

## بررسی همدیدی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد

مورد مطالعه: ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷

طاهره سلطانی گردفرامری<sup>۱</sup>، دکتری اقلیم شناسی، آموزش و پرورش استان خراسان رضوی  
عباس مفیدی، استادیار اقلیم شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.  
امیر گندمکار، استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد،  
ایران.

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱ پذیرش نهایی: ۱۳۹۴/۰۹/۲۶

### چکیده

به منظور تحلیل همدیدی روزهای بسیار آلوده در ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ از یک روش تحلیل همدیدی ترکیبی استفاده شد. در پژوهش حاضر، چهار دسته داده، شامل داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه های سنجش آلودگی هوا، داده های رقومی جوی، داده های ایستگاه جو بالا و خروجی های مدل HYSPLIT مورد استفاده قرار گرفت. داده های آلودگی هوا از سازمان حفاظت محیط زیست خراسان رضوی، داده های جوی از مرکز ملی پیش بینی محیطی/مرکز ملی پژوهش جو (NCEP/NCAR) و داده های جو بالای ایستگاه مشهد از دانشگاه وابومینگ تهیه شد. ردیابی ذرات معلق نیز با بهره گیری از نسخه آنلاین مدل لاگرانژی HYSPLIT و با استفاده از روش ردیابی پسگرد به انجام رسید. نتایج تحلیل همدیدی بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ در شهر مشهد در قالب الگوی پرفشار مهاجر قابل طبقه بندی است. در الگوی پرفشار مهاجر، عبور امواج غربی از روی منطقه، استقرار پشته ای قوی در محدوده رشته کوه های اورال و دریای خزر را در پی دارد که با یک اریب شرق سو شکل گیری مرکز گردش و اچرخندی را در حفاصل دریای خزر تا بخش های شمالی خراسان در ترازهای زیرین موجب می گردد. در این الگو شاهد شکل گیری همزمان چند لایه کم ضخامت وارونگی در زیر تراز ۴۰۰ هکتوپاسکال هستیم.

واژگان کلیدی: روزهای آلوده، تحلیل همدیدی، مشهد.

## مقدمه

مساله آلودگی هوا در شهرهای بزرگ به دلیل وجود منابع متعدد آلاینده از قبیل خودرو، صنایع، وسایل گرمایشی، فعالیت های ساختمانی و تجاری طی چند دهه اخیر تشدید شده و نگرانی های بسیاری را در پی داشته است. (گلباز و همکاران، ۱۳۸۸) ساختار و ویژگی های محلی آلودگی هوا در یک شهر، از یک سو متأثر از فعالیت های انسانی و انرژی های مصرف شده ناشی از تمرکز و تراکم بالای جمعیت شهری و از سوی دیگر به نظام طبیعی حاکم بر منطقه، بویژه ساختار فیزیوگرافی و گردش منطقه ای و محلی جو وابسته است. بر همین اساس، پیدایش آلودگی هوا در فضای شهری و میزان شدت و گستردگی مکانی آن تنها با لحاظ نمودن شیوه زندگی شهروندان، رفتار جامعه شهری و نوع و کیفیت فعالیت های انسانی قابل تبیین نبوده، بلکه برای هر مرکز فعالیت شهری آلوده، ترکیب پیچیده ای از عوامل طبیعی و انسانی در تعیین ویژگی ها و ساختار محلی و منطقه ای آلودگی هوا نقش بازی می کند. در این میان، ظهور روزهای بسیار آلوده همراه با شرایط آلودگی بحرانی از خصوصیات بارز کلان شهرها می باشد، که با اثرات منفی بسیار گسترده برای ساکنین این شهرها و بطور کلی محیط زیست شهری همراه است. بروز آلودگی های حدی در هوای شهری و ظهور شرایط بحرانی در غلظت آلاینده های جوی، پدیده ای است که در چند سال اخیر به دفعات در کلان شهرهای ایران بوقوع پیوسته و اثرات منفی گسترده ای را در پی داشته است. (سایت تابناک، ۱۳۹۱) در بررسی مطالعات اقلیمی مربوط به آلودگی هوای شهری، برخی از پژوهش ها تیپ بندی همدیدی الگوهای گردش جو را اساس بررسی های خود قرار داده اند (Yap, Heidorn, ۱۹۸۶) (Kalkstein, Corrigan, ۱۹۸۶) (Kalkstein, Davis, ۱۹۹۰) (Comrie, ۱۹۹۰) (Chen et al, ۲۰۰۷) (Shahgedanova et al, ۱۹۹۸) (McGregor, Bamzels, ۱۹۹۵) (Davis et al, ۲۰۰۹) (Flocas, ۲۰۱۰). این دسته از مطالعات، از دو رهیافت اصلی جهت مطالعه آلودگی هوای شهری استفاده نموده اند. در رهیافت اول، اساس مطالعات بر تحلیل دستی (Subjective) روابط بین آلاینده های شهری و تیپ های همدیدی، بنا نهاده شده است. در رهیافت دوم از روش های تحلیل کمی (Objective) جهت انجام پژوهش ها استفاده شده است. علاوه بر دو رهیافت اولیه یادشده، در سال های اخیر و در راستای فراهم نمودن درک عمیق تری از روابط بین الگوهای گردش جو و آلودگی هوای شهری، روش های تکامل یافته تری موسوم به «روش های ترکیبی» نیز مورد استفاده برخی پژوهشگران قرار گرفته است. موضوع تحقیق حاضر ایجاب می کند تا مروری هرچند مختصر از نتایج پژوهش های انجام شده در چارچوب سه رهیافت فوق ارائه گردد. در بررسی ارتباط بین تیپ های همدیدی و آلودگی هوای شهری، در یک ارزیابی کلی از پژوهش های انجام شده، مدل چرخند کلاسیک برون حاره، با برخی ملاحظات محلی، اساس طبقه بندی همدیدی را شکل می دهد. رهیافت یاد شده بطور موفقی برای کل و یا بخش هایی از آمریکای شمالی (Davis, Kalkstein, L. S., ۱۹۹۰) (Comrie, ۱۹۹۰)؛ (Schwarzhoff, and Reid, ۲۰۰۰)، انگلستان (McGregor, and Bamzels, ۱۹۹۵)؛ (Baker, ۲۰۱۰)، مسکو (Shahgedanova et al, ۱۹۹۸)، چین و تایوان (Chen et al, ۲۰۰۸-۲۰۰۱) (Wang et al, ۲۰۱۰)، هنگ کنگ (Yuen et al, ۱۹۹۸)، فلسطین اشغالی (Dayan et al, ۲۰۰۲)، آتن (Sindosi et al, ۲۰۰۳) و بسیاری از مناطق شهری جهان به کار گرفته شده است. پژوهشگران در کار بست این رهیافت بر این باورند که گردش جو در مقیاس همدیدی از عوامل اصلی تعیین میزان تغییرات و وردایی های روزانه آلاینده های هوای شهری به شمار می آید. (Comrie, and Yarnal ۱۹۹۲) از این دست مطالعات می توان به پژوهش های (Kalkstein et al, ۱۹۹۶)؛ (Davis et al, ۲۰۱۰)؛ (Hu et al, ۲۰۱۰)؛ (Sando et al, ۲۰۱۱) اشاره نمود. برای مثال (Davis et al ۲۰۱۰) برای تبیین وردایی های روزانه مقادیر ازن سطحی در دره ای واقع در ایالت ویرجینیا از یک روش ترکیبی استفاده نموده اند. در این پژوهش علاوه بر بکارگیری روش «طبقه بندی همدیدی

فضایی» (Sheridan, ۲۰۰۲) از ردیابی پسگرد ذرات معلق نیز استفاده شد. نتایج تحقیق بیانگر آن است که روش ترکیبی یادشده، نتایجی کامل تر و دقیق تر را در قیاس با بکارگیری مجزای هر یک از روش های فوق در پی خواهد داشت. بکارگیری روش ترکیبی، بخصوص در تعیین منشأ آلودگی های کوتاه مدت (مقیاس روزانه)، کارایی بالایی را از خود نشان داده است. در ایران نیز (علیچانی ۱۳۸۲؛ ۱۳۸۴) با استفاده از روش های تحلیل کمی به شناسایی تیپ های همدیدی مؤثر بر آلودگی هوای تهران پرداخت. ایشان در بررسی های خود با بهره گیری از تحلیل خوشه ای و تحلیل مؤلفه های اصلی، تعداد ۶ تیپ همدیدی برای روزهای آلوده ی شهر تهران استخراج نمود. نتایج بیانگر آن است که عمده روزهای آلوده شهر تهران به ماه های پاییزی تعلق داشته و در عین حال، تیپ های گردش و اچرخندی (تیپ های مداری و و اچرخند مهاجر) بیش از سایر تیپ های گردش در بروز روزهای آلوده نقش ایفاء نموده اند. (بیدختی و شرعی پور ۱۳۸۸) به بررسی نقش شرایط هواشناختی ترازهای بالای جو بر وقوع روزهای دارای آلودگی حاد در شهر تهران پرداختند. یافته ها حکایت از آن دارد که محور جت جنب حاره نقش مهمی در بروز بیشینه و کمینه آلودگی هوا در شهر تهران دارد. بدین ترتیب که در روزهای آلودگی حاد، محور جت جنب حاره امتدادی نصف النهاری به خود گرفته و در ترازهای فوقانی و میانی جو با استقرار پشته ای بر روی منطقه همراه می شود. در مقابل، در روزهای کمینه آلودگی، جت با استقرار ناوه ای بر روی خاورمیانه همراه گشته و در امتداد مداری گسترش می یابد. نکته دیگر آن که، آلودگی های حاد شهر تهران در درجه اول به افزایش غلظت ذرات معلق ( $PM_{10}$ ) مربوط می شود. (عزیزی و همکاران ۱۳۹۲) با استفاده از الگوهای همدیدی جوبه بررسی تاثیر آن در شدت جزیره گرمایی شهر تهران پرداختند. تحقیقات انجام شده در رابطه با آلودگی هوا در شهر مشهد، بیانگر آن است که علیرغم افزایش غلظت آلاینده های جوی و بروز پدیده حاد آلودگی هوا در این شهر، پدیده یادشده در کلانشهر مشهد کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته و به همین جهت جنبه های مختلف این معضل محیطی چه در مقیاس محلی و چه در مقیاس منطقه ای کمتر آشکار گردیده است. از نخستین تحقیقات انجام شده می توان به طرح جامع آلودگی هوای شهر مشهد در سال ۱۳۷۷ اشاره نمود. و می توان به بررسی آلودگی هوای ناشی از استقرار ۳ نیروگاه در حاشیه شهر مشهد، و پژوهش (موسوی و همکاران، ۱۳۸۲) در مورد میزان انتشار ذرات معلق در کارخانجات تولید آسفالت در حاشیه شهر مشهد (منصوری و علی نژاد، ۱۳۸۸) ارزش گذاری اقتصادی آلودگی هوا در شهر مشهد (قربانی و فیروز زارع، ۱۳۸۸ و بررسی و اندازه گیری منابع آلودگی هوای شهر مشهد (فهمی فرد و افشار، ۱۳۸۹) اشاره نمود. آنچه مسلم است تعداد پژوهش هایی که بطور مستقیم و یا غیر مستقیم نقش شرایط اقلیمی و هواشناختی در آلودگی هوای شهر مشهد را مورد توجه قرار داده اند بسیار معدود و انگشت شمارند. از آن جمله، (علیچانی و نجفی نیک، ۱۳۸۸) و آلودگی های دمایی شهر مشهد را از منظر همدیدی مورد توجه قرار داده اند، در پژوهش یادشده با استفاده از داده های جو بالای ایستگاه مشهد، تعداد ۳۲۴ روز دارای وارونگی دمایی برای یکدوره ۱۷ ساله (۱۹۹۳-۱۹۷۷) استخراج گردید. داده های شبکه بندی شده فشار تراز دریا برای روزهای فوق با استفاده از روش های تحلیل عاملی و تحلیل خوشه ای مورد پردازش قرار گرفت و در نهایت وارونگی های دمایی شهر مشهد در ارتباط با ۷ تیپ گردشی طبقه بندی شد. یافته ها حکایت از آن دارد که شدت و فراوانی وقوع وارونگی های دمایی در ایام سرد سال به بیشینه خود رسیده و در عین حال در این دوره از سال وارونگی های دمایی شهر مشهد از تداوم و پایداری بیشتری در قیاس با سایر فصول سال برخوردارند. همچنین (جهانشیری، ۱۳۸۹) با استفاده از داده های روزانه منواکسیدکربن و ذرات معلق ( $PM_{10}$ ) برای یکدوره یک ساله (سال ۱۳۸۸)، سامانه های فشاری مؤثر بر افزایش آلودگی هوا در شهر مشهد را مورد بررسی قرار داد. برای انجام بررسی، از داده های ۸ ایستگاه سنجش آلودگی هوا که در سطح شهر مشهد پراکنده گردیده اند، استفاده شد. نتایج بررسی منجر به شناسایی پنج الگوی همدیدی برای روزهای آلوده در کلانشهر

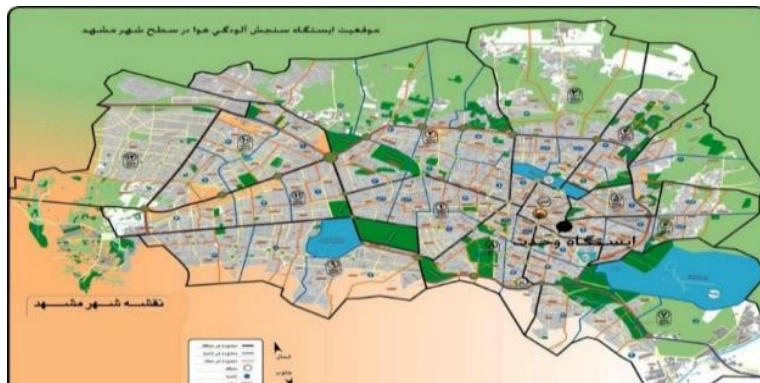
مشهدگردید که در میان الگوهای تعیین شده، سامانه های کم فشار نیز از نقش قابل توجهی برخوردار بوده اند. در یکی از جدیدترین پژوهش های صورت گرفته؛ (صادقی و همکاران ۱۳۹۳) روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد را با بهره گیری از یک روش ترکیبی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. یافته های این تحقیق بیانگر آن است که روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد در قالب چهار الگوی گردشی اصلی شامل: الگوی ترکیبی پرفشارسیبری- پشته جنب حاره، پرفشار مهاجر، پشته جنب حاره و الگوی چرخند، قابل طبقه بندی می باشند. در الگوی ترکیبی پرفشار سیبری-پشته جنب حاره، تسلط همزمان زبانه های پرفشار سیبری در ترازهای زیرین وپشته جنب حاره در وردسپهر میانی سبب بروز روزهای بسیار آلوده گردیده است. در الگوی پرفشار مهاجر، استقرار پشته ای قوی در وردسپهر میانی و تسلط مرکز گردش وچرخندی در وردسپهر زیرین برجانب شرقی دریای خزر، ظهور همزمان چند لایه وارونگی در نیمرخ قائم جو را سبب گردیده است. الگوی پشته جنب حاره، تیپ وارونگی فرونشستی را در دوره گرم سال به نمایش می گذارد. در مقابل، در الگوی چرخند، بروز روزهای بسیار آلوده، ناشی از توان جو در برداشت، انتقال و پخش گردوغبار و ذرات معلق است که بواسطه ناپایداری و صعود گسترده هوا به همراه عدم تغذیه رطوبتی مناسب در چرخندهای عبوری حاصل می گردد. بر اساس گزارشات موجود شهر مشهد در ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ در طی یک دوره چند روزه آلودگی بسیار شدیدی را تجربه نموده است. این دوره آلوده از جهات مختلف بسیار برجسته بوده و انجام یک مطالعه مستقل و دقیق را طلب می نماید. انجام یک بررسی دقیق و جامع از نقش فرآیند های جوی والگوهای منطقه ای گردش جو بر پیدایش این دوره بسیار آلوده می تواند به نحو مطلوبی ساختار آلودگی بسیار شدید را در کلان شهر مشهد آشکار سازد. بر این اساس هدف پژوهش حاضر بررسی ساختار گردش جو منطقه و تحلیل مقیاس همدیدی شرایط منجر به وقوع روزهای بسیار آلوده نوامبر ۲۰۰۷ در شهر مشهد می باشد.

### داده ها و روش کار

به منظور تحلیل همدیدی روزهای با هوای بسیار آلوده از یک روش تحلیل همدیدی ترکیبی استفاده شد. از منظر روش شناسی، مطالعه حاضر از رویکرد همدیدی «محیط به گردش» سود جسته (پارنال، ۱۹۹۳؛ علیجانی، ۱۳۸۱) و با توجه به محدود بودن روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد، از روش تحلیل همدیدی «دستی (Subjective)» جهت پردازش داده ها و تحلیل وضعیت جوی حاکم استفاده نموده است.

در پژوهش حاضر از چهار دسته داده استفاده شد. این داده ها شامل داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه های سنجش آلودگی هوا، داده های رقومی جوی، داده های ایستگاه جو بالا و خروجی های مدل HYSPLIT جهت ردیابی ذرات معلق در جو می گردد. داده های آلودگی هوا مربوط به ایستگاه وحدت واقع در مرکز شهر مشهد بوده (شکل ۱)، که از سازمان حفاظت محیط زیست خراسان رضوی اخذ گردیده است. آلاینده ها شامل منوکسیدکربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، ازن و ذرات معلق ( $PM_{10}$ ) می باشند که در مقیاس روزانه و برای یکدوره آماری ۷ ساله (۱۳۹۰-۱۳۸۴) تهیه و مورد پردازش قرار گرفته است. در بررسی وضعیت کیفیت هوا در سطح شهر مشهد اشاره به این نکته ضروری است که شهر مشهد تا سال ۱۳۸۸ تنها از یک ایستگاه سنجش آلودگی هوا (ایستگاه وحدت) برخوردار بوده و متأسفانه از تعداد ۱۰ ایستگاه موجود برای سنجش آلودگی هوا، تنها ایستگاه وحدت از طول دوره آماری مناسب برای مطالعه برخوردار بوده است. بر این اساس، مطالعه حاضر تنها با استفاده

از داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه وحدت به انجام رسیده و از بهره گیری داده های سایر ایستگاه ها به جهت کوتاه بودن طول دوره آماری صرف نظر گردیده است. برای مطالعه شرایط جو از داده های دوباره تحلیل شده مرکز ملی پیش بینی محیطی / مرکز ملی پژوهش جوی (NCEP/NCAR) با تفکیک افقی  $2/5 \times 2/5$  درجه (Kistler, et al, 1996, et al Kalnay, 2001) استفاده شد. داده های جوی شامل فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، سرعت قائم و مؤلفه های مداری (u) و نصف النهاری (v) باد برای ترازهای مختلف جو از ۴۸ ساعت قبل و در حفاصل زمانی ۶ ساعته می باشد. علاوه بر آن از داده های جو بالای ایستگاه مشهد (فرودگاه مشهد) برای دوره مشابه استفاده شد. داده های جو بالا از سایت دانشگاه وایومینگ (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) برای روزهای مورد مطالعه اخذ گردیده و شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، جهت و شدت باد و شرایط پایداری و ناپایداری جو (بر اساس منحنی های اسکیوتی - logP) می گردد. این داده ها برای ایستگاه مشهد تنها برای ساعت صفر گرینویچ موجود می باشند. از خروجی های مدل HYSPLIT نیز به عنوان داده های تکمیلی برای ردیابی ذرات معلق در روزهای ۱۰ تا ۱۵ نوامبر استفاده شد. در این مطالعه نسخه ۴.۹ مدل HYSPLIT مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱) موقعیت ایستگاه وحدت در سطح شهر مشهد (منبع مهندسان مشاور نقش پیرامون)

از منظر روش شناسی، پژوهش حاضر از یک روش همدیدی ترکیبی برای شناسایی نقش الگوهای گردش جو بر وقوع روزهای بسیار آلوده در مشهد استفاده نموده است. پژوهش در چند مرحله به شرح زیر به انجام رسیده است: - در نخستین مرحله از تحقیق با بهره گیری از داده های آلودگی ثبت شده در ایستگاه وحدت (شکل ۱)، وضعیت آلودگی هوا در شهر مشهد برای یک دوره ۷ ساله مورد بررسی قرار گرفت. پس از تجزیه و تحلیل آماری، روزهای بسیار آلوده ( $PSI < 200$ ) در مشهد شناسایی گردید. با توجه به این که هدف از مطالعه حاضر تبیین ساختار گردش جو در مقیاس همدیدی برای یک دوره بالاترین میزان غلظت آلاینده های هوای شهری در سطح شهر مشهد بوده است؛ لذا روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ (۲۲ و ۲۳ آبان ۱۳۸۶) که بر اساس بررسی انجام شده بالاترین میزان آلودگی جوی را داشته است، جهت مطالعه انتخاب گردید. در مرحله بعد با بهره گیری از داده های رقومی دوباره تحلیل شده از مراکز ملی پیش بینی محیطی / مرکز ملی پژوهش جوی (NCEP/NCAR) با تفکیک افقی  $2/5 \times 2/5$  درجه (کالنی و همکاران، ۱۹۹۶)، الگوی جریان و شرایط جوی حاکم از سه روز قبل از

وقوع روز آلوده به صورت ۶ ساعته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با بهره‌گیری از داده‌های رقومی یادشده، نقشه‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، باد برداری، تلاوایی نسبی و، امگا به صورت ترکیبی برای دوروز بسیار آلوده تولید شد. سپس نقشه‌ها مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفت و الگوی همیدی غالب در زمان وقوع آلودگی شدید در سطح شهر مشهد تعیین گردید. سپس به منظور فراهم نمودن یک دید عمیق تر از فرآیندهای جوی منجر به وقوع روز بسیار آلوده، از یک سری داده‌های مکمل و پردازش‌های تکمیلی استفاده شد. بر این اساس، ابتدا ذرات معلق در این دو روز آلوده با بهره‌گیری از یک مدل لاگرانژی و به روش پسگرد ردیابی شد. سپس با استفاده از داده‌های جو بالای ایستگاه مشهد، شرایط ترمودینامیکی حاکم در دوره مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی ترکیبی مؤلفه‌های فوق، تفکیک دقیق تر الگوی گردشی اولیه را امکان پذیر ساخت. با بهره‌گیری از داده‌های جو بالای ایستگاه مشهد، شرایط جوی در مقیاس محلی برای این دوروز بسیار آلوده بررسی شد. تجزیه و تحلیل داده‌های فوق از این منظر دارای اهمیت است که در کنار بررسی‌های همیدی، خصوصیات مقیاس محلی پدیده آلودگی هوا ارزیابی می‌گردد. با استفاده از داده‌های جو بالا، شرایط پایداری و ناپایداری جو، وجود و یا عدم وجود وارونگی دما، نوع و سطح وارونگی و جهت و شدت باد برای هر یک از این دوروز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور با استفاده از داده‌های متنی دانشگاه وایومینگ، منحنی اسکیوتی- $\log P$  به تفکیک برای هر یک از روزهای آلوده تهیه شد. در این تحقیق از خروجی‌های یک مدل ردیابی ذرات معلق برای مطالعه نحوه انتقال ذرات معلق در روزهای آلوده استفاده شد. بررسی‌های سابق حکایت از آن دارد که افزایش غلظت آلاینده‌ها و پیدایش روزهای با آلودگی بالا، ارتباط تنگاتنگی با انتقال و پخش ذرات و آلاینده‌ها در مقیاس محلی و یا منطقه‌ای دارد. بر این اساس، جهت تعیین نحوه انتقال و پخش ذرات در طی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد از یک مدل لاگرانژی<sup>۱</sup> با امکان ردیابی پسگرد ذرات در ترازهای مختلف جو موسوم به HYSPLIT<sup>۲</sup> استفاده شد (Draxler and Rolph, 2011) برای مسیریابی پسگرد، ذرات معلق در ایستگاه مشهد در زمان اوج آلودگی در نظر گرفته شد. در این مطالعه نسخه ۹.۴ مدل HYSPLIT مورد استفاده قرار گرفت و ذرات در دو سطح ۱۰، ۱۰۰۰، ۳۰۰۰ متری از سطح زمین و در حدفصل زمانی ۶ ساعته تا ۴۸ ساعت قبل ردیابی شدند. برای اجرای مدل از مجموع داده‌های FNL استفاده شد. داده‌های FNL در واقع داده‌های NCEP هستند که توسط لابراتوار منابع هوا وابسته به NOAA مورد پردازش مجدد قرار گرفته است. این داده‌ها با قدرت تفکیک افقی  $1 \times 1$  درجه، برای ۲۶

<sup>۱</sup>-Lagrangian

<sup>۲</sup>-HYbrid-Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)

۱- در هواشناسی دینامیک و به طریق اولی در مکانیک سیالات دوره‌یافت اصلی در مطالعه سیالات وجود دارد. در هیات اوپلری و هیات لاگرانژی. یک مثال ساده برای درک تفاوت این دوره‌یافت می‌تواند بررسی گردش هوا در امتداد نصف النهاری باشد. بر این اساس هنگامیکه ما یک مدل سه سلولی از گردش جوی در نیمکره تصور کنیم در عین حالی که تمامی ذرات را در امتداد نصف النهاری در نظر می‌گیریم، در آن واحد برای هر ذره یک موقعیت ثابت فرض می‌کنیم که بدین ترتیب با استفاده از هیات اوپلری یک مدل سه سلولی از گردش جوی در نیمکره تصور نموده ایم که در آن هر ذره یک جایگاه ثابت دارد. اما هنگامی که ما ذره‌ای را (با بسته‌های) بر روی استوار نظر بگیریم و آن ذره را تا رسیدن به مقصد تعقیب نماییم و پایه‌ی عبارتی در صد تصویرسازی حرکت یک ذره در یک بازه زمانی معین باشیم، در واقع برای ردیابی از هیات لاگرانژی استفاده نموده ایم. این هیات در بررسی آلودگی هوا مسیریابی چرخندها، سن یابی هواکاربردهای گسترده‌ای دارد. از آنجایی که در هیات لاگرانژی پس از انتخاب ذره در موقعیت مکانی وزمانی خاص، حرکت آن را در گام‌های زمانی دلخواه به سمت زمان‌های آینده و یا به سمت زمان‌های گذشته ردیابی نمایند.

تراز فشاری (۱۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال) و با گام زمانی ۶ ساعته از جولای ۱۹۹۹ در دسترس می باشند. داده های تحلیل شده عملیاتی مقیاس جهانی نهایی NCEP یا بطور مختصر FNL (Final) از سامانه یکپارچه سازی داده های جهانی (GDAS<sup>۳</sup>) برای تهیه داده های اولیه ورودی به سیستم استفاده می نماید. سامانه GDAS نیز وظیفه جمع آوری داده های مشاهداتی از سراسر جهان را با استفاده از سامانه ارتباط از راه دور (GTS<sup>۴</sup>) و سایر منابع به صورت بی وقفه و پیوسته برعهده دارد. در نهایت داده های FNL با مدلی مشابه مدلی که مرکز ملی پیش بینی محیطی برای تولید داده های سامانه پیش بینی جهانی (GFS<sup>۵</sup>) استفاده می کند تولید می گردد (Stunder, ۱۹۹۷). بدین ترتیب برای دوره مطالعه، نقشه های مسیر پسگرد انتقال ذرات تهیه شد و روزهای آلوده در شهر مشهد از منظر نحوه انتقال ذرات نیز بررسی شد. در مرحله نهایی، با ترکیب نتایج حاصل از تحلیل های همدمیدی، بررسی های محلی داده های جو بالا و ردیابی ذرات در مدل HYSPLIT، الگوی اصلی گردش جو در ارتباط با روزهای بسیار آلوده در مشهد شناسایی شد. شایان ذکر است در طراحی روش فوق از پژوهش صادقی و همکاران (۱۳۹۳) بهره گرفته شد.

### شرح و تفسیر و نتایج

#### بررسی وضعیت آلودگی هوا در ماه نوامبر ۲۰۰۷

بررسی وضعیت آلودگی هوادر طی دوره ۷ساله و بررسی تمامی آلاینده ها بیانگر آن است که سال ۲۰۰۷ آلوده ترین سال دوره مورد مطالعه در شهر مشهد بوده است. بطوری که سال یادشده هم از جهت شرایط متوسط آلودگی و نسبت روزهای آلوده (جدول ۱) و هم از نظر تعداد روزهای با آلودگی بالا (شکل ۲) بالاترین ارقام را به خود اختصاص داده است. درصد روزهای آلوده برای سال ۲۰۰۷، ۷/۹۸ می باشد. از اطلاعات فوق می توان به این نتیجه رسید که تغییرات سال به سال میزان آلودگی هوادر شهر مشهد بیش از آن که ناشی از فعالیت های انسانی باشد، تحت تاثیر واداشت های بزرگ مقیاس اقلیمی و تغییرات سال به سال الگوهای گردش جو حاصل می گردد. لازم به ذکر است که ذرات معلق دارای بیشترین مقدار از لحاظ غلظت در میان سایر آلاینده در این سال می باشد.

جدول ۱: تعداد و درصد سالانه روزهای آلوده در شهر مشهد (۲۰۰۵-۲۰۱۱)

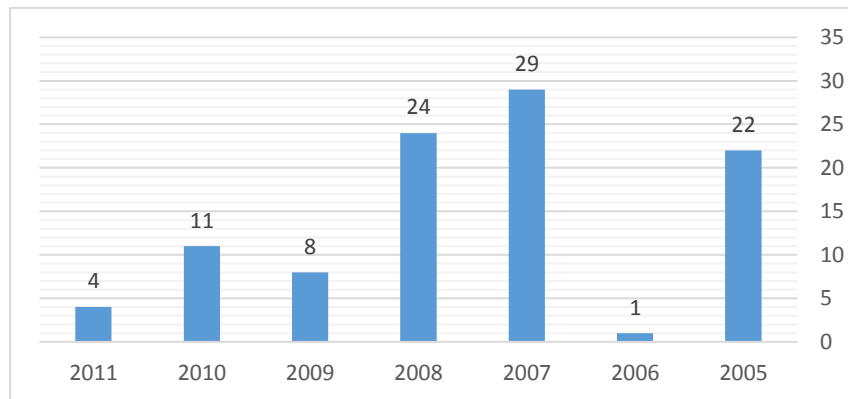
۲۰۱۱			۲۰۱۰			۲۰۰۹			۲۰۰۸			۲۰۰۷			۲۰۰۶			۲۰۰۵			سا
n	n	NP	n	n	NP	n	n	NP	n	n	NP	n	n	NP	n	n	NP	n	n	NP	ل
p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%	p	%		
۴	۳۲	۱۲۴	۱	۳۰	۱۶۴	۸	۳۳	۱۳۸	۲	۳	۱۴	۲	۳۶	۱۹۸	۱	۱۸	۱۵۵	۲	۳۵	۱۴	
۲	۱	۱	۲	۳	۵	۲	۴	۳۶	۷	۹	۳	۷	۱	۰	۲	۸	۶				

N<sup>۱</sup> تعداد روزهایی که هوا آلوده بوده (براساس شاخص ۱۵۰) np تعداد روزهای دارای آمار ، NP% درصد روزهای با هوای آلوده

۳-Global Data Assimilation System

۴-Global Telecommunications System

۵-Global Forecast System



شکل ۲: نمودار تغییرات سالانه تعداد روزهای با هوای آلوده شهر مشهد

جهت فراهم نمودن درک مناسب تری از وضعیت حاکم در روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷، فراوانی ماه به ماه تعداد روزهای آلوده در شهر مشهد در کنار تغییرات روزانه آلودگی هوادر ماه نوامبر سال یادشده در جدول ۲ نشان داده شده است. باتوجه به جدول ۳ ماه نوامبر با ۱۳ روز آلوده، بیشترین تعداد را نسبت به ماههای دیگر دارا می باشد.

جدول ۲: تعداد روزهای آلوده در طی ماههای سال ۲۰۰۷

آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس
۰	۱	۱	۰	۲	۱	۰	۱۳	۲	۰	۴	۵

و بررسی تعداد روزهای دارای آلودگی حدی در طی ماه های نوامبر در طی هفت سال هم نشان دهنده این است که ماه نوامبر ۲۰۰۷ دارای بیشترین تعداد روزهای آلوده می باشد. (جدول ۳)

جدول ۳: تعداد روزهای آلوده ماه نوامبر سالهای ۲۰۰۵-۲۰۱۱

نوامبر ۲۰۰۵	نوامبر ۲۰۰۶	نوامبر ۲۰۰۷	نوامبر ۲۰۰۸	نوامبر ۲۰۰۹	نوامبر ۲۰۱۰	نوامبر ۲۰۱۱
۵	۰	۱۳	۱	۰	۰	۰

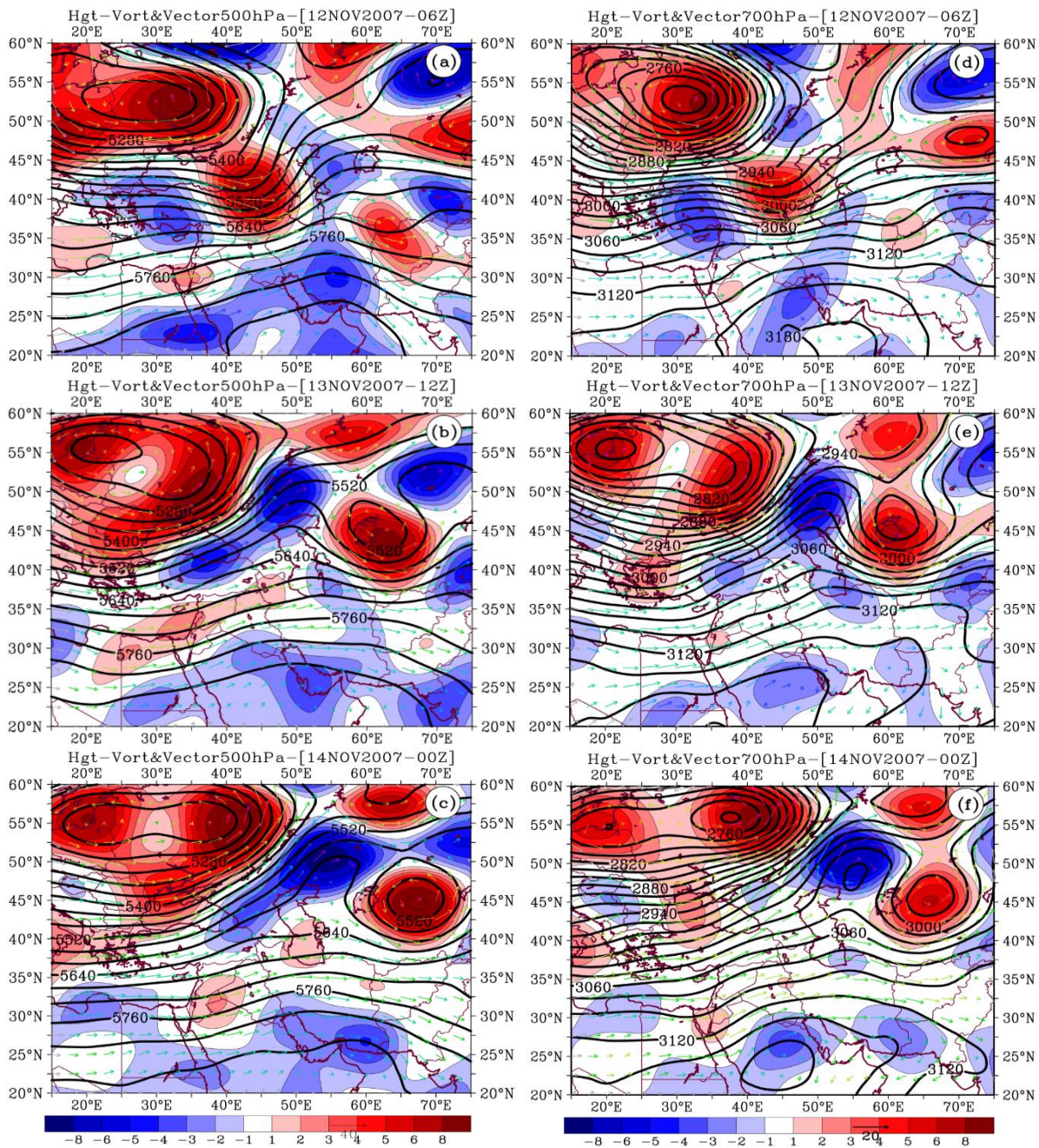
بنابراین باتوجه به اینکه پژوهش حاضر بررسی آلودگی حدی در دوره ۷ ساله می باشد، و چون سال ۲۰۰۷ بیشترین روزهای آلوده و دارای تداوم را به خود اختصاص داده است، بنابراین روزهای (۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷) به عنوان حادثه ترین روز آلوده انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت.

#### تحلیل همدیدی روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد

پس از بررسی وضعیت فشار، تلاوایی نسبی، مقادیر سرعت قائم، شدت و جهت جریان و مناطق همگرایی و واگرایی هوا در ترازهای مختلف جو، الگوهای همدیدی اولیه برای دوره مورد مطالعه شناسایی شد. اما به جهت فراهم نمودن درکی عمیق تر از ساختار گردش جو، علاوه بر مؤلفه های یاد شده، داده های جو بالا، و خروجی های مدل HYSPLIT نیز مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه و تحلیل ترکیبی تمامی مؤلفه های فوق، در نهایت سبب شناسایی الگوی گردشی روزهای آلوده در شهر مشهد گردید. الگوی به دست آمده برای روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ الگوی پرفشار مهاجری باشد. در این الگو افزایش بیش از حد غلظت آلاینده ها در شهر مشهد، عمدتاً نتیجه گسترش نصف النهاری امواج

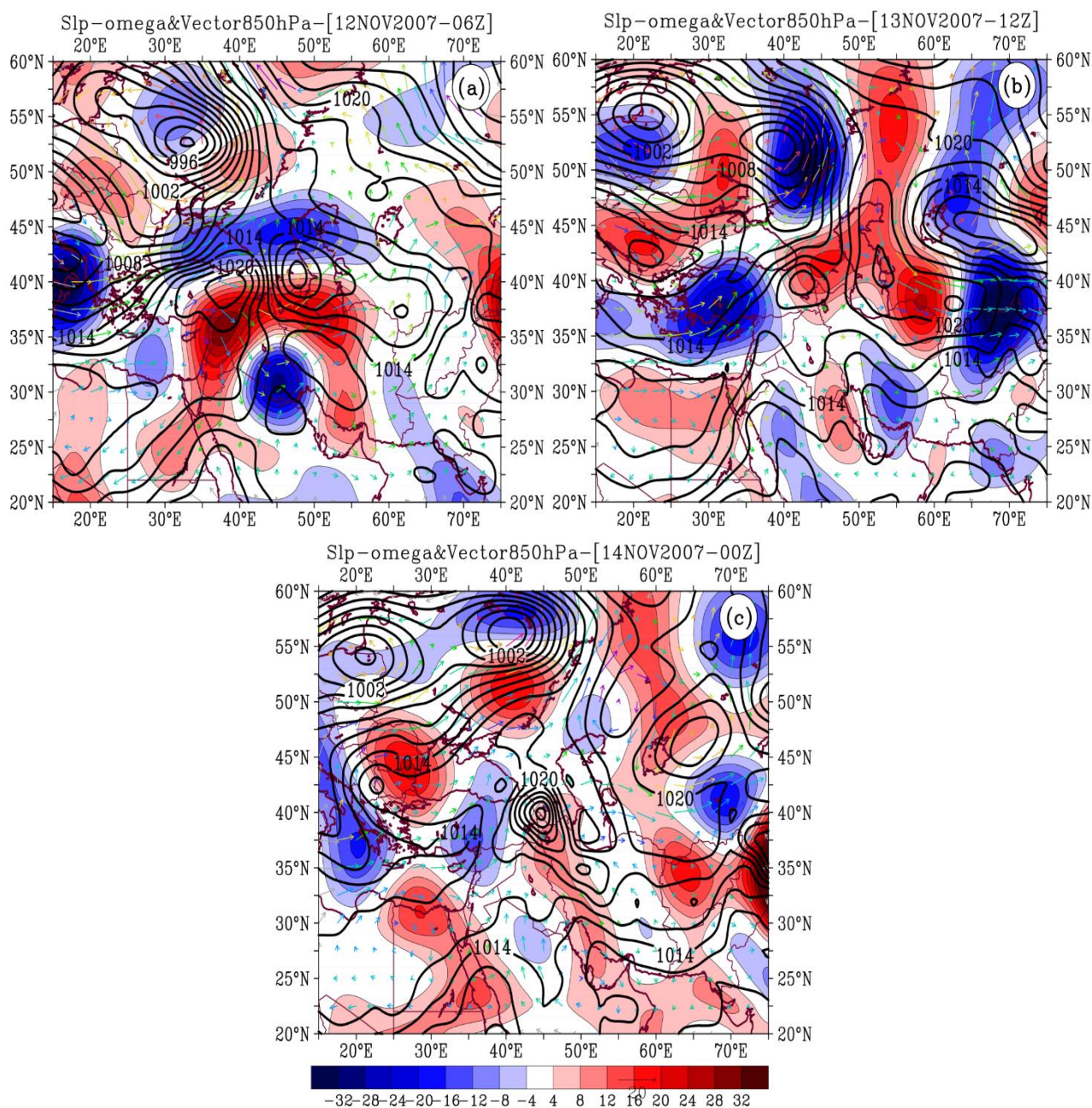
غربی در منطقه اوراسیا بوده است. در چنین شرایطی و در مراحل عبور موج از روی منطقه، استقرار پشته ای قوی در محدوده رشته کوه های اورال و دریای خزر با یک اریب شرق سو، شکل گیری مرکز گردش و اچرخندی را در حدفاصل دریای خزر تا بخش های شمالی خراسان در ترازهای زیرین به همراه داشته، که در نهایت موجب پایداری هوا و افزایش غلظت آلاینده ها در منطقه گردیده است. با توجه به بررسی نقشه های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از یک روز قبل از روزهای آلوده تا یک روز بعد در الگوی پرفشار مهاجر، یک ناوه نسبتا عمیق همراه با کم ارتفاع بریده در محدوده شرق اروپا و دریای سیاه تسلط یافته که در جانب راست خود و بر روی نیمه شرقی دریای خزر با گسترش یک پشته همراه گردیده است. (شکل های ۳a و ۳b). پشته شرق خزر به واسطه گسترش شمال سوی پر ارتفاع جنب حاره بر روی منطقه خاورمیانه و یکی شدن آن با پشته یاده شده، یک محدوده گردش و اچرخندی گسترده را در ترازهای میانی جو در روز ۱۲ نوامبر بر روی بخشهای وسیعی از ایران ایجاد نموده است. استقرار این پشته جنب حاره ای و پشته شرق خزر سبب نزول گسترده هوا در بخش های وسیعی از شمال ایران و غرب خاورمیانه گردیده است (شکل ۴a). به طور همزمان شکل گیری یک ناوه همراه با گردش چرخندی در محدوده شرق دریاچه آرال سبب تشکیل یک سامانه کم فشار در این محدوده و در شرق پشته شده است (شکل ۳d). نکته دیگری که از نقشه های تراز میانی برای روز ۱۲ نوامبر می توان اشاره نمود این است که منطقه شمال شرق کشور در این روز در شرایط انتقال از حالت گردش چرخندی به حالت گردش و اچرخندی بوده است. به این معنی که در ساعات اولیه روز ۱۲ نوامبر نفوذ ناوه دریاچه آرال سبب تسلط یک گردش چرخندی در منتهی الیه شمال شرق کشور گردیده است (شکل ۳a، ۳d) که در طی ساعات بعد از ظهر به جهت تقویت پشته روی دریای خزر و گسترش شرق سوی آن، منطقه شمال شرق ایران به تدریج گردش و اچرخندی را تجربه نموده است. در ساعات اولیه روز ۱۳ نوامبر تقویت قابل ملاحظه پشته موج غربی و تداوم گسترش شمال سوی پرفشار جنب حاره ای سبب تسلط گردش و اچرخندی بر روی تمامی مناطق واقع در حدفاصل دریای سیاه و دریای خزر و مناطق شمال و شمال شرق ایران گردیده است. (شکل ۳b، ۳e) در این زمان به واسطه تسلط گردش و اچرخندی و شکل گیری یک مرکز پرفشار در حدفاصل دریای خزر و شمال شرق ایران (شکل ۴b) تمامی مناطق واقع در شمال شرق ایران، منطقه دریای خزر تا کوه های اورال یک نزول قوی در ترازهای زیرین جو را تجربه نموده اند (شکل ۳b). این امر سبب پایداری هوا در محدوده مورد مطالعه و شهر مشهد (تفی گرام ۱۳ نوامبر شکل ۶b) گردیده است. در واقع استقرار پشته مهاجر موج غربی و نزول دینامیکی ناشی از آن، ضمن ایجاد پایداری هوا غلظت بالای آلاینده های جو را در مشهد به دنبال داشته است. نکته قابل ذکر آن که تقویت و گسترش شمال سوی پشته سبب تقویت گردش چرخندی مستقر بر روی دریاچه آرال شده است و به طور همزمان یک مرکز کم ارتفاع بسته را در عرض های بالاتر و در شرق پشته و در آسیای مرکزی شکل داده است که به واسطه گسترش پشته موج غربی اثرات آن بر روی شمال شرق

ایران ناممکن شده است (شکل ۳b). نتیجه تسلط چنین شرایطی استقرار یک مرکز پرفشار با هم فشار بسته ۱۰۲۲ هکتوپاسکال بر روی منطقه شمال شرق ایران است که با مقادیر امگای حدود ۰.۳۰ پاسکال بر ثانیه در این منطقه همراه شده است (شکل ۴b).



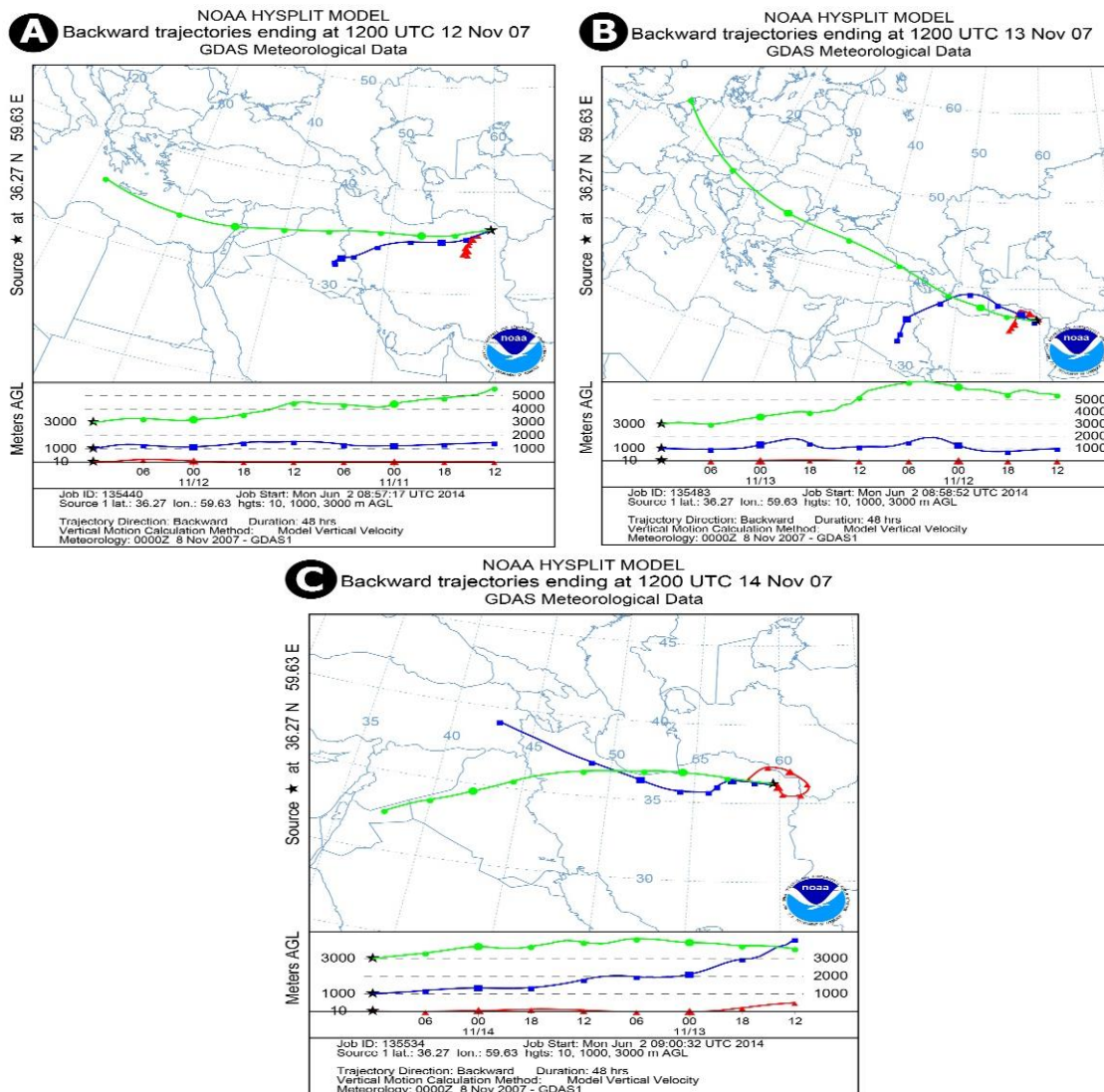
شکل ۳) وضعیت همدیدی در الگوی پرفشار مهاجر برای ساعات مختلف روزهای آلوده. ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتورها با حداقل ۲۵ ژئوپتانسیل متر)، ناوایی نسبی (رنگ ها  $10^{-4} s^{-1}$ ) و باد برداری (پیکان های سبز رنگ) در تراز ۵۰۰ (سمت چپ) و تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (سمت راست).

شرایط یادشده در تمامی ساعات روز ۱۳ نوامبر بر روی شمال شرق ایران حاکم بوده و در روز ۱۴ نوامبر تداوم یافته است که در این روز همانطوری که شکل ۳f,c نشان می دهند پشته مهاجر موج غربی همچنان در ترازهای میانی بر روی منطقه استقرار داشته و همین امر تداوم گردش و اچرخندی و در پی آن تداوم فشار بالا و نزول هوا در محدوده شمال شرق کشور را رقم زده است (شکل ۴c). این امر تداوم پایداری و وارونگی دما را در شهر مشهد در پی داشته که غلظت بالای آلاینده ها را نیز برای دو روز متوالی سبب گردیده است.



شکل ۴) وضعیت فشار در تراز دریا و سرعت قائم در الگوی پرفشار مهاجر، (a) ۱۲ نوامبر ۲۰۰۷، (b) ۱۳ نوامبر ۲۰۰۷ و (c) ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷

در ردیابی پسرگرد ذرات معلق در مدل HYSPLIT، بیانگر الگوی مشابهی از مسیر ذرات در سه ارتفاع ۱۰۰۰-۳۰۰۰ متری از سطح زمین می باشد. خط قرمز ارتفاع ۱۰ متری خط آبی ارتفاع ۱۰۰۰ متری و در نهایت خط سبز ارتفاع ۳۰۰۰ متری را نشان می دهد. در واقع خروجی های مدل برای این الگو، تسلط جریانات و اچرخندی را در مسیر حرکت ذرات در منطقه شمال شرق ایران نشان می دهد. تسلط پشته جنب حاره ای در محدوده مرکزی ایران تا شمال دریای خزر سبب گردیده تا در روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ذرات یک مسیر شرق - جنوب شرقی را برای رسیدن به مشهد طی نمایند (شکل ۵).

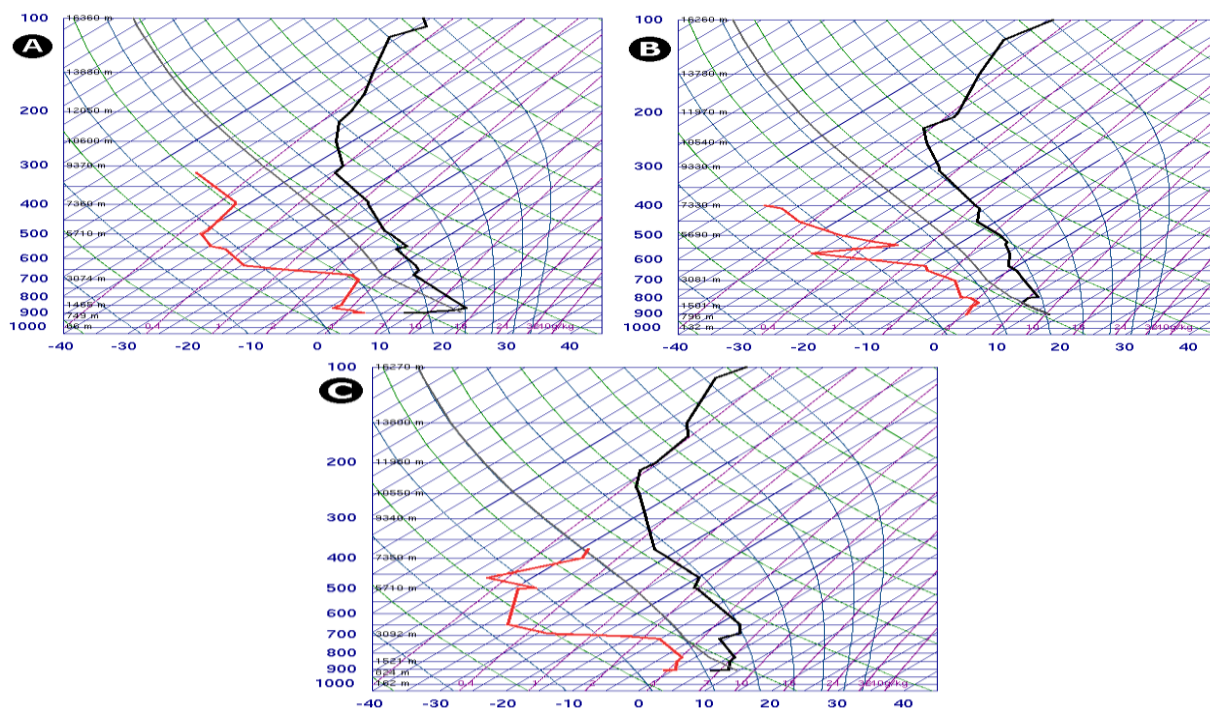


شکل ۵) ردیابی ذرات معلق به روش پسرگرد برای الگوی پرفشار مهاجر برای روزهای (a) ۲ نوامبر (b) ۳ نوامبر و (c) ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷. ذرات در شهر مشهد برای ارتفاع ۱۰ متری (خط قرمز) و ۱۰۰۰ متری (خط آبی) و ۳۰۰۰ متری (خط سبز) از سطح زمین از زمان اوج آلودگی تا ۴۸ ساعت قبل در حواصل زمانی ۶ ساعت ردیابی شدند.

#### - تحلیل ترمودینامیک روزهای بسیار آلوده

بررسی ساختار گردش جو در مقیاس همیدی برای روزهای بسیار آلوده در شهر مشهد منجر به تشخیص الگوی پرفشار مهاجر گردید. در این بخش از تحقیق با استفاده از داده های جو بالای ایستگاه

مشهد (داده های رادیوسوند) و بهره گیری از برخی داده های مکمل، ویژگی های ترمودینامیکی جو در روزهای بسیار آلوده برای الگوی پرفشارمهاجر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بخش می تواند درکی عمیق تر از ساز و کار حاکم بر آلودگی های حادی در شهر مشهد فراهم نماید. (شکل ۶) وضعیت پایداری و ناپایداری جو و نوع و ارتفاع لایه وارونگی را در نمودارهای اسکیوتی برای ایستگاه جو بالای مستقر در فرودگاه مشهد نشان می دهد. بررسی نمودارهای اسکیوتی مربوط به الگوی پرفشار مهاجر ساختار متفاوتی را در نیمرخ قائم نمایان می سازد. بدین معنی که درتقی گرام روز ۱۲ نوامبر مشاهده یک وارونگی تشعشی قوی در روز قبل از وقوع آلودگی هستیم. (شکل ۶a) در این روز با توجه به منحنی های دما، افزایش دما در پایین ترین ترازهای جو در زیر تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مواجه هستیم. این در حالی است که در ترازهای بالاتر وارونگی مشخص و برجسته ای در این روز مشاهده نمی گردد. در روز ۱۳ نوامبر وارونگی تیپ تشعشی (وارونگی محلی) ناپدید گردیده و در عوض یک وارونگی از نوع فرونشستی در حداقل تراز ۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال ظاهر گردیده است. (شکل ۶b) وقوع این تیپ وارونگی به خوبی استقرار پشته برون حاره را بر روی منطقه شمال شرق ایران و شهر مشهد توضیح می دهد. در روز ۱۴ نوامبر وارونگی فرونشستی روز گذشته به بالاتر از تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال جابجا شده و در عین حال یک وارونگی فرونشستی دیگر نیز بالاتر از تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ظاهر گردیده است. مضاف بر این، در مجاورت سطح زمین یک وارونگی تشعشی نیز مشاهده می شود (شکل ۶)



شکل ۶) نمودارهای اسکیوتی-logP (لگاریتمی فشار) برای ایستگاه رادیوسوند مشهد برای الگوی پرفشار مهاجر در ساعت ۰۰۰ گرینویچ. در تمامی نمودارها، خط های ضخیم سیاه و قرمز به ترتیب معرف دمای هوا و دمای نقطه شبنم می باشند. (<http://weather.uwyo.edu>)

### نتیجه گیری

در تحقیق حاضر نقش گردش منطقه ای جو و الگوهای فشاردر مقیاس همیدی در روزهای بسیار آلوده نوامبر ۲۰۰۷ در کلانشهر مشهد مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا سازوکار حاکم بر وقوع دوره آلوده بسیار شدید در این شهر با بهره گیری از یک روش ترکیبی مبتنی بر تحلیل های همیدی، ترمودینامیک و ردیابی پسگرد ذرات معلق، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بررسی های انجام شده یافته های زیر را در پی داشته است: -روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ (۲۲ و ۲۳ آبان ۱۳۸۶) درمیان روزهای آلوده مشهد بالاترین مقدار غلظت را نشان می دهد. -یافته های تحقیق نشان داد که الگوی همیدی حاکم دوره بسیار آلوده (۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷) الگوی پرفشار مهاجر می باشد. بر این اساس، می توان چنین نتیجه گیری نمود که بروز آلودگی های حدی در مشهد بیش از آن که ریشه در عوامل محلی داشته باشد، حاصل برهمکنش شرایط محلی با گردش جو در مقیاس منطقه ای است. به عبارتی، شهر مشهد تنها زمانی روزهای بسیار آلوده را تجربه خواهد نمود که گردش منطقه ای جو شرایط مناسب برای افزایش غلظت آلاینده ها را فراهم نماید. آنچه مسلم است اینکه در دوره سرد، آلودگی های حدی ایجاد شده در شهر مشهد عمدتاً ناشی از تسلط سامانه های برون حاره ای (واچرخندهای مهاجر) می باشد. بررسی توامان تحلیل همیدی دستی، ردیابی پسگرد ذرات معلق و بررسی شرایط ترمودینامیک جو (رویکرد تحلیل همیدی ترکیبی)، درکی عمیق تر و درعین حال دقیق تر از شرایط حاکم بر وقوع آلودگی های حدی در شمال شرق ایران فراهم نموده است. در بررسی خروجی مدل HYSPLIT بیانگر آن است که سامانه پشته مهاجر موج غربی همراه با پشته جنب حاره ای الگوی جریان هوا بر روی شمال شرق ایران در روزهای ۱۳ و ۱۴ نوامبر ۲۰۰۷ کنترل می نماید. مسیر یابی ذرات تسلط یک سامانه واچرخندی را بر روی منطقه نشان می دهد. بررسی نمودارهای اسکینوتی مربوط به الگوی پرفشار مهاجر نیز ساختار متفاوتی را نمایان ساخت به این صورت که روز ۱۲ نوامبر ۲۰۰۷ با یک وارونگی تشعشی که همراه با افزایش دما بود مواجه گردید و در عوض در روز ۱۳ نوامبر یک وارونگی از نوع فرونشستی در حد فاصل تراز ۸۵۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال ظاهر گردیده و تا بالاتر از تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز رسید.

### منابع

- انتظاری، علیرضا. ۱۳۸۴. مطالعه آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای تهران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-گرایش اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- بیدختی، عباسعلی؛ زهراشعری پور. ۱۳۸۸. شرایط هواشناختی جو بالا و وضعیت حاد آلودگی هوا (مطالعه موردی: شهر تهران)، محیط شناسی، ۵۲: ۱۴-۱.
- جهانشیری، مهین. ۱۳۸۹. بررسی آماری و سینوپتیکی آلودگی هوای مشهد، پایان نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی-اقلیم شناسی، به راهنمایی علیرضا انتظاری، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار ۵۳-۵۲.

- حجازی جویباری، آزاده. ۱۳۸۷. بررسی آلودگی هوا و ارزیابی کیفیت هوا در اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، به راهنمایی اسماعیل حسن زاده، دانشگاه اصفهان، اصفهان.
- حسین پور، زینب. ۱۳۹۰. تحلیل همدیدی آلودگی هوای شهر تهران با تاکید بر ذرات معلق پایان نامه کارشناسی ارشد جغرافیای طبیعی-اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران به راهنمایی علی اکبر شمسی پور ۲۳-۲۵.
- روزنامه شهرآرا. ۱۳۹۱. طرح جامع کاهش آلودگی هوای مشهد؛ دستورالعمل هست، بودجه نیست! دوشنبه ۲۲ مهر، شماره ۹۶۹، ۲.
- رنجبر سعادت آبادی، عباس؛ لیلیا محمدیان. ۱۳۸۹. مطالعه میانگین الگوهای همدیدی بر اساس رخداد غلظت های مختلف آلاینده CO در فصول تابستان و پائیز در تهران، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۷۲: ۱۱۱-۱۲۸.
- سایت تابناک. ۱۳۹۱. مصاحبه با مشاور وزیر بهداشت جناب آقای آقاجانی، گزارش شماره ۲۹۵۷۶۷: ۱۶ دی ماه ۱۳۹۱، (http://www.tabnak.ir/fa/news/۲۹۵۷۶۷).
- صفوی، یحیی؛ بهلول علیجانی. ۱۳۸۵. بررسی عوامل جغرافیایی در آلودگی هوای تهران. مجله پژوهش های جغرافیایی، ۵۸: ۹۹-۱۱۲.
- صادقی، سلیمان؛ عباس مفیدی، مهین جهانشیری، رضادوستان. ۱۳۹۳. نقش گردش مقیاس منطقه ای جو بر وقوع روزهای دارای هوای بسیار آلوده در شهر مشهد، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره دهم، تابستان ۹۳: ۱۰-۱۱.
- عزتیان، ویکتوریا. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر عوامل هواشناسی بر روی شاخص کیفیت هوا در شهر اصفهان، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-اقلیم شناسی، گروه جغرافیای دانشگاه اصفهان به راهنمایی جواد خوشحال دستجردی.
- عطایی، هوشمند؛ سادات هاشمی نسب. ۱۳۹۰. شناسایی و تجزیه و تحلیل الگوهای تراز میانی جو مؤثر در آلودگی هوای شهر اصفهان، مجله پژوهش و برنامه ریزی شهری، ۲ (۴): ۹۷-۱۱۲.
- علیجانی، بهلول. ۱۳۸۱. اقلیم شناسی سینوپتیک، انتشارات سمت، ۲۰-۵.
- علیجانی، بهلول. ۱۳۸۲. شناسایی تیپ های هوایی مؤثر بر آلودگی هوای تهران، سومین کنفرانس منطقه ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، ۲۹ مهر تا ۱ آبان، دانشگاه اصفهان.
- علیجانی، بهلول. ۱۳۸۴. رابطه بین توزیع فشار و تراکم آلاینده ها در تهران، پژوهش های جغرافیایی، علیجانی، بهلول؛ زهرانجفی نیک. ۱۳۸۸. بررسی الگوهای سینوپتیکی اینورژن در مشهد با استفاده از تحلیل عاملی، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه ای، ۱۲: ۱-۱۲.
- علیجانی، بهلول؛ عباس مفیدی؛ زین العابدین جعفرپور؛ علیرضا بیدختی. ۱۳۹۰. الگوهای گردش جو بارش های تابستانه جنوب شرق ایران در ماه جولای ۱۹۹۴، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۷ (۳): ۲۰۵-۲۲۷.
- علیجانی، بهلول. (۱۳۸۲)، شناسایی تیپ های هوایی مؤثر بر آلودگی هوای تهران، سومین کنفرانس منطقه ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم، ۲۹ مهر تا ۱ آبان، دانشگاه اصفهان.
- عزیزی، قاسم؛ علی اکبر شمسی پور؛ مجتبی مهدیان ماه فروری؛ مرتضی میری. ۱۳۹۲. تاثیرپذیری شدت جزیره گرمایی شهری تهران از الگوهای همدیدی جو، مجله محیط شناسی، دوره ۳۹، شماره ۴.
- فهیمی فرد، محمد؛ فهیمه افشار. ۱۳۸۹. بررسی و اندازه گیری آلودگی هوای شهر مشهد، دومین

- کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت شهری، ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت ماه، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴  
 قربانی، محمدعلی فیروز زارع. ۱۳۸۸. ارزش گذاری ویژگی‌های مختلف آلودگی هوا در مشهد، مجله  
 تحقیقات اقتصادی، ۸۹: ۲۴۱-۲۱۵.
- قسامی، طاهره؛ علیرضا بیدختی؛ عبدالله صداقت کردار؛ فاطمه صحرائیان. ۱۳۸۶. بررسی شرایط  
 همدیدی حاکم در چند دوره بحرانی آلودگی هوای شهر تهران، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۹  
 (۳): ۲۲۹-۲۳۸.
- کریمی، صادق. ۱۳۹۱. بررسی پیوند بین گردش اتمسفری در مقیاس همدید و تغییرات غلظت  
 ازون تروپوسفری در کلانشهر تهران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-اقلیم شناسی، گروه  
 جغرافیای دانشگاه سیستان.
- گلریز ضیائی، زهرا؛ حمیدصادقی؛ محمد معتمدی؛ میترا ژاله رجبی. ۱۳۹۰. پیش بینی، ارزش گذاری  
 و ترسیم نقشه آلودگی هوای شهر مشهد؛ مطالعه موردی گاز منوکسید کربن، اولین کنفرانس  
 اقتصاد شهری ایران، مشهد، ۲ و ۳ آذر ماه.
- گلباز، سمیه؛ مهدی فرزادکیا؛ مجید کرمانی. ۱۳۸۸. بررسی کیفیت بهداشتی هوای تهران  
 در سال ۱۳۸۷ با تکیه بر شاخص کیفیت هوا، فصلنامه سلامت کار ایران دوره  
 ۶، شماره ۴، زمستان ۸۸.
- لشکری، حسن؛ پرینا هدایت. ۱۳۸۵. تحلیل الگوی اینورژن شدید شهر تهران، پژوهش های  
 جغرافیایی، ۵۶: ۸۲-۶۵.
- مفیدی، عباس. ۱۳۸۶. تحلیل گردش جو تابستانه بر روی جنوب غرب آسیا و ارتباط آن با بارش  
 های تابستانه جنوب شرق ایران، رساله دکتری جغرافیای طبیعی-گرایش اقلیم  
 شناسی، دانشگاه تربیت معلم تهران، ۱۶۵.
- موسوی، محمد؛ سارا بحرپیمما؛ رضا رضازاده. ۱۳۸۲. بررسی آلودگی هوای ناشی از سه نیروگاه  
 موجود در شهر مشهد با استفاده از مدل گوس، چهارمین همایش ملی انرژی، کمیته ملی انرژی  
 جمهوری اسلامی ایران، تهران، ۹.
- منصوری، نبی الله؛ جواد علی نژاد. ۱۳۸۸. بررسی کارایی سیستم های کنترل کننده ذرات معلق و  
 تعیین میزان انتشار در کارخانجات آسفالت مشهد، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۱(۱): ۹-۱.
- مهندسان مشاور فرهنگ. ۱۳۸۷. طرح توسعه و عمران (جامع) کلانشهر مشهد مقدس؛ مطالعات پایه  
 محیط طبیعی، وزارت مسکن و شهرسازی، شهرداری مشهد، ۱۶۷.
- واتقی، الهه؛ منصوره زیبایی، (۱۳۸۷)، پیش بینی آلودگی هوای شیراز، محیط شناسی، سال سی و  
 چهارم، ۴۷: ۷۲-۶۵.

Air Weather Service, ۱۹۹۰. The Use of the Skew-T, log P Diagram in Analysis and Forecasting, Technical report,  
 AWS/TR-۷۹/۰۰۶, Scott Air Force Base, Illinois ۶۲۲۲۵-۵۰۰۸, ۱۶۴ pp.

Baker, J. ۲۰۱۰. A cluster of long range air transport pathway and associated pollutant concentration within the UK  
 .Atmospheric Environment., ۴۴: ۵۶۳-۵۷۱.

Cheng, C.S., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., Yap, D. ۲۰۰۷. A synoptic  
 climatological approach to assess climatic impact on air quality in south-central Canada, Part I: historical analysis,  
 Water, Air, and Soil Pollution, ۱۸۲: ۱۳۱-۱۴۸.

- Chen, Z.H., Cheng, S.Y., and Li, J.B., Guo, X.R., Wang, W.H., and Chen, D.S. ۲۰۰۸. Relation between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, *Atmos. Environ.*, ۴۲: ۶۰۷۸-۶۰۸۷.
- Cheng, W.L., Pai, J.L., Tsuang, B.J., and Chen, C.L. ۲۰۰۱. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan, *Meteorol. Atmos. Phys.*, ۷۸: ۱۱-۲۱.
- Comrie, A.C. ۱۹۹۰. The climatology of surface ozone in rural areas: a conceptual model. *Progress in Physical Geography*, ۱۴: ۲۹۵-۳۱۶.
- Comrie, A.C., and B. Yarnal. ۱۹۹۲. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania, *Atmos. Environ., Part B*, ۲۶: ۳۰۱-۳۱۲.
- Davis, R. E., Kalkstein, L. S. ۱۹۹۰. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations. *Phys. Geogr.*, ۱۱: ۳۲۰-۳۴۲.
- Davis, R.E., Normile, C.P., Sitka, L., Hondula, D.M., Knight, D.B., Gawtry, S.P., and Stenger, P.J. ۲۰۱۰. A comparison of trajectory and air mass approaches to examine ozone variability, *Atmos. Environ.*, ۴۴(۱): ۶۴-۷۴.
- Dayan, U., and Levy, I. ۲۰۰۲. Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel, *J. Geophys. Res.*, ۱۰۷(D۲۴): ۴۸۱۳, doi: ۱۰.۱۰۲۹/۲۰۰۲JD۰۰۲۱۴۷.
- Doswell, C. A., III, and E. N. Rasmussen. ۱۹۹۴. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Wea. Forecasting*, ۹, ۶۲۵-۶۲۹.
- Draxler R.R., and Rolph G.D. ۲۰۱۱. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Flocas, H. Kelessis, A. Helmis, C., Petrakakis, M., Zoumakis, M., and Pappas, K. ۲۰۰۹. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area, *Theor. Appl. Climatol.*, ۹۵(۳-۴): ۲۶۵-۲۷۷.
- Heidorn, K. C., and Yap, D. ۱۹۸۶. A synoptic climatology for surface ozone concentrations in southern Ontario (۱۹۷۶-۱۹۸۱), *Atmos. Environ.*, ۲۰: ۶۹۵-۷۰۳.
- Hu, Y., Chang, M.E., Russell, A.G., and Odman, M.T. ۲۰۱۰. Using synoptic classification to evaluate an operational air quality forecasting system in Atlanta, *Atmospheric Pollution Research*, ۱: ۲۸۰-۲۸۷, DOI: ۱۰.۵۰۹۴/APR.۲۰۱۰.۳۵.
- Kalkstein, L. S., Corrigan, P. R. ۱۹۸۶. A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers*, ۷۶: ۳۸۱-۳۹۵.
- Kalkstein, L.S., Nichols, M.C., Barthel, D.C., and Greene, S.J. ۱۹۹۶. A new spatial synoptic classification: Application to air-mass analysis, *Int. J. Climatol.*, ۱۶: ۹۸۳-۱۰۰۴.
- Kalnay, E., and ۲۱-Co-Authors. ۱۹۹۶. The NCEP/NCAR ۴۰-year reanalysis project, *Bull. Amr. Met. Soc.*, ۷۷: ۴۳۷-۴۷۱.
- Kistler, R., and ۱۶-Co-Authors. ۲۰۰۱. The NCEP/NCAR ۵۰-Year Reanalysis Project, *Bull. Amr. Met. Soc.*, ۸۲: ۲۴۶-۲۴۶.
- Lam, K. C., and S. Cheng. ۱۹۹۸. A synoptic climatological approach to forecast concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong, *Environ. Pollution*, ۱۰۱: ۱۸۳-۱۹۱.
- McGregor, G. R., and Bamzels, D. ۱۹۹۵. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom, *Theor. Appl. Climatol.*, ۵۱ (۴): ۲۲۳-۲۳۶.
- Moncrieff, M. W., and Miller, M. J. ۱۹۷۶. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, ۱۰۲: ۳۷۳-۳۹۴.

- National Weather Service Training Center (NWSTC). ۲۰۰۰. Skew-T, Log P Diagram and Sounding Analysis, RTM-۲۳۰, Kansas City, MO ۶۴۱۵۳, ۴۵ pp.
- Schwarzhoff, P.J., and Reid, P.D. ۲۰۰۰. Classification of meteorological patterns associated with the ozone categories in Kelowna, British Columbia, *J. Appl. Meteorol.*, ۳۹: ۴۶۳-۴۷۰.
- Sindosi, O.A, Katsoulis, B.D, and Bartzokas, A. ۲۰۰۳. An objective definition of air mass types affecting Athen, Greece; the corresponding atmospheric pressure patterns and air pollution levels, *Environmental technology*, ۲۴(۸): ۹۴۷-۹۶۲.
- Saadatabadi, A.R., Mohammadian, L., and Vazifeh, A. ۲۰۱۲. Controls on air pollution over a semi-enclosed basin, Tehran: A synoptic climatological approach, *Iranian Journal of Science & Technology*, A۴: ۵۰۱-۵۱۰.
- Sando, T.R. ۲۰۱۱. A climatology of air pollution in the Kansas city metropolitan area, M.A. thesis, Kansas State University, [http://krex.kstate.edu/dspace/bitstream/handle/۲۰۹۷/۱۱۹۸۷/ThomasSando\\_۲۰۱۱.pdf?sequence=۳](http://krex.kstate.edu/dspace/bitstream/handle/۲۰۹۷/۱۱۹۸۷/ThomasSando_۲۰۱۱.pdf?sequence=۳)
- Sheridan, SC. ۲۰۰۲. The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America. *Int. J. Climatol.*, ۲۲: ۵۱-۶۸.
- Stunder, B.J.B. ۱۹۹۷. NCEP Model Output -FNL ARCHIVE DATA, TD-۶۱۴۱, Prepared for National Climatic Data Center (NCDC). This document and archive grid domain maps are also available at <http://www.arl.noaa.gov/ss/transport/archives.html>.
- Shahgedanova, M., Burt, T.P., and Davies, T.D. ۱۹۹۸. Synoptic Climatology of Air Pollution in Moscow, *Theor. Appl. Climatol.*, ۶۱(۱-۲): ۸۵-۱۰۲.
- Wang, L.-L., Wang, Y.-S., and Li, Y.-Y. ۲۰۱۰. Synoptic typing and its application for evaluating climatic impact on air quality in Urumqi, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, ۳ (۶): ۳۱۲-۳۱۸.
- World Health Organization (WHO), ۲۰۱۱. The Top ۱۰ Most Air Polluted Cities in the World, written by M. L. Goldberg, UN Dispatch, ۲۶ Sep. ۲۰۱۱, Available at: <http://www.undispatch.com/the-top-۱۰-most-air-polluted-cities-in-the-world-are>.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA), ۱۹۷۸. Rapid techniques for calculating the pollutant standards index (PSI), EPA-۶۰۰/۴-۷۸-۰۰۲, ۶۸ pp.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA), ۱۹۹۸. Guideline for Reporting of Daily Air Quality-Pollutant Standards Index (PSI), EPA Draft, Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina ۲۷۷۱۱, ۲۸ pp.
- Yarnal, B. ۱۹۹۳. Synoptic Climatology in Environmental Analysis, Belhaven press, ۱-۱۸.
- Yarnal, B., Comrie, A.C., Frakes, B., and Brown, D.P., (۲۰۰۱), Developments and prospects in synoptic climatology, *Int. J. Climatol.*, ۲۱: ۱۹۲۳-۱۹۵۰.
- Yuen, C.Y., et al. ۱۹۹۸. Synoptic weather patterns associated with No<sub>x</sub> pollution episodes in Hong Kong urban areas, *Proceedings of the air & Waste management Association's Annual Meeting & Exhibition*, ۹p.
- Ziomas, I., Melas, D., and Zerefos, C.S. ۱۹۹۵. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables, *Atmos. Environ.*, ۲۹: ۳۷۰۳-۳۷۱۱. Case study: ۱۳<sup>th</sup> and ۱۴<sup>th</sup> of November, ۲۰۰۷.