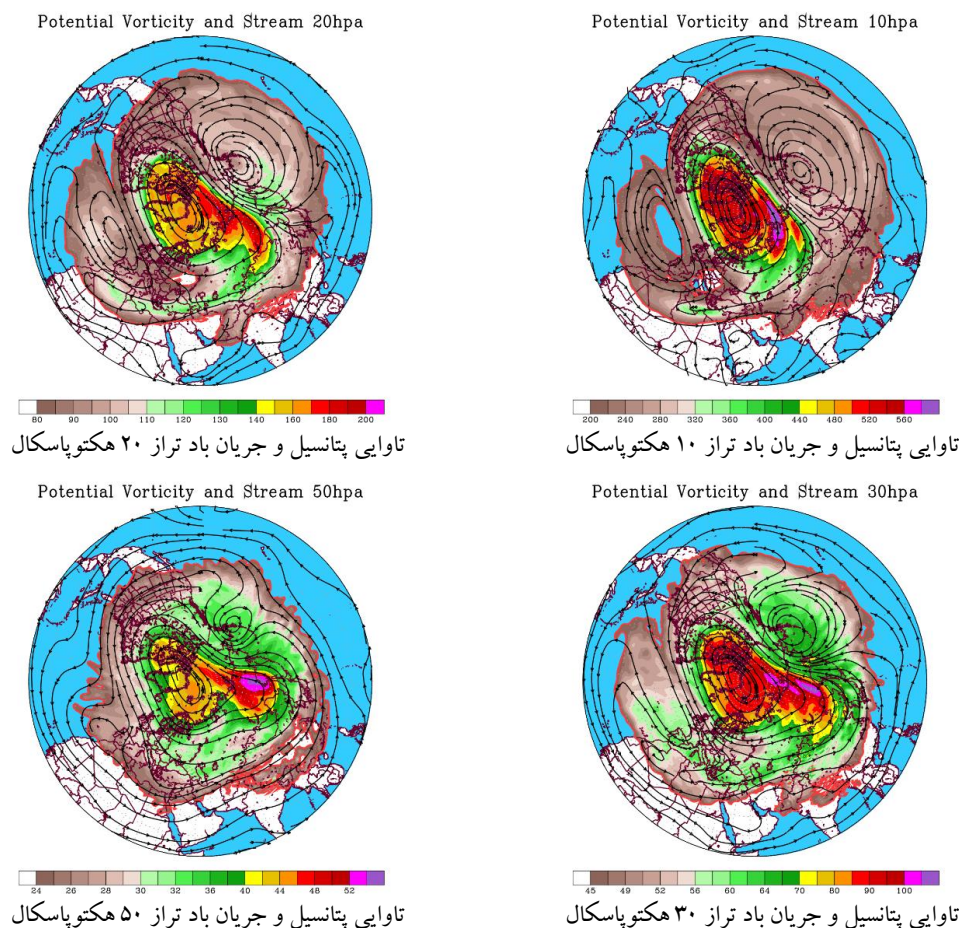
نشان داد که بیشینه تاوایی پتانسیل در قطاع جنوبی نیمکره شرقی تاوه بوجود آمده و مقدار حداکثری آن نیز منطبق بر شمال روسیه می باشد. با توسعه موج مورب بر روی دریای مدیترانه مقادیر تاوایی پتانسیل افزایش یافته که نقش اصلی در انتقال تاوایی پتانسیل پوشش سپهری در این تراز گردش واچرخندی شمال اروپا می باشد. بطوریکه که این سامانه سبب شده تا جریان شمالی و از طرفی شرایط را برای انتقال جنوب سوی تاوایی پتانسیل پوشش سپهری-قطبی بر روی خاورمیانه را فراهم سازد. در تراز ۲۰ هکتوپاسکال هسته بیشینه تاوایی پتانسیل دچار تغییرات مکانی شده که طی آن هسته اصلی تاوایی پتانسیل به نیمه شرقی روسیه منتقل شده و از طرفی با توسعه شرقی پرفشار آلتوشین، این هسته بیشینه تاوایی

پوشش سپهر قطبی به وقوع پیوسته است. در بازه زمانی ۲۰ فوریه تا ۵ مارس هسته بیشینه ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل در پوشش سپهر زیرین تشکیل شده و هسته اصلی آن در تراز ۳۰ هکتوپاسکال می باشد. از ۶ مارس تا ۲۰ مارس ناهنجاری شدید منفی در پوشش سپهر میانی و فوقانی به وجود آمده که ناهنجاری آن به کمتر از -200 ژئوپتانسیل متر رسیده با افزایش شدت آن این جریان با ناهنجاری وردسپهر فوقانی و میانی ادغام گشته و طی این تعمیق گردش پوشش سپهری تاوه قطبی به ترازهای زیرین الگوی ناهنجار دیگری در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال بوجود آمده است. از آنجایی که بیشینه بارش ها در ایران از ۲۶ مارس بوده، مشاهده می شود که بین بازه ۱۵ تا ۲۰ روزه، تاوه قطبی دچار ناهنجاری شدید شده و با انتقال تکانه به عرض های پایین تر سبب رشد امواج و شارش تاوایی

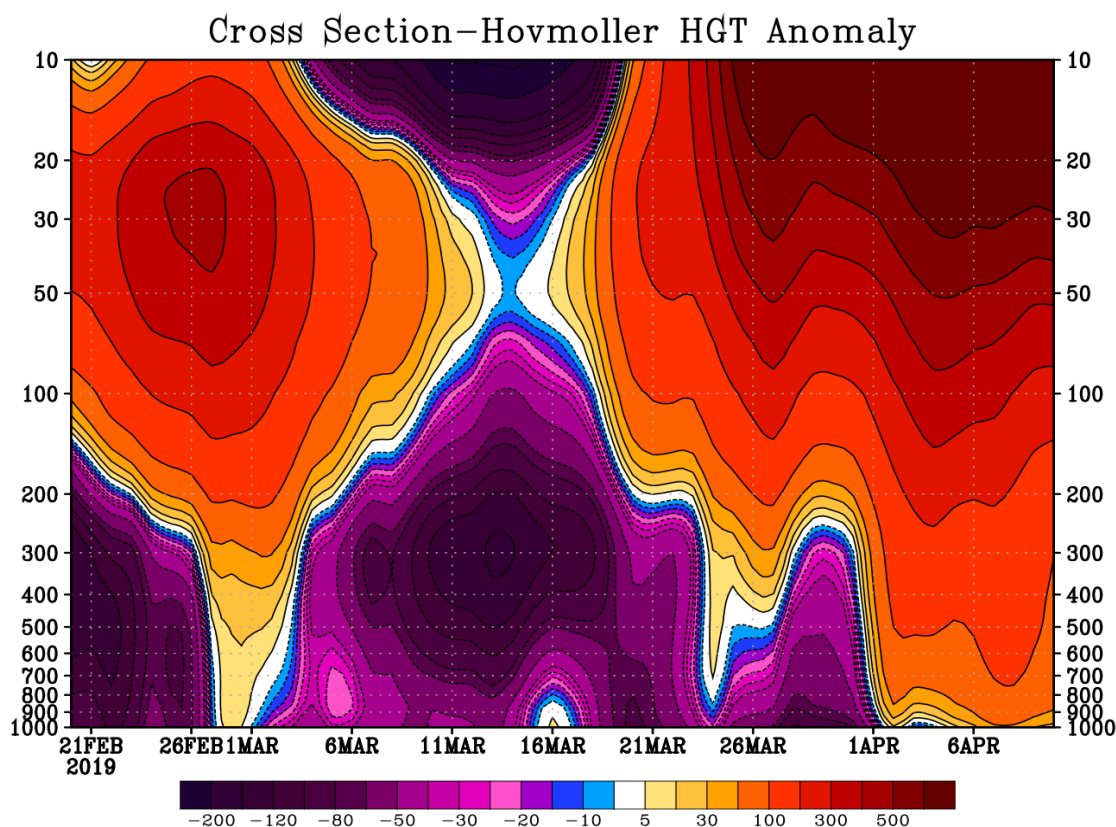
پتانسیل همراه شده است. در تراز ۵۰ هکتوپاسکال نیز منطبق بر نقشه های ناهنجاری این تراز مشاهده می شود که با تعمیق موج حاصل از لبه بیرونی تاوه پوشش سپهری زیرین، منطقه خاورمیانه متأثر از موج مذکور شده است. در این تراز پشته شمال اروپا تقریباً ناپدید شده و پرفشار آلتوشین نیز متمرکز تر شده است. نکته اصلی در این تراز این بوده که هسته اصلی تاوه بر روی قطب بوده اما مقادیر بیشینه تاوایی پتانسیل در شرق روسیه تشکیل شده است (شکل ۵).

اندركنش بین جریانات پوشش سپهری و ورد سپهری در منطقه قطب

با توجه به شکل ۶ مشاهده شد که طی بازه زمانی ۲۰ فوریه تا ۱۰ آوریل ۲۰۱۹ گردش ناهنجاری در وردسپهر و



شکل ۵. تاوایی پتانسیل و جریان باد تراز های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ هکتوپاسکال متوسط گیری شده برای ۶ روز بارش سنگین



شکل ۶. نمودار هافمولر مقطع قائم ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل، متوسط گیری شده برای منطقه قطب (۳۶۵ تا ۹۰ درجه شرقی و ۶۰ تا ۹۰ درجه شمالی)

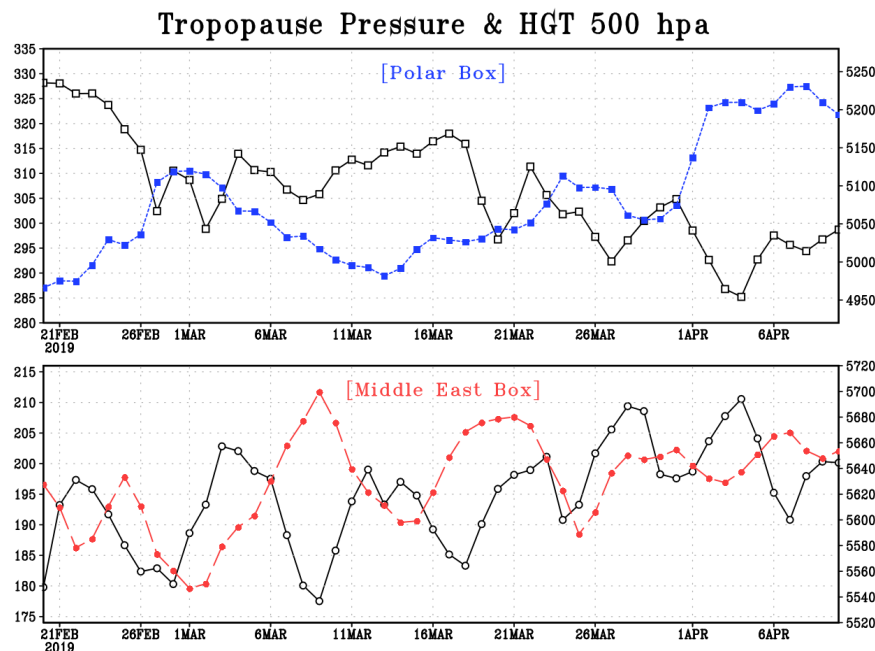
پوشش سپهری) با تاخیر ۲ الی ۳ روزه ناهنجاری در تراز میانی وردسپهر بوجود آمده و طی آن با افت ژئوپتانسیل در منطقه، ناوه شکل گرفته است. در دوره شروع بارش های شدید از ۱۷ مارس فشار ورد ایست شروع به افزایش کرده اما از ۲۰ مارس ارتفاع ژئوپتانسیل در منطقه شروع به کاهش نموده است. این تاخیر و تقدم در گردش پوشش سپهری-وردسپهری سبب شده تا بر اساس آن بتوان فشار ورد ایست و ارتفاع ژئوپتانسیل را شاخصی مناسب برای پیش بینی ناهنجاری های شدید جوی در منطقه به کار گرفت(شکل ۷).

در بخش بعدی سعی شد تا یک همبستگی مکانی بین مقادیر فشار ورد ایست منطقه قطبی با ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منطقه خاورمیانه تهیه گردد. بر اساس خروجی های به دست آمده مشاهده شد که دراولین روز بیشینه بارش مقادیر همبستگی ۰٫۷۳- بوده، در روز دوم بارش ها این مقدار به ۰٫۶۱- کاهش پیدا کرده اما از روز سوم بارش ها با روند افزایشی مقدار همبستگی افزایش یافته

پتانسیل پوشش سپهری به عرض های میانه شده است. از زمان شروع بارش ها، جو پوشش سپهری قطب با ناهنجاری مثبت بسیاری قوی همراه شده است. عامل اصلی این ناهنجاری بزرگ، جفت شدگی پوشش سپهر و وردسپهر در بازه ۱۱ تا ۱۶ مارس می باشد(شکل ۶).

وضعیت وردیست و اثرات آن بر ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

به منظور بررسی ارتباط بین فعالیت جریان پوشش سپهری و وردسپهر میانی، نمودار سری زمانی ترکیبی فشار وردیست و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تهیه شد. در بخش نخست با بررسی فشار ورد ایست و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی وردسپهر مشاهده شد که با افزایش/کاهش فشار ورد ایست، مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیل کاهش/افزایش می یابد. اما این وضعیت در خاورمیانه با چند روز تاخیر همراه است. بدین صورت که با افزایش فشار ورد ایست(تأثیر واداشت های

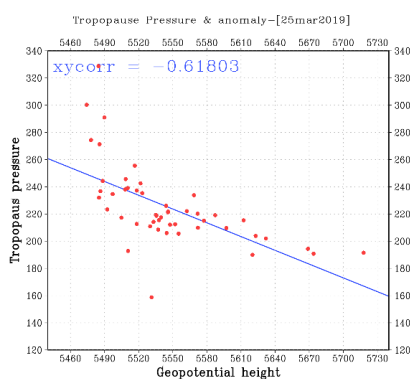


شکل ۷. نمودار هافمولر فشار و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای دو منطقه قطب و خاورمیانه (خط آبی و قرمز به ترتیب ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منطقه قطبی و خاورمیانه)

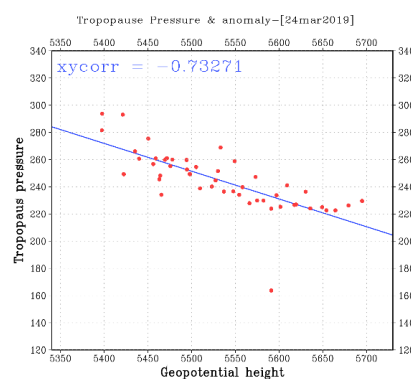
فوقانی و جریان جت در روز نخست بارش سنگین و فراگیر نشان داد که با انحنای جت قطبی و جداسازی آن در محدوده شرق اروپا تا شمال روسیه، یک مکش از عرض های بالاتر به شرق دریای مدیترانه اتفاق افتاده است که طی آن با فرارفت مثبت تاوایی پتانسیل در منطقه همراه شده است. طی آن در قطاع شمالی جت جنب حاره بیشینه گرادیان سرعت بوجود آمده که با افزایش تاوایی پتانسیل از شمال غرب آفریقا تا شرق عراق را به همراه داشته است. در روز ۲۵ مارس با انحنای شدید جت جنب حاره که حاصل از واداشت های انتقالی تکانه از پوشش سپهر زیرین بوده، کانون بیشینه تاوایی پتانسیل بر روی شرق دریای مدیترانه و شمال دریای سرخ تشکیل شده است. در روز ۲۶ مارس جت جنب قطبی با جریان جت جنب حاره در قسمت های شمالی دریای خزر ترکیب شده که طی آن با افزایش تاوایی پتانسیل و ردسپهری و تجمع حاصل از تاوایی پتانسیل پوشش سپهری باقی مانده از روز قبل همراه شده است. در روز ۳۰ مارس انحنای تقریباً ۹۰ درجه ای در جت جنب قطبی بوجود پیوسته که نتیجه آن گسترش و انتقال جنوب سوی تاوایی پتانسیل از عرض های قطبی به عرض های

است. به طوریکه در روز ۳۰ مارس به بیش از ۰.۸۶- رسیده است و در روزهای ۳۱ مارس و ۱ آوریل مقدار همبستگی به ترتیب ۰.۸۷- و ۰.۸۲- رسیده است (شکل ۸). همانطور که مشاهده شد تغییرات گردش پوشش سپهری بر وقوع بارش های منطقه از اثرگذاری بالایی برخوردار است. از زمان شروع بارش ها، با تاخیر زمانی ۲ الی ۳ روزه گردش پوشش سپهری بزرگ مقیاس قطبی اثرات خود را بر روی گردش و ردسپهری خاورمیانه برجای گذاشته است. این همبستگی های بالای ادعای خروجی های تهیه شده در شکل های ۶ و ۷ را تایید می نماید و بر اساس آن می توان گردش پوشش سپهری را ابتدا در قطب با تاخیری تقریباً ۲۰ روزه و پس از آن با تاخیری بین ۲ الی ۳ روز در خاورمیانه مشاهده کرد. این ادعا بر اساس تحقیق بولیکا و همکاران (۲۰۲۰) تایید می شود که منبع اصلی امواج ناپایدار در محدوده وردایست و وردسپهر به یک جفت شدگی بین پوشش سپهر و ورد سپهر سر انجام می شود.

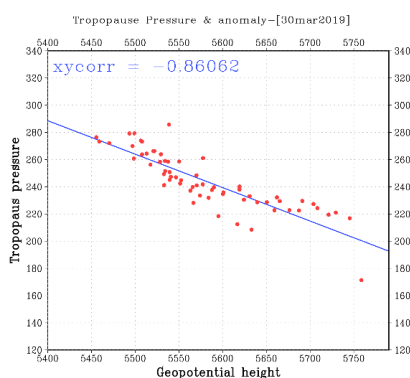
وضعیت جریان جت و تاوایی پتانسیل تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال بررسی حاصل از برهمکنش تاوایی پتانسیل و ردسپهر



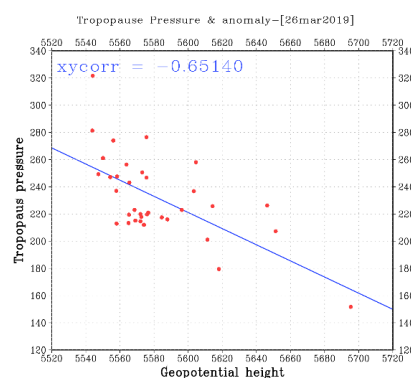
۲۵ مارس ۲۰۱۹



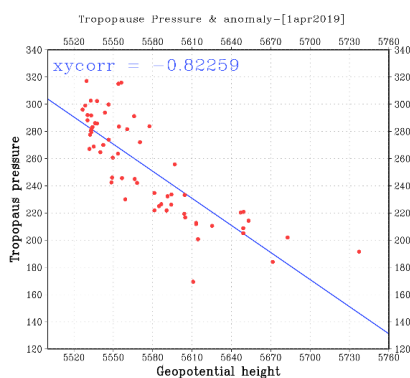
۲۴ مارس ۲۰۱۹



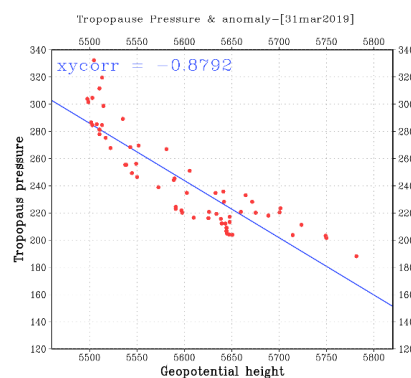
۳۰ مارس ۲۰۱۹



۲۶ مارس ۲۰۱۹



۱ آپریل ۲۰۱۹



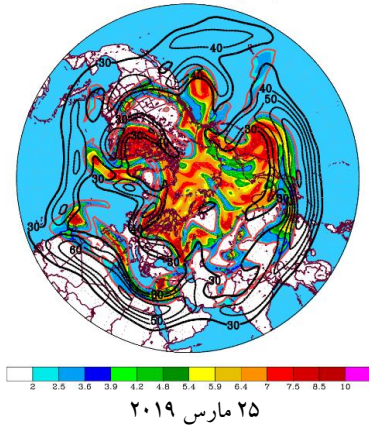
۳۱ مارس ۲۰۱۹

شکل ۸. همبستگی بین فشار وردیست منطقه قطبی با ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال منطقه خاورمیانه

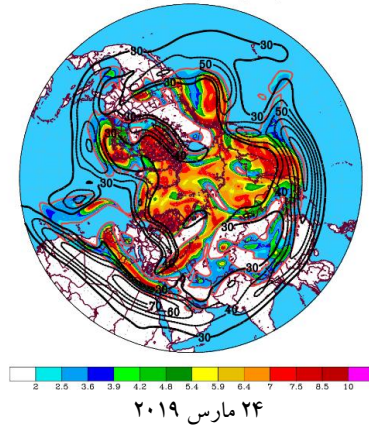
جنب قطبی بر روی شمال اروپا شدت یافته و در ادامه جریان شار تاوایی پتانسیل از شمال اروپا به نیمه شرقی دریای مدیترانه بوقوع پیوسته است که انحنای جنوب سوی جریان جت جنب قطبی بر روی شمال اقیانوس اطلس نقش چشمگیری را در این فرآیند بر عهده داشته است (شکل ۹). بر همین اساس و بنا به

میان و جنب حاره شده است. در روز ۳۱ مارس جریان جت جنب قطبی در دو منطقه شکسته شده که یکی بر روی شمال غرب اروپا و دیگری بر روی شمال روسیه بوده که ماحصل این دو شکستگی نفوذ تاوایی پتانسیل قطبی به جنوب منطقه شکستگی بوده است. در روز اول آوریل گسیختگی جریان جت

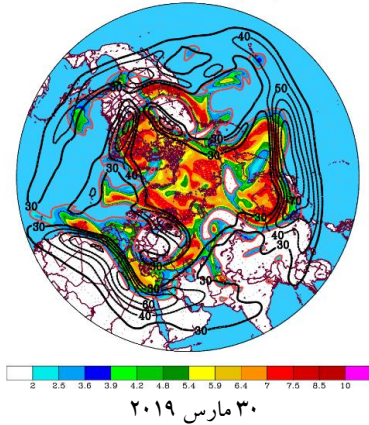
Potential vorticity-Jet 250hpa-[25mar2019]



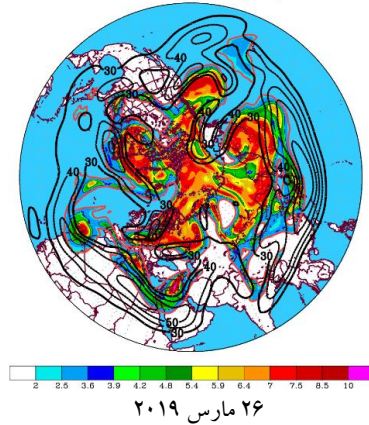
Potential vorticity-Jet 250hpa-[24mar2019]



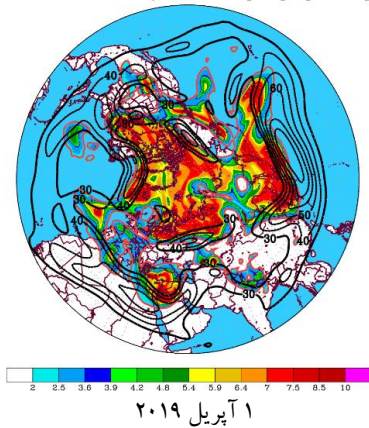
Potential vorticity-Jet 250hpa-[30mar2019]



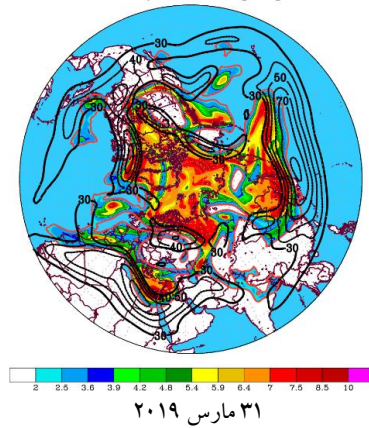
Potential vorticity-Jet 250hpa-[26mar2019]



Potential vorticity-Jet 250hpa-[1apr2019]



Potential vorticity-Jet 250hpa-[31mar2019]



شکل ۹. وضعیت جریان جت و تاوایی پتانسیل تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال (مقادیر رنگی تاوایی پتانسیل، خطوط مشکی سرعت باد جریان جت)

جمع‌بندی

طی بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که گردش پوشش سپهری تاوه قطبی و نابهنجاری‌های آن سبب تغییر در شرایط

نتایج برلی و گرامس (۲۰۱۹) و دومین (۲۰۱۹) مشاهده شد که افزایش تاوایی پتانسیل در وردسپهر فوقانی سبب انحنا و پرش پایین سوی جریان جت می‌شود.

تقویت می نماید. همبستگی بالای فشار ورد ایست با تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی وردسپهر نیز نشان داد که در منطقه قطب و منطقه مورد مطالعه این همبستگی با تاخیری بین ۲ الی ۳ روز همراه است. اما این تاخیر همیشگی نبوده و سرعت انتقال و شارش تلاوایی پتانسیل در یک روز نیز می تواند ارتباط بالای ۰.۸۷- را برای منطقه خاورمیانه به همراه داشته باشد. پرش پایین سوی جریان جت جنب حاره، جفت شدگی جریان دو جت جنب حاره و جنب قطبی و گسیختگی جریان جت جنب قطبی نیز از نمود اصلی این ناهنجاری بزرگ در پوشش سپهر و وردسپهر است. در هر یک از مراحل پرش پایین سو، جفت شدگی دو جریان جت و گسیختگی جریان جت جنب قطبی به ترتیب، انحنای جت و تجمع بالای تلاوایی پتانسیل، افزایش تلاوایی پتانسیل وردسپهری و پوشش سپهری، شارش جنوب سوی تلاوایی پتانسیل قطبی-پوشش سپهری بر روی دریای مدیترانه و شمال جریان جت جنب حاره را به دنبال دارد.

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که برهانی و همکاران (۱۳۹۹) نیز دریافتند ارتباط بالایی بین تاوه قوی و فشار ورد ایست وجود دارد که در تحقیق حاضر نیز بصورت کامل نحوه این ارتباط تشریح شد. ژنگ و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان داد جفت شدگی بین وردسپهر و پوشش سپهر عاملی اصلی رخداد ناهنجاری های شدید جوی می باشد که همسو با تحقیق حاضر می باشد.

مراجع

- عباس زاده اقدم، کبارا؛ محب الحجه، علیرضا؛ احمدی گیوی، فرهنگ (۱۳۹۳). بررسی اثرهای اقلیم شناختی تاوه قطبی پوشش سپهر در منطقه جنوب غرب آسیا. مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۰، شماره ۴.
- برهانی، نجمه؛ احمدی گیوی، فرهنگ؛ محب الحجه، علیرضا؛ میرزائی، محمد (۱۳۹۹). بررسی ارتباط تاوه قطبی پوشش سپهری با ساختار وردایست دینامیکی در منطقه جنوب غرب آسیا همراه با دو مطالعه موردی. مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۲.
- کاکاوند دویج، اعظم؛ مشکوتی، امیرحسین؛ مرادی، محمد (۱۳۹۹). بررسی موردی نقش تاوه پیراقطبی بر بارش روز ۲۹ اکتبر ۲۰۵ ایلام. نشریه پژوهش های اقلیم شناسی. سال یازدهم، شماره ۴۱.
- مرادی، محمد (۱۳۹۹). ارتباط گرمایش ناگهانی پوشش سپهر نوع اصلی با تغییرات تاوه قطبی در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹. نشریه فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۶، شماره ۳.
- احمدی گیوی، فرهنگ؛ محب الحجه، علیرضا؛ قزایلو، مریم (۱۳۸۵). مطالعه دینامیک سامانه های چرخندی روی ایران از دیدگاه

جوی وردسپهر شده است. نتایج حاکی از آن بود که در بازه زمانی یاد شده گردش پوشش سپهری تاوه قطبی دچار یک کشیدگی بیضوی شکل همراه با تعمیق در پوشش سپهر میانی تا وردسپهر را در بر داشته است. بر اساس نتایج محققین از جمله حسن زاده و همکاران (۱۳۹۷) که تاکید داشتند که از دو نوع گردش تاوه، گسسته و جابجا شده^۶، در پوشش سپهر، تاوه گسسته تاثیر بیشتری بر روی بارش های منطقه خاورمیانه داشته اما در این میان مشخص شد که نوع دیگری از تاوه با عنوان تاوه عمیق شده نیز با ناهنجاری بالا سبب انتقال تکانه از پوشش سپهر به وردسپهر فوقانی و میانی شده است. ناهنجاری ها نشان داد که منشا اصلی در انتقال پایین سو در پوشش سپهر ترازهای ۱۰ هکتوپاسکال به بالاتر می باشد که ترازهای زیرین فشاری را متاثر می سازند. نتایج حاصل از بررسی تلاوایی پتانسیل پوشش سپهری نشان داد که علیرغم قرارگیری هسته اصلی ناهنجاری منفی تاوه قطبی در نیمکره غربی، بیشینه تلاوایی پتانسیل در نیمکره شرقی و منطبق بر شمال شرق روسیه بود. از طرفی با دو جریان واچرخندی در پوشش سپهر که یکی بر روی آلتوشین و دیگری بر روی شمال اروپا بوده، تمرکز و انتقال پایین سوی تلاوایی پتانسیل را در عرض ها و ترازهای زیرین فراهم نموده اند، به گونه ای که واچرخند آلتوشین در تجمع و تمرکز تلاوایی پتانسیل تاثیر داشته و واچرخند شمال اروپا نیز طی یک گردش همگرا در شرق خود از یک سو سبب انتقال و فرارفت جنوب سوی تلاوایی پتانسیل شده و از طرفی طی این انتقال سبب جداشدگی و از هم گسیختگی جریان جت جنب قطبی شده است. بررسی ها نشان داد که رخدادها پوشش سپهری جفت شده با وردسپهر، مدت زمانی بین ۱۵ تا ۲۰ روز قبل از وقوع بارش های سنگین و فراگیر در منطقه قابل ردیابی و پیش بینی می باشند. از طرفی جو پوشش سپهر زیرین و میانی قبل از جفت شدگی با وردسپهر، دچار یک ناهنجاری مثبت بسیار قوی ژئوپتانسیلی شده و همین امر مانع از گسترش قائم امواج بالاسو در وردسپهر میانی و فوقانی شده و حبس این امواج با برگشت پذیری بالا در وردسپهر ناهنجاری های جوی را بیش از پیش

6-Split

7-Displacement

- [org/10.1029/2019jd030923](https://doi.org/10.1029/2019jd030923)
- Charlton-Perez, A. J., Ferranti, L., & Lee, R. W. (2018). The influence of the stratospheric state on north atlantic weather regimes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(713), 1140–1151.
- Karpechko, A. Y., Hitchcock, P., Peters, D. H., & Schneidereit, A. (2017). Predictability of downward propagation of major sudden stratospheric warmings. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(704), 1459–1470.
- Kautz, L.-A., Polichtchouk, I., Birner, T., Garny, H., & Pinto, J. G. (2020). Enhanced extended-range predictability of the 2018 late-winter Eurasian cold spell due to the stratosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(727), 1040–1055.
- Tomassini, L., Gerber, E. P., Baldwin, M. P., Bunzel, F., & Giorgetta, M. (2012). The role of stratosphere-troposphere coupling in the occurrence of extreme winter cold spells over northern europe. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 4(4), M00A03.
- Baldwin, M. P., Ayarzagüena, B., Birner, T., Butchart, N., Butler, A. H., Charlton-Perez, A. J., et al. (2021). Sudden stratospheric warmings. *Reviews of Geophysics*, 59(1), e2020RG000708.
- Matsuno, T. (1971). A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(8), 1479–1494.
- Beerli, R., & Grams, C. M. (2019). Stratospheric modulation of the large-scale circulation in the atlantic-european region and its implications for surface weather events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(725), 3732–3750. <https://doi.org/10.1002/qj.3653>.
- Domeisen, D. I. (2019). Estimating the frequency of sudden stratospheric warming events from surface observations of the north atlantic oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(6), 3180–3194. <https://doi.org/10.1029/2018jd030077>.
- Rupp, P., Loeffel, S., Garny, H., Chen, X., Pinto, J. G., & Birner, T. (2022). Potential links between tropospheric and stratospheric circulation extremes during early 2020. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(3), e2021JD035667.
- Boljka, L., & Birner, T. (2020). Tropopause-level planetary wave source and its role in two-way troposphere-stratosphere coupling. *Weather and Climate Dynamics*, 1(2), 555–575.
- Zhang, J., Zheng, H., Xu, M., Yin, Q., Zhao, S., Tian, W., & Yang, Z. (2022). Impacts of stratospheric polar vortex changes on wintertime precipitation over the northern hemisphere. *Climate Dynamics*, 1–17.
- تاوایی پتانسیلی: مطالعه موردی برای آذر ماه ۱۳۸۲. مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۱.
- حسن زاده، محمد (۱۳۹۷). بررسی نقش تاول قطبی پوشن سپهری گسیخته و جابه جاشده بر وقوع بارش در خاورمیانه. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد. استاد راهنما: عباس مفیدی.
- Thompson, D. W., & Wallace, J. M. (1998). The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 25(9), 1297–1300.
- Baldwin, M. P., Stephenson, D. B., Thompson, D. W., Dunkerton, T. J., Charlton, A. J., & O'Neill, A. (2003). Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 301(5633), 636–640. <https://doi.org/10.1126/science.1087143>
- Scaife, A., Karpechko, A. Y., Baldwin, M., Brookshaw, A., Butler, A., Eade, R., et al. (2016). Seasonal winter forecasts and the stratosphere. *Atmospheric Science Letters*, 17(1), 51–56.
- Sigmond, M., Scinocca, J., Kharin, V., & Shepherd, T. (2013). Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *Nature Geoscience*, 6(2), 98–102.
- Tripathi, O. P., Charlton-Perez, A., Sigmond, M., & Vitart, F. (2015). Enhanced long-range forecast skill in boreal winter following stratospheric strong vortex conditions. *Environmental Research Letters*, 10(10), 104007.
- Tripathi, O. P., Charlton-Perez, A., Sigmond, M., & Vitart, F. (2015). Enhanced long-range forecast skill in boreal winter following stratospheric strong vortex conditions. *Environmental Research Letters*, 10(10), 104007.
- Matsuno, T. (1971). A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(8), 1479–1494.
- Baldwin, M. P., & Dunkerton, T. J. (2001). Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 294(5542), 581–584. <https://doi.org/10.1126/science.1063315>
- Domeisen, D. I., & Butler, A. H. (2020). Stratospheric drivers of extreme events at the earth's surface. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00060-z>
- Domeisen, D. I., Butler, A. H., Charlton-Perez, A. J., Ayarzagüena, B., Baldwin, M. P., Dunn-Sigouin, E., et al. (2020). The role of the stratosphere in subseasonal to seasonal prediction: 2. Predictability arising from stratosphere troposphere coupling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(2), e2019JD030923. <https://doi.org/10.1029/2019jd030923>

Investigation of the role of Stratosphere - Troposphere cover of Polar Vortex in the occurrence of heavy and widespread rainfall in Iran

Hasan Haji mohammadi

PhD of Synoptic Climatology, Geography Department, Tarbiat Modares University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: Ha.hajimohammadi@stu.um.ac.ir

Received: 23 February 2021, accepted: 31 May 2021

ABSTRACT

In recent decades, new theories have emerged to identify the interaction between the Stratosphere and Troposphere currents. In this regard, an attempt was made to investigate the role of Stratosphere and Troposphere coactions of Polar Vortex in relation to heavy and pervasive rainfall in Iran. For this purpose, GPM Gridded data were used for the spatial pattern of precipitation and data from the National Center for Environmental Prediction / Atmospheric Science (NCEP / NCAR) and the European Center Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF). The results showed that the rotation of the Stratosphere cover of the Polar Vortex basin has entered the upper Troposphere by deforming to an elliptical shape and by deepening the central core of the polar pan, the potential Vorticity and the anomaly of the geopotential height of the Lower Stratosphere cover. With the increase of potential Vorticity and flux from its maximum center from the northeast of Russia to the region, it has caused Tropopause folding and finally the decrease of geopotential over the Middle East. The formation of anomalies in periods with heavy and widespread rainfall in Iran can be predicted between 18 to 20 days before the occurrence of this event in the middle and upper spheres. On the other hand, the change of Tropopause pressure in the Arctic and Middle East region showed that by increasing the pressure in the polar Tropopause with a delay of 2 to 3 days on days with heavy rainfall, it reduces the height of the Troposphere geopotential. In the direction of the polar jet and its curvature is also one of the factors in the downward and southward transmission of the potential Vorticity and finally increase the speed of the subtropical jet flow in the region.

Keywords: Deepened Polar Vortex, Stratosphere-Troposphere Circulation, Potential Vorticity, Heavy rainfall, Iran

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Haji mohammadi, H. (2021). Investigation of the role of Stratosphere - Troposphere cover of Polar Vortex in the occurrence of heavy and widespread rainfall in Iran. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 4(2): 147-160

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

