

بررسی موردی بارش منطقه تهران متأثر از آلودگی ذره‌ای

سیدعلیرضا صادقی حسینی^{۱*} و سمیه ازوجی^۲

^۱ استادیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(دریافت: ۸۴،۸،۱۶، پذیرش نهایی: ۸۷،۴،۳)

چکیده

در این پژوهش، ارتباط فرایند بارش با آلودگی ذره‌ای در کلان‌شهر تهران بررسی شده است. این بررسی از دیدگاه پژوهشگران هواشناسی و محیط زیست از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای بر فرایند بارش در مناطق گوناگون تهران اعم از شمال (اقدسیه)، شمال غرب (ژئوفیزیک)، شرق (سرخه‌حصار)، غرب (مهرآباد) و به مرکزیت ایستگاه بازار بررسی شده است. این بررسی‌ها به دو صورت: در روزهای آلودگی در حد مطلوب (آلاینده‌های ذره‌ای کمتر از $100 \mu\text{gm}^{-3}$) و نامطلوب (آلاینده‌های ذره‌ای بیش از $100 \mu\text{gm}^{-3}$) در فصل‌های گرم و سرد در یک دوره ۵ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳) صورت گرفته است.

بررسی نقشه‌های هم‌باران - هم‌آلاینده، برای هر رویداد بارش در شرایط نامطلوب در فصل گرم و سرد روشن می‌سازد که با پخش آلودگی از مرکز شهر به سمت شمال شهر و در نتیجه کاهش غلظت آلاینده‌های ذره‌ای، بارش از مرکز شهر به سمت شمال شهر طی روز افزایش می‌یابد. میانگین کل بارش در ایستگاه‌های شمال شهر، به دلیل ارتفاع بیشتر، نسبت به مناطق مرکزی و غربی و شرقی بیشتر است. این میانگین‌ها در روزهای نامطلوب، از غرب به شرق کاهش و در روزهای مطلوب افزایش می‌یابد.

روند بارش در هر ایستگاه در فصل گرم و سرد در شرایط مطلوب افزایشی و در شرایط نامطلوب کاهشی است. از انطباق داده‌ها در روزهای مطلوب و نامطلوب و در فصول گرم و سرد می‌توان به وضوح مشاهده کرد که تا حد شرایط مطلوب با افزایش آلودگی، روند بارش نیز افزایش می‌یابد، که این احتمالاً به دلیل فرایند بارورسازی غیرعمدی ابر است. در شرایط نامطلوب با افزایش آلودگی و افزایش غلظت هسته‌های میعان ابر، روند بارش کاهشی می‌شود که این احتمالاً در اثر فرایند فرابارورسازی ابر است. در فصول گرم در اکثر ایستگاه‌ها میزان بیشینه بارش در شرایط مطلوب و نامطلوب اندکی بیشتر از فصول سرد سال است که علت عمده آن ضخامت بیشتر ابرها در فصول گرم و شدت بارش بیشتر از آنها است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی‌های ذره‌ای، روند بارش، هسته‌های میعان ابر، بارورسازی غیرعمدی ابر، فرابارورسازی ابر

Case studies of the impact of particle pollutants on precipitation over the Tehran area

Sadeghi-Hosseini, A. R¹. and Azojy, S².

¹Assistant professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

²M. S. student of meteorology, Faculty of Basic Sciences, Islamic Azad University, Science of Research Branch, Tehran, Iran

(Received: 7 Nov 2008, Accepted: 23 June 2008)

Abstract

Investigations in recent decades have shown an unexpected increase in aerosol concentrations in metropolitan and industrialized regions. It was sometimes followed by heat islands and probably decreases in precipitation due to an inadvertent cloud

overseeding process.

Particle pollutants act like small cloud condensation nuclei in which they form large collections of small droplets in cloud. Collision coalescence efficiency of tiny droplets is decreased and the following formation of rain drops elapsed. In a similar way in mixed clouds the formation of ice crystal precipitation due to a reduction in the accretion aggregation the process of small crystals was dilating.

The relationship between precipitation and particle pollutants in Tehran as a metropolitan area has been investigated. This study plays an important role for meteorologists and environmental researchers.

The influence of particle pollutant on the precipitation process in various regions of Tehran including northeast (Aghdasie), northwest (Geophysics), east (Sorkhe hesar), west (Mehr Abad) and the center (Bazaar) has been studied. These investigations have been carried out in two ways: desirable days (particle pollutants less than $100 \mu\text{gm}^{-3}$) and undesirable days (particle pollutants more than $200 \mu\text{gm}^{-3}$) in warm and cold seasons over a period of 5 years (1999-2003).

The analysis of isohypse/particle pollutant isograms in undesirable conditions for each precipitation event shows that in both warm and cold seasons the amount of precipitation during the day increases from downtown toward the north of the city, due to the decrease of particle pollutant concentrations.

The average of precipitation in the northern stations is higher than the central, western and eastern stations due to their higher elevations. This average on undesirable days decreases from West to east and increases on desirable days. The precipitation trend increases for all stations in desirable conditions in warm and cold seasons and decreases in undesirable conditions.

A study of all data on desirable and undesirable days in cold and warm seasons shows that, in desirable conditions the precipitation trends increase, probably due to inadvertent cloud seeding. In undesirable conditions due to an increase in particle pollutants as cloud condensation nuclei (CCN), the precipitation trends decrease probably due to cloud over seeding.

A majority of stations in the warm season shows that the maximum value of precipitation on desirable and undesirable days is slightly more than its value in the cold season, mainly due to the greater thickness of clouds and more precipitation intensity than in warm the season.

Key word: Particle pollutants, Precipitation trend, Cloud condensation nuclei (CCN), Inadvertent cloud seeding, Cloud over seeding

۱ مقدمه

ساختند، نخستین پژوهش از این دست است. نتایج این بررسی‌ها در مجله هواشناسی کاربردی (Journal of Applied Meteorology) درج شد. در اکثر این پژوهش‌ها تغییر اقلیم مناطق شهری نسبت به حومه از نظر دما، تابش، رطوبت و بارش در دوران قبل از صنعتی شدن و بعد از آن مورد بررسی قرار گرفته است. طبق بررسی‌های صورت گرفته در چند دهه اخیر،

بررسی ترکیب هوای کلان‌شهرها و مقایسه آن با حومه و مناطق کم‌جمعیت در نیم قرن اخیر به سرعت گسترش یافته است، به گونه‌ای که بررسی‌های زیادی در این مورد در مجله‌ها و کتاب‌ها به چشم می‌خورد. این تحقیقات اغلب در کشورهای صنعتی اروپا و آمریکا صورت گرفته است. طرح جهانی مترومکس (Metromex) که چنگنون در سال ۱۹۷۹ و آکرمن و همکاران در ۱۹۷۸ آن را عملی

شهرهای آلوده جهان با جمعیتی بیش از ۱۰ میلیون نفر انتخاب شده است و تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای روی بارش آن در دوره‌ای ۵ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳) و در حوزه ایستگاه‌های مناطق متفاوت شهری مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی کوشش شده تا الگویی برای تعیین روند بارش در هر ایستگاه برحسب میزان آلودگی ذره‌ای در فصول متفاوت گرم و سرد ارائه شود.

۲ مبانی نظری

هوامیزهای آلاینده همانند هسته‌های میعان کوچک ابر عمل می‌کنند، که تجمع بزرگی از قطره‌های کوچک، ابر را شکل می‌دهند. این فرایند به‌طور منظم احتمال همامیزی و برخورد قطره‌ها و فرایند تشکیل قطرات باران را کاهش می‌دهد و به همین شکل نیز براساس فرایند بلور یخ، بارش یخی کاهش می‌یابد (روزنفلد، ۲۰۰۰). در نتیجه زمان برای تبدیل آب محتوی ابر به قطره‌هایی به اندازه بارش، طولانی‌تر می‌شود و رشد پخشی قطره‌های موجود در ابر به دلیل تجمع زیاد هسته‌های میعان ابر (CCN) و غلظت زیاد قطره‌ها، کاهش می‌یابد.

بوریز و همکاران (۲۰۰۳) روشن ساختند که اضافه شدن مقدار $1 \mu\text{g m}^{-3}$ هوامیز زیست‌محیطی به محیط با زمینه پاک، می‌تواند آهنگ ریزش برف کوهساری را در کوه‌های راکی تا ۵۰٪ کاهش دهد. با بررسی‌هایی که خین و همکاران (۱۹۹۹)، با غلظت‌های گوناگون هوامیز روی ابر صورت دادند به این نتیجه رسیدند که هر چه غلظت هوامیز بیشتر شود، قطرک‌های ابر کوچک‌تر می‌شوند و در نتیجه آهنگ شکل‌گیری قطره باران به تأخیر می‌افتد.

نوبر و همکاران (۲۰۰۲)، پی بردند که آهنگ تبدیل آب ابر به بارش بستگی به دما و غلظت قطرک‌های پایه ابر دارد. اگر دما بیش از ۲۶۳ کلوین و غلظت قطرک‌ها بیش از 750 cm^{-3} باشد، شکل‌گیری بارش ۲۵٪ نسبت به مقدار

افزایش آلودگی هوای کلان شهرها و مناطق صنعتی، موجب افزایش بیش از حد غلظت هوامیزها در جو و کاهش مقدار بارش در ابرهای همرفتی به دلیل ایجاد جزیره گرمایی و فرایند فراباورسازی ابر شده است. (مارشال شفر، ۲۰۰۵). خین و همکاران (۲۰۰۵)، در تحقیق میدانی و شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی متوجه شدند که ابرهای قاره‌ای تحت تأثیر هوامیزهای ریز قاره‌ای نسبت به ابرهای دریایی که تحت تأثیر هسته‌های نمک درشت‌تر قرار دارند، دارای جریان‌های بالاروی قوی‌تری هستند. بنابراین ابرهای قاره‌ای همگرایی قوی‌تری در لایه مرزی ایجاد می‌کنند که این اغلب به ایجاد خط تندوزه منجر می‌شود. در نتیجه هوامیزهای قاره‌ای می‌توانند گرمایش خالص جو و توزیع قائم آن و ضخامت ابر و بارش و پوشش ابری را تحت تأثیر قرار دهند و در حرکات جو و توازن تابشی نقش اساسی داشته باشند.

به تازگی نیز در یک پژوهش که یانگ سانگ و همکاران (۲۰۰۷)، به انجام رساندند اثر متقابل ذرات شناور زیست‌محیطی بر شرایط هواشناسی لایه مرزی روی چین بررسی شده است. در این پژوهش مشاهده شد که ذرات زیست‌محیطی با قطر بزرگ‌تر از ۱۰ میکرومتر در مناطقی که دارای واریانس بیشتری از غلظت و جرم این ذرات است واریانس وقوع بیشتری از تشکیل ابر و بارش در سطح هزار میلی بار وجود دارد.

در ایران نیز پژوهش‌هایی در این مورد صورت گرفته است که از جمله می‌توان به مقاله "تأثیر توسعه شهرنشینی بر روی فرایند بارش در تهران" صادقی حسینی و راحلی سلیمی (۱۳۸۱) اشاره کرد که براساس آن از سال ۱۹۷۵ به بعد که تهران درحکم یک شهر صنعتی مطرح شد و با افزایش تعداد رویدادهای غبار مه‌دود، بارش‌های محلی در تهران کاهش یافته است، که این می‌تواند دلیلی بر افزایش شدید آلودگی و در نتیجه احتمالاً فرایند فراباوروی باشد. در این پژوهش کلان‌شهر تهران در مقام یکی از

اولیه خود کاهش می‌یابد.

لوهمن (۲۰۰۴) آهنگ کاهش ریزش برف را براساس مکان هندسی جمع‌آوری قطره‌ها و تأثیر هوامیزها روی برف اندازه‌گیری کرد و به این نتیجه دست یافت که اگر نسبت شعاع قطره و قطرک جمع‌آوری شده از حدود ۰/۶ بیشتر شود کارایی جمع‌آوری قطره و قطرک کاهش می‌یابد. به این ترتیب مکان هندسی جمع‌آوری قطرک و هوامیز افزایش می‌یابد، قطر قطره‌های ابر و اندازه بلور برف رو به کاهش می‌یابد و در نتیجه آهنگ ریزش برف کاهش می‌یابد.

گیواتی و روزنفلد (۲۰۰۴) با بررسی‌هایی که در مورد کاهش بارش روی مناطق ساحلی کالیفرنیا و فلسطین اشغالی انجام رساندند به این نتیجه رسیدند که روند کاهش بارش مربوط به شهرها و مناطق صنعتی در بادسوی باد است و همچنین کاهش بارش در ابرهای کم‌عمق معمولاً در توده‌های هوای سرد چرخندی اتفاق می‌افتد که آلودگی را از لایه مرزی می‌گیرد. کاهش بارش در جهت فراشیب کوه اتفاق می‌افتد در صورتی که در سراشیب کوه با افزایش بارش همراه است. براساس ملاک‌های موجود هوامیزهای آلاینده هوا که وارد ابرهای کوهساری می‌شوند باعث کاهش سرعت هم‌آمیزی قطرک‌های ابر و برفک‌زنی در بارش‌های یخی می‌شوند. این پژوهش‌ها نشان دادند که غلظت زیاد هوامیزهای محیطی می‌توانند بین ۱۵ تا ۲۵ درصد مقدار بارش سالانه در این مناطق را کاهش دهند.

۳ روش تحقیق

از آن جا که تهران بزرگ پایتختی با بافت نسبتاً صنعتی و پرجمعیت است، انتظار می‌رود که میزان آلاینده‌ها در این شهر با رشد جمعیت افزایش یابد و این تحول باعث ایجاد تغییراتی در عنصر هواشناختی بارش شود.

آلاینده مورد نظر در این پژوهش ذرات شناور با

واحد اندازه‌گیری میکروگرم ذره بر مترمکعب هوا است. ایستگاه‌های آلودگی سنجی و هواشناسی که این آلاینده‌ها و بارش در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شوند در نقاط متفاوت تهران اعم از شمال (اقدسیه)، شمال غرب (ژئوفیزیک)، شرق (سرخه‌حصار)، غرب (مهرآباد) و به مرکزیت ایستگاه بازار قرار دارند. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر آلودگی ذره‌ای مناطق متفاوت تهران بر بارش منطقه در یک دوره ۵ ساله از ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ است. به این منظور ایستگاه بازار درحکم ناحیه مرکزی تهران انتخاب شد و براساس استاندارد سازمان محیط‌زیست (جدول ۱) روزهایی که مقدار این آلاینده‌ها از $200 \mu\text{gm}^{-3}$ بیشتر بود به‌مثابه روزهای نامطلوب انتخاب شد. به همین ترتیب طی همان سال‌های آماری روزهایی که بازار از نظر محیط‌زیست در نقش روز مطلوب (آلاینده‌های ذره‌ای کمتر از $100 \mu\text{gm}^{-3}$) شناخته شد نیز انتخاب شد (جدول ۱).

پس از جمع‌آوری اطلاعات از مقادیر آلودگی در حد مطلوب و نامطلوب، داده‌های مربوط به میزان بارش روزانه بلافاصله پس از این رویدادها نیز دریافت شد.

جدول ۱. استاندارد سنجش شرایط متفاوت کیفیت هوا (سازمان محیط زیست).

وضعیت	پاک	سالم	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک
PSI	۰-۵۰	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۳۰۰
	مطلوب		نامطلوب		

۴ تحلیل داده‌ها و بحث نتایج

با توجه به موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها و مقایسه روزهای آلوده نامطلوب و مطلوب نمودارهای هم‌آلودگی-هم‌باران و نمودارهای روند تغییرات بارش بر اساس آلودگی ذره‌ای در ایستگاه‌های متفاوت تهران طی

روزهای مشخص شده در مدت آماری ۵ ساله رسم و تحلیل می‌شوند.

۱-۴ بررسی نقشه‌های هم‌آلودگی - هم‌باران

ابتدا ایستگاه‌های آلودگی‌سنجی و هواشناسی طبق موقعیت‌های جغرافیایی آنها روی نقشه شهر تهران، مکان‌یابی شدند.

نقشه‌های هم‌آلودگی - هم‌باران برای روزهای آلودگی ذره‌ای در حد نامطلوب و مطلوب رسم شده که تعدادی از آنها برای نمونه در این مقاله آورده شده است.

شکل ۱ مربوط به روز آلوده نامطلوب در تاریخ ۱۳/۶/۱۹۹۹ است. در این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار آلودگی ذره‌ای ($320 \mu\text{gm}^{-3}$) در مرکز تهران رخ داده است و آلودگی به سمت شمال شهر کاهش می‌یابد و به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین خطوط هم‌باران نشان می‌دهند که مقدار بارش از شمال به سمت جنوب و جنوب شرقی کاسته می‌شود.

شکل ۲ مربوط به روز آلوده نامطلوب در تاریخ ۱۵/۱۰/۲۰۰۰ است. در این شکل مشاهده می‌شود که مرکز تهران دارای بیشترین مقدار آلودگی است و به سمت شمال و شمال شرق از مقدار آلودگی کاسته می‌شود. باران در شمال شرقی بیشترین مقدار است و به همین ترتیب به سمت جنوب و جنوب غربی مقدار آن کاهش می‌یابد.

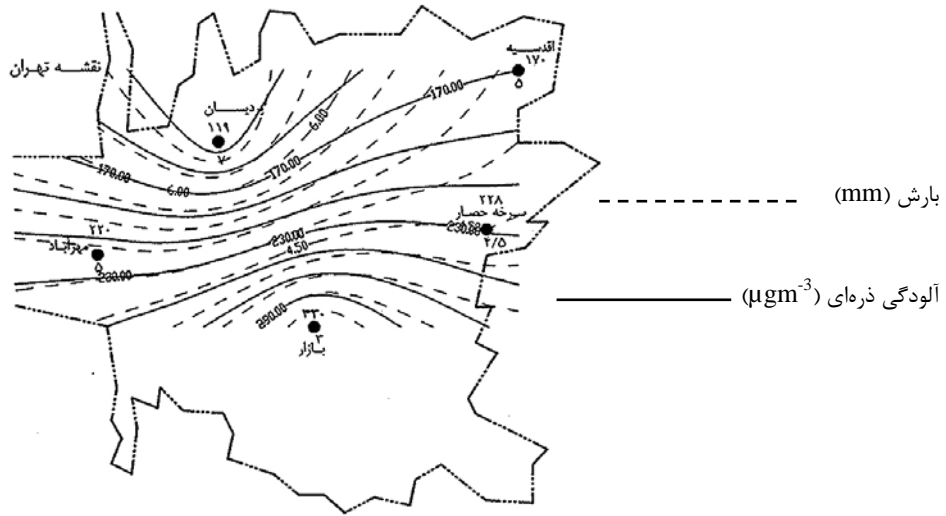
شکل ۳ مربوط به روز آلوده نامطلوب در تاریخ ۱۱/۱۲/۲۰۰۲ است. در این شکل مشاهده می‌شود که مرکز تهران بیشترین مقدار آلودگی را داشته و به سمت شمال و شمال شرق از مقدار آن کاسته شده است. این در صورتی است که بارش در بخش شمال و شمال شرقی دارای بیشترین مقدار است و به سمت مرکز و جنوب از مقدار آن کاسته می‌شود.

شکل ۴ مربوط به روز آلوده مطلوب در تاریخ ۲۰/۱/۲۰۰۱ است. در این شکل مشاهده می‌شود که مرکز تهران و بخش‌های جنوب شرقی بیشترین مقدار آلودگی را دارد و با رسم هم‌آلودگی‌ها، به سمت شمال از مقدار آن کاسته می‌شود. در صورتی که بارش در بخش‌های شمال و شمال غرب بیشترین مقدار است و به سمت جنوب و جنوب شرق از مقدار آن کاسته می‌شود.

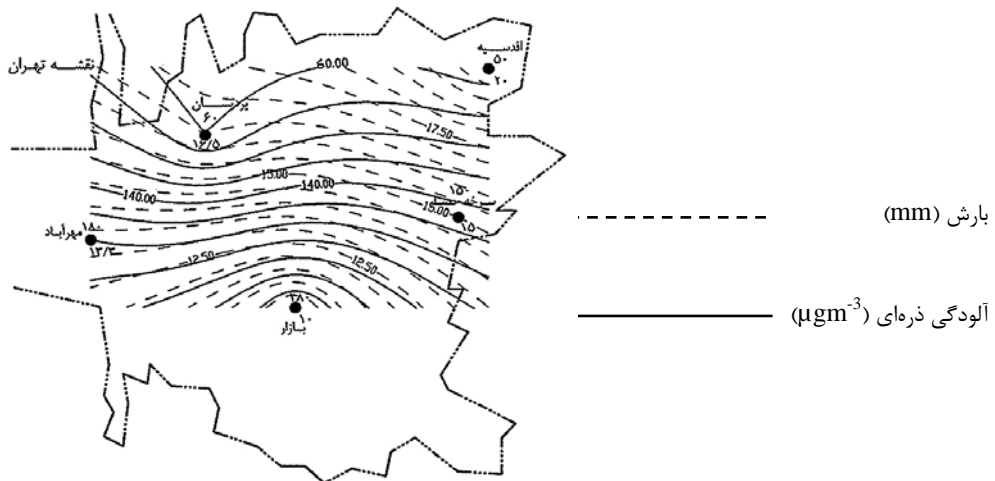
شکل ۵ مربوط به میانگین هم‌آلودگی - هم‌باران (آلودگی ذره‌ای در حد نامطلوب) از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ است. در این شکل مشاهده می‌شود که در شرایط میانگین، بارش از شمال به سمت جنوب شرق با افزایش آلودگی، کاهش می‌یابد. از طرفی میانگین بارش از غرب به شرق با افزایش آلودگی کاهش می‌یابد.

شکل ۶ مربوط به میانگین هم‌آلودگی - هم‌باران (آلودگی ذره‌ای در حد مطلوب) از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳ است. در این شکل مشاهده می‌شود که در شرایط میانگین، بارش از شمال به سمت جنوب با افزایش آلودگی، کاهش یافته و همچنین از غرب به شرق نیز با افزایش آلودگی، بارش افزایش یافته است.

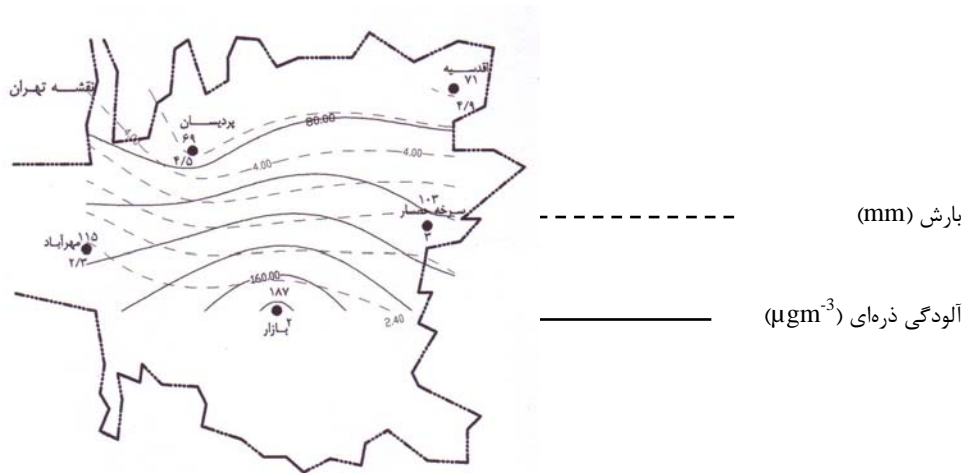
از تحلیل کلی شکل‌های ۱ تا ۶ در شرایط آلودگی مطلوب، نامطلوب و شرایط میانگین این دو حالت چنین بر می‌آید: در اثر پخش آلاینده‌های ذره‌ای از سمت جنوب و مرکز شهر به سمت شمال شهر با باد دشت‌کوه در طی روز و در نتیجه کاهش غلظت آلاینده‌های ذره‌ای از جنوب به شمال بارش در این جهت افزایش می‌یابد. این افزایش بارش نه فقط به دلیل افزایش بارش با ارتفاع است بلکه احتمالاً به دلیل فرایند بارورسازی غیرعمدی ابر در کلان شهر تهران روی می‌دهد. به این ترتیب کاهش بارش از شمال به جنوب احتمالاً به دلیل فرایند بارورسازی ابر در اثر تجمع فوق‌العاده زیاد غلظت آلاینده‌ها در مرکز شهر تهران به علت تراکم بیشتر جمعیت و همچنین باد کوه‌دشت شبانه است.



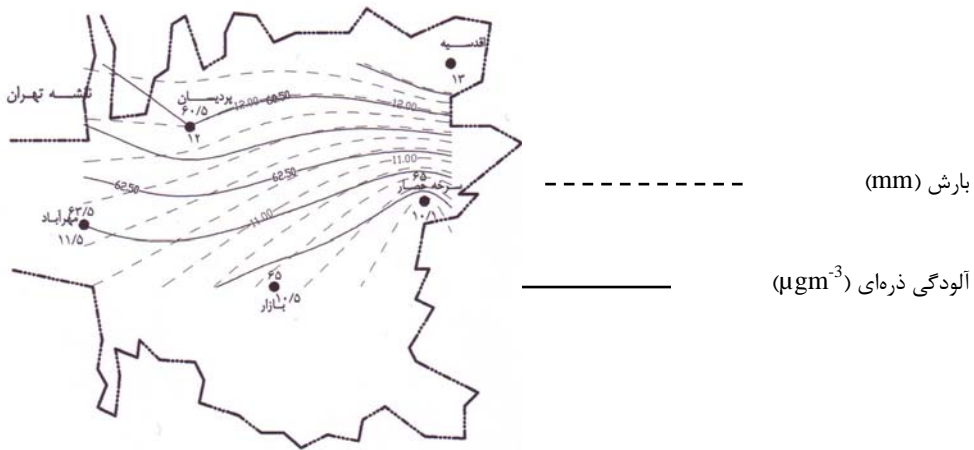
شکل ۱. نقشه هم‌آلودگی و هم‌باران (آلودگی ذره ای در حد نامطلوب) در تاریخ ۱۹۹۷-۷-۱۳ فاصله خطوط هم‌باران ۰/۲۵ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب.



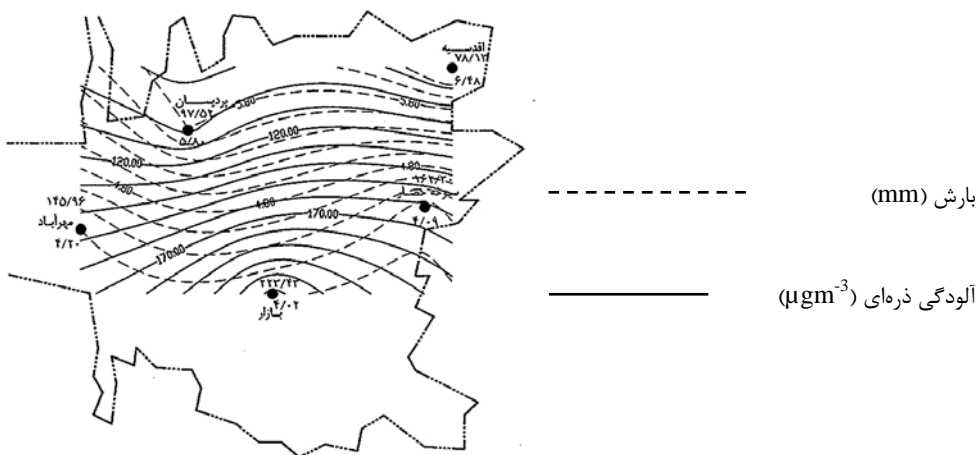
شکل ۲. همانند شکل ۱ ولی برای تاریخ ۲۰۰۰-۱۰-۱۵ و فاصله خطوط هم‌باران ۰/۵ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب.



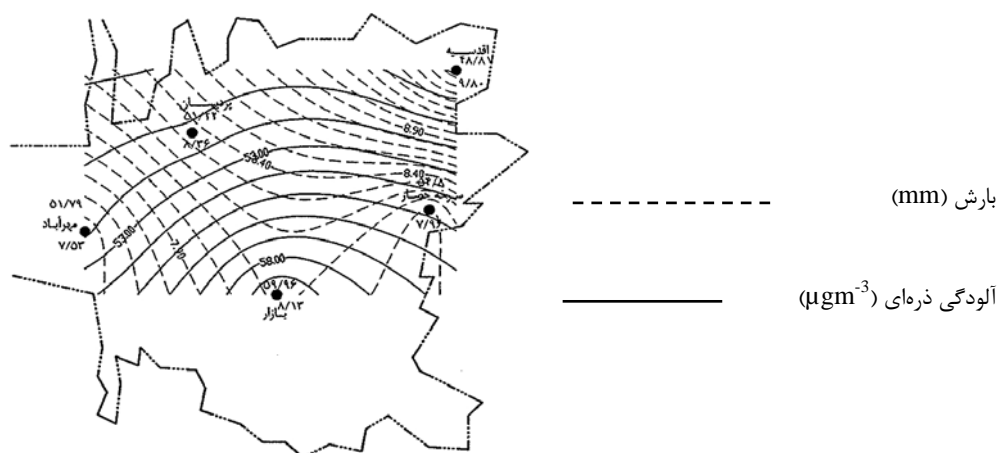
شکل ۳. همانند شکل ۱ ولی برای تاریخ ۲۰۰۲-۱۲-۱۱ و فاصله خطوط هم‌باران ۰/۴ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۲۰ میکروگرم بر متر مکعب.



شکل ۴. همانند شکل ۱ (آلودگی در حد مطلوب) ولی برای تاریخ ۲۰۰۱-۱-۲۰ و فاصله خطوط هم‌باران ۰/۲ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۱ میکروگرم بر متر مکعب.



شکل ۵. نقشه میانگین ۵ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳) هم‌آلودگی و هم‌باران (آلودگی در حد مطلوب) فاصله خطوط هم‌باران ۰/۱ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۱ میکروگرم بر متر مکعب.



شکل ۶. نقشه میانگین ۵ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳) هم‌آلودگی و هم‌باران (آلودگی در حد مطلوب) فاصله خطوط هم‌باران ۰/۱ میلی‌متر و فاصله خطوط هم‌آلودگی ۱ میکروگرم بر متر مکعب.

است:

در فصل سرد، تغییرات بارش در شرایط مطلوب آلودگی (سمت چپ نمودارها، منحنی توپر) افزایشی است و در شرایط نامطلوب (سمت راست نمودارها، منحنی توپر) این روند تغییرات بارش کاهشی است. در فصل گرم، تغییرات بارش در شرایط مطلوب (سمت چپ نمودارها، منحنی خط‌چین) افزایشی است و در شرایط نامطلوب (سمت راست نمودارها، منحنی خط‌چین) با افزایش آلودگی روند تغییرات بارش کاهشی است.

۵ تحلیل کلی نتایج روندهای بارش در ایستگاه‌های تهران

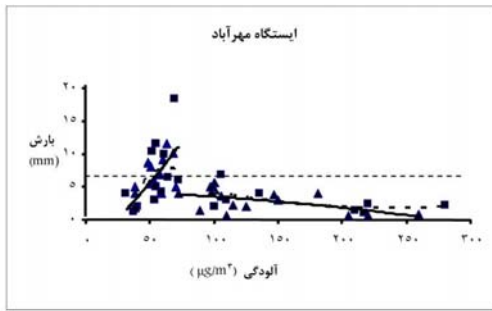
با انطباق کل داده‌های به‌دست آمده از روزهای مطلوب و نامطلوب (هم در فصل گرم و هم در فصل سرد) در شکل‌های ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ می‌توان به وضوح بیشینه و کمینه بارش را با توجه به مقدار آلودگی مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل‌های فوق نشان داده شده است، در شرایط مطلوب (آلاینده‌های ذره‌ای کمتر از $100 \mu\text{gm}^{-3}$)

۲-۴ بررسی روند تغییرات بارش - آلودگی ذره‌ای ایستگاه‌ها در روزهای نامطلوب و مطلوب در فصول گرم و سرد از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳

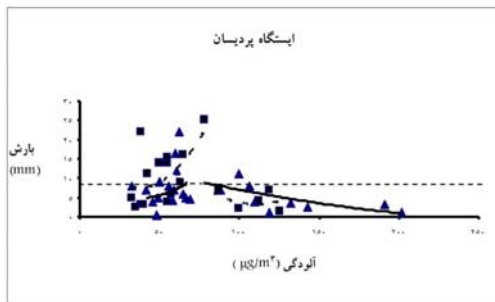
در کلان‌شهر تهران تفاوت ارتفاع بین پست‌ترین ایستگاه یعنی مهرآباد $1190/2$ متر در غرب و مرتفع‌ترین ایستگاه یعنی اقدسیه $1540/2$ متر در شمال شهر تقریباً حدود 350 متر است. این تفاوت می‌تواند در مقدار بارش باریده در نقاط متفاوت کلان‌شهر تهران مؤثر باشد. به این منظور میانگین کل بارش در یک دوره ۵ ساله از (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳) برای همه ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه و به شکل نقطه‌چین در شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان داده شده است. بررسی این میانگین‌ها نشان می‌دهد در ایستگاه‌های شمال شهر به دلیل ارتفاع بیشتر، میانگین کل بارش آنها نسبت به مناطق مرکزی و جنوبی بیشتر است.

برای بررسی تأثیر غلظت هوامیزهای ذره‌ای بر فرایند بارش روند تغییرات بارش - آلودگی ذره‌ای در هر ایستگاه به‌طور مجزا مورد بررسی قرار گرفت.

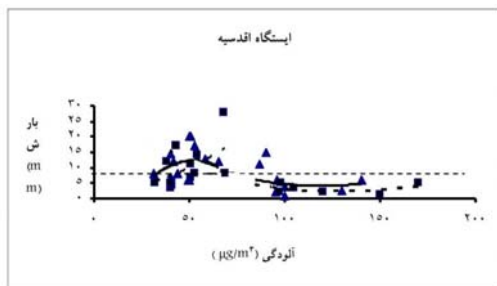
همان‌طور که در شکل‌های ۷ تا ۱۱ مشاهده می‌شود روند بارش در همه ایستگاه‌ها به‌طور مشابه و به ترتیب زیر



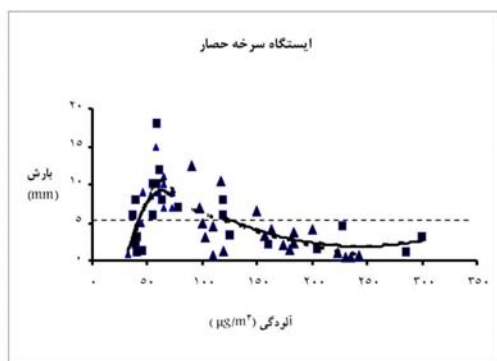
شکل ۸. مانند شکل ۷ ولی برای ایستگاه مهرآباد از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳.



شکل ۹. مانند شکل ۷ ولی برای ایستگاه پردیس از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳.



شکل ۱۰. مانند شکل ۷ ولی برای ایستگاه اقدسیه از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳.

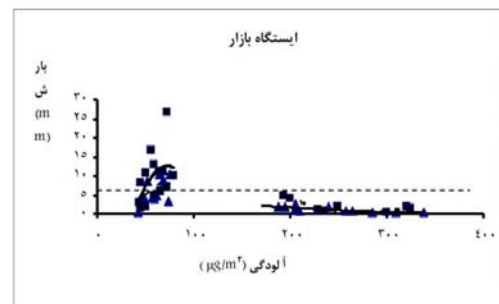


شکل ۱۱. مانند شکل ۷ ولی برای ایستگاه سرخه حصار از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳

۲۰۰۳

هر چه آلودگی بیشتر شود روند بارش افزایش می‌یابد و این افزایش احتمالاً به دلیل فرایند بارورسازی غیرعمدی ابر است. با افزایش تدریجی آلودگی از شرایط مطلوب به شرایط نامطلوب (آلاینده‌های ذره‌ای بیشتر از $200 \mu\text{g m}^{-3}$)، از میزان بارش کاسته شده و در این صورت روند بارش کاهش می‌شود. این روند تا حد کمینه بارش در مقابل حداکثر آلودگی در شرایط نامطلوب ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش آلودگی و افزایش غلظت هسته‌های میعان منتج از آنها موجب کاهش پتانسیل بارش می‌شود که این امر احتمالاً به دلیل فرایند فرابارورسازی ابر است. این نتایج با فعالیت‌های مارشال شفرد (۲۰۰۵)، گیواتی و روزنفلد (۲۰۰۴) که تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای را روی فرایند بارش در مناطق شهری و آلوده آمریکا و فلسطین اشغالی بررسی کرده‌اند مطابقت دارد.

از آنجا که در فصول گرم پذیرش بخار آب ابرها برای اشباع شدن طبیعتاً خیلی بیشتر از فصول سرد است، بنابراین ضخامت و آب قابل بارش ابر و در نتیجه شدت بارش افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که نقاط پیشینه تغییرات روند بارش در فصول گرم، اغلب بیشتر از فصول سرد سال است.



شکل ۷. میانگین کل بارش (نقطه‌چین) و روندهای تحلیلی در روزهای

نامطلوب (سمت راست) و مطلوب (سمت چپ) هم در فصل گرم (مربع‌ها و منحنی خط‌چین) و هم در فصل سرد (مثلث‌ها و خط پیوسته) در ایستگاه بازار از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۳.

۶ نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده در ایستگاه‌های پنجگانه هواشناسی تهران و براساس داده‌های بازار در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها نتایج زیر به دست آمده است:

۱. بررسی نقشه‌های هم‌باران - هم‌آلاینده، برای هر رویداد بارش در شرایط نامطلوب در فصل گرم و سرد نشان می‌دهد که در طی روز با کاهش غلظت آلاینده‌های ذره‌ای از مرکز شهر به سمت شمال شهر، بارش از مرکز شهر به سمت شمال شهر افزایش می‌یابد. این در صورتی است که در شرایط مطلوب (پاک) گاهی در مناطق غربی و شرقی و مرکزی بارش بیشتری نسبت به شمال شهر افتاده است.

۲. در شرایط نامطلوب میانگین کل بارش ایستگاه‌ها از غرب به سمت شرق کاهش می‌یابد که این عمدتاً به دلیل ورود سامانه‌های غربی و جاروب کردن آلودگی از غرب به شرق، افزایش غلظت آلاینده‌ها و ایجاد شرایط فرابارورسازی در ابر است. در مقابل در وضعیت مطلوب میانگین کل بارش ایستگاه‌ها از غرب به شرق، با افزایش غلظت آلاینده‌ها، بیشتر می‌شود که احتمالاً دلیل آن پدیده بارورسازی غیرعمدی ابر است.

۳. از انطباق داده‌های روزهای آلودگی در حد مطلوب و نامطلوب (هم در فصل گرم و هم در فصل سرد) با توجه به مقدار آلودگی، به وضوح بیشینه و کمینه بارش مربوطه مشاهده می‌شود. در شرایط مطلوب هر چه آلودگی از جنوب تهران به سمت شمال تهران بیشتر شود، روند بارش افزایش بیشتری می‌یابد که احتمالاً دلیل آن فرایند بارورسازی غیرعمدی در ابر است. در شرایط نامطلوب با افزایش آلودگی و افزایش غلظت هسته‌های میعان، پتانسیل بارش کاهش می‌یابد و روند بارش از شمال تهران به سمت جنوب تهران کاهشی است که احتمالاً دلیل آن فرایند

فرابارورسازی ابر است.

۴. اکثراً در فصول گرم نقاط بیشینه بارش در شرایط مطلوب و نامطلوب آلودگی، اندکی از نقاط بیشینه در فصول سرد سال بیشتر است که علت آن ضخامت بیشتر ابرها در فصل تابستان و شدت بارش بیشتر آنها است.

منابع

- صادقی حسینی، ع. و راحلی سلیمی، ج.، ۱۳۸۱، تأثیر توسعه شهرنشینی بر روی فرایند بارش در تهران، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۲۸، شماره ۲، ص ۴۵-۵۱.
- Ackerman, B., Changnon, S. A., Dzurisin, G., Gatz, D. F., Gatz, D. F., Grosh, R. C., Hilberg, S. D., Huff, F. A., Mansell, J. W., Ochs, H. T., Peden, M. E., Schickendanz, P. T., Semonin, R. g., and Vogel, J. L. 1978, Summary of Metromex, vol 2: Causes of precipitation Anomalies, Ill. State water surv. Bull., **63**, 395 pp.
- Borys, R. D., Lowenthal, H., Chon, S. A., and Brown, W. O. J., 2003, Mountain and radar measurements of anthropogenic aerosol effects on snow growth and snow fall rate. Geophys. Res. Lett. **30**, 1538, dov. 10. 1029/2002 GL016855.
- Changnon, S. A., Jr. 1979, Rainfall changes in summer caused by St. Louis. Science., **205**, 402-404.
- Givati, A., Rosenfeld, O., 2004, Quantifying Precipitation Suppression Due To Air Pollution. J. Atmos. Sci. vol. 43. The Hebrew University of Jerusalem 91904, Israel.
- Khain, A., Pokrovsky, A., and Sednev, I., 1999, Some effects of cloud-aerosol interaction on cloud microphysics structure and precipitation formation: numerical experiments with a spectral microphysics cloud ensemble model. Atmos. Res., **52**, 195-220.
- Khain, A., Rosenfeld, D., and Pokrovsky, A., 2005, Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. Q. J. Roy. Meteor. Soc., **131**, 2639-2663.
- Lohmann, U., 2004, Can anthropogenic aerosols decrease the snow fall rate? Dept. of physics and Atmos. Sci. J. Nova Scotian. B 3H 315, Canada.

- Marshall Shepherd, J., 2005, A review of current investigations of urban-induced rain fall and recommendations for the future, *J. Earth Interact.*, **9**, 12.
- Nober, F., Graf, H. F., and Rosenfeld, D., 2002, Sensitivity of the global circulation to the suppression of precipitation by anthropogenic aerosols. *Global Planet. Change.*, **37**, 57-80.
- Rosenfeld, D., 2000, Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science.*, **287**, 1793-1796.
- Choi, Y. S., Ho, C. H., Chen, D. Y. H., and Song, C. K., 2007, Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China. *J. Atmos. Environ.*, **9**, 75-86.