

ارتباط آب قابل بارش ابر و بارندگی دیدبانی شده در منطقه تهران

سیدعلیرضا صادقی حسینی*، سهراب حجام* و پوریا تفنگ ساز*

*مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵

(دریافت مقاله: ۱۹/۵/۱۳، پذیرش مقاله: ۲۴/۸/۱۴)

چکیده

آب قابل بارش ابر (PW)، از کمیت‌های مهم هواشناسی است که امروزه دانشمندان فیزیک ابر توجه ویژه‌ای به آن دارند. در اکثر نقاط جهان اندازه‌گیری این کمیت با رادار صورت می‌گیرد ولی به دلیل این که هنوز در منطقه تهران پوشش راداری مناسب برای این اندازه‌گیری وجود ندارد بررسی این کمیت با تحلیل داده‌های رادیوگمانه به‌انجام می‌رسد.

در این پژوهش سعی شده است تا با محاسبه آب قابل بارش به روش ترمودینامیکی از روی نمودارهای هواشناختی Skew-Tlnp و مقایسه آن با بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی منطقه تهران، رابطه‌ای برای پیش‌بینی کمی بارش به‌دست آید. بررسی‌های فیزیکی مربوط به ارتباط آب قابل بارش حاصل از نمودارهای هواشناختی و بارش اندازه‌گیری شده، به‌طور جداگانه و به تفکیک برای ساعت‌های ۰۰ و ۱۲ در بازه زمانی پانزده ساله (۱۹۹۸-۱۹۸۴) صورت گرفته است. در ادامه روابطی نیز بین آب قابل بارش ساعت ۰۰ و ۱۲ در بازه‌های ۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر و بارش اندازه‌گیری شده متناظر معرفی شده است که عمدتاً از دیدگاه آماری معنی‌دارند. در این پژوهش براساس کارهای پژوهشگران فیزیک ابر در کاربرد آب قابل بارش در برآورد قابلیت بارورسازی ابرها، این آستانه برای ابرهای همرفتی تهران بین ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر به‌دست آمده است. علاوه بر آن، آستانه ۷ میلی‌متر آب قابل بارش ابر برای احتمال وقوع بارش به‌دست آمده است، بدین معنا که هنگامی که آب قابل بارش کمتر از ۷ میلی‌متر باشد، انتظار بارشی روی تهران نمی‌رود. در یک بررسی تکمیلی، برای پیش‌بینی احتمال وقوع سیل نیز از آب قابل بارش ابر استفاده شده است و نتیجه این بررسی آستانه ۳۵-۴۰ میلی‌متر آب قابل بارش را برای احتمال وقوع سیل در تهران به‌دست می‌دهد. به‌عبارت دیگر اگر آب قابل بارش اندازه‌گیری شده از ۳۵-۴۰ میلی‌متر بیشتر باشد، احتمال وقوع سیل وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: آب قابل بارش ابر، نمودارهای ترمودینامیکی، ایستگاه‌های زمینی، سیل، قابلیت بارورسازی

۱ مقدمه

موفقیت به‌انجام رسیده است از پتانسیل شناوری در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و همچنین آب قابل بارش ابر در حکم فاکتور کمکی در تصمیم به بارورسازی ابر استفاده شده است. با توجه به پژوهش یاد شده می‌توان با تعیین آب قابل بارش ابر با اطمینان بیشتری اقدام به بارورسازی ابرها کرد.

در یکی از کارهای پژوهشی آزمایشگاهی نیز رابطه آب محتوی ابر و سرعت بالارو در تولید خرده‌یخ توسط ساندرز و صادقی حسینی (۲۰۰۱)، برای معرفی آستانه‌های دیگری برای بارورسازی ابرها بررسی شده است. بر اساس این پژوهش در آب محتوی ابر ۱ گرم بر متر مکعب، هنگامی که سرعت بالاروی ابر کمتر از ۶ متر بر ثانیه است

اکنون در اکثر نقاط جهان، آب قابل بارش ابر با ماهواره و رادار اندازه‌گیری می‌شود ولی در ایران به علت نبود پوشش رادارهای هواشناسی، آب قابل بارش را با بررسی داده‌های حاصل از ارسال رادیوسوند به‌جای اندازه‌گیری می‌کنند. برآورد این شاخص می‌تواند در پیش‌بینی کمی بارش از بروز خسارات جانی و مالی ناشی از حوادث غیر قابل اجتناب سیل بکاهد و از سوی دیگر با محاسبه آب قابل بارش ابر می‌توان برای تصمیم به بارورسازی ابرها با احتمال موفقیت بیشتری تصمیم‌گیری کرد.

بر پایه پژوهش‌های سیز و اسکات (۱۹۹۳)، در پروژه بارورسازی ابرهای همرفتی PACE که در ایلینویز با

شده موجود در یک ستون هوای نمناک از پایه ابر تا وردسپهر را آب قابل بارش می‌نامند که برحسب سانتی‌متر یا میلی‌متر بیان می‌شود. برای تعیین مقدار آب قابل بارش ابر، ستونی از هوا با سطح مقطعی مربع شکل به ضلع ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در این ستون، جرم کل آب تا ارتفاع Z برابر خواهد بود با:

$$PW = \int_0^Z \rho_w dz \quad (1)$$

که در آن، ρ_w چگالی بخار آب و PW آب قابل بارش ابر است. با استفاده از رابطه هیدروستاتیک و با توجه به تعریف رطوبت ویژه در لایه‌های مختلف جو (راجرز و یو، ۱۹۹۶):

$$PW = \frac{1}{g} \int_p^{p_0} q dp = \frac{0.622}{g} \int_p^{p_0} \frac{e}{p_a} dp \quad (2)$$

که در این رابطه PW برحسب گرم بر سانتی‌متر مربع و e فشار بخار و P_a فشار میانگین لایه بر حسب میلی‌بار است. از آن‌جای که روی نمودارهای Skew-Tlnp کمیت رطوبت با نسبت اختلاط نشان داده می‌شود، می‌توان با تقریب خوبی آنرا جایگزین رطوبت ویژه کرد.

$$PW = \frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{r} dp \quad (3)$$

که در آن \bar{r} میانگین نسبت اختلاط بین دو تراز فشاری قابل ملاحظه P_1 و P_2 است. در رابطه فوق، \bar{r} برحسب گرم بر کیلوگرم، P_1 و P_2 برحسب میلی‌بار و g برحسب متر بر مجذور ثانیه است، به این ترتیب واحد آب قابل بارش 10^{-1} کیلوگرم بر مترمربع می‌شود و برای به دست آوردن آب قابل بارش برحسب میلی‌متر تبدیلات زیر صورت می‌گیرد:

$$PW(\text{mm}) = \left[\frac{1}{g} \int_{p_2}^{p_1} \bar{r} dp \right] \times 10^{-1} \quad (4)$$

بر اساس رابطه فوق، میانگین نسبت اختلاط و تغییرات

ابر خود از راه تولید بیشینه خرده‌یخ، به شکل طبیعی می‌تواند بارور شود و به بارورسازی مصنوعی نیازی نیست. سیمونو و گنورگیو (۲۰۰۱)، نیز در بررسی توفان‌های تندری در جنوب کوهستان ردوپس در شرق مدیترانه از مقادیر انرژی پتانسیل همرفتی در دسترس (CAPE)، سرعت‌های بالارو و آب قابل بارش در پیش‌بینی فعالیت‌های همرفتی ناحیه استفاده کرده‌اند. مونزاتو و مورگان (۲۰۰۳)، نیز در بررسی توفان‌های تندری در منطقه ونیز ایتالیا در دوره هفت ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱) از شاخص آب قابل بارش، سرعت بالارو و پتانسیل شناوری به منزله بهترین شاخص‌های ناپایداری همرفتی در منطقه مورد بررسی خود یاد کرده‌اند.

در این پژوهش، آب قابل بارش ترمودینامیکی ابرهای همرفتی تهران در بازه پانزده ساله بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۸ به کمک تحلیل نمودارهای Skew-Tlnp محاسبه و با بارش‌هایی که ایستگاه‌های زمینی اندازه‌گیری کرده‌اند مقایسه شده است. این بررسی‌ها به ارائه روابط قابل اطمینانی برای پیش‌بینی کمی بارش و همچنین ارائه آستانه بارورسازی ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر و آستانه هشدار احتمال وقوع سیل ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر منجر شده است. ولی برای تعیین دقیق‌تر این آستانه‌ها به مطالعات نظری و میدانی بیشتر و مقایسه آن‌ها با داده‌های رادار و ماهواره هواشناسی نیاز است. در این بررسی، نحوه محاسبه شاخص آب قابل بارش ابر از داده‌های رادیوسوند با استفاده از مطالب نظری روپن (۱۹۹۸)، رامیرز (۲۰۰۰a,b,c) و بارنز (۲۰۰۰)، از پایگاه‌های اینترنتی استخراج شده است.

۲ مبانی نظری محاسبه آب قابل بارش ابر

آب قابل بارش ابر با پارامترهای رطوبتی متفاوت مانند چگالی، رطوبت نسبی، نسبت اختلاط و رطوبت ویژه قابل اندازه‌گیری است. بنا به تعریف، مقدار بخار آب چگالیده

جدول ۱. مقایسه عملکرد رابطه (۵) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۵) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۹/۵	۸/۶	۱۴/۸
۹/۵	۸/۵	۱۷
۱۰/۶	۱۲	۲۲/۲
۱۳/۹	۱۷	۳۰/۳

۳-۱-۱-۲ روابط حاصل از بازه‌های تفکیکی آب قابل بارش

جدای از رابطه بستگی کلی، داده‌های آب قابل بارش به چند بازه ۰ تا ۱۵ میلی‌متر، ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر و ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر تقسیم شد که بهترین روابط برای پیش‌بینی بارش‌هایی که آب قابل بارش آن‌ها در ساعت ۰۰، ۰ تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر یا ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر باشد به ترتیب به صورت زیر است:

$$Y = 37572.9 + 5776.7 x - 21329.8 / \ln x \quad (6)$$

$$Y = 7.29 + 0.001 x^{2.5} + 143841130 e^{-x} \quad (7)$$

$$\ln Y = 3.49 - 22.02 / x \quad (8)$$

مقایسه عملکرد این روابط با نمونه‌های تصادفی با روش‌های اندازه‌گیری شده در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۲. مقایسه عملکرد رابطه (۶) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۶) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۷/۴	۹/۳	۱۰/۱
۱۱/۹	۸/۶	۱۴/۸
۹/۳	۸/۳	۱۱/۴
۱۰/۶	۹/۲	۱۲/۸

جدول ۳. مقایسه عملکرد رابطه (۷) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۷) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۱۱/۵	۱۰/۵	۱۵/۵
۱۰/۵	۱۱/۶	۲۳/۵
۱۶/۱	۱۴/۳	۲۷
۱۱/۲	۱۰/۹	۱۸/۳

جدول ۴. مقایسه عملکرد رابطه (۸) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۸) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۱۶/۱	۱۴/۵	۳۰
۱۶/۴	۱۵	۳۳
۱۸/۳	۲۰/۲	۳۷
۲۰/۴	۱۹/۱	۳۶

۳-۱-۲ روابط حاصل با استفاده از آمار ایستگاه مهرآباد

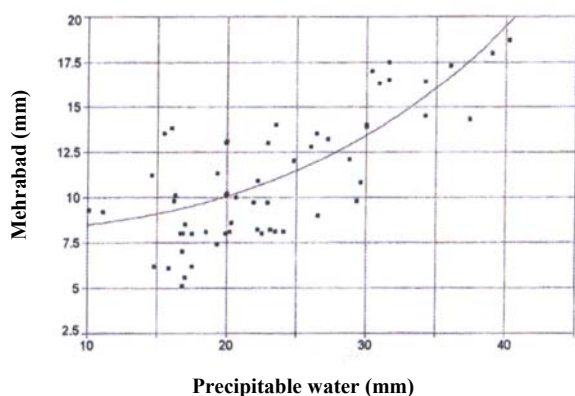
با توجه به اینکه رادیوگمانه روی مهرآباد رها می‌شود، ممکن است همبستگی داده‌های ایستگاه زمینی مهرآباد با داده‌های رادیوگمانه به روابط مستدل‌تری منجر شود.

۳-۱-۲-۱-۱ رابطه حاصل از همه داده‌ها

از برازش همه داده‌های آب قابل بارش به دست آمده از نمودارهای هوا شناختی، در ساعت ۰۰ فرودگاه مهرآباد بر بارش اندازه‌گیری شده در همین ایستگاه معادله زیر نتیجه می‌شود:

$$Y^{0.5} = 2.85 + 0.0002x^2 \ln x \quad (9)$$

که نمودار آن به شکل ۲ است:



شکل ۲. نمایش بستگی داده‌های آب قابل بارش در ساعت ۰۰، و مقدار بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه مهرآباد.

مقایسه عملکرد رابطه (۹) در جدول ۵ آمده است.

۲-۳ روابط پیش‌بینی کمی بارش با استفاده از آمار

ساعت ۱۲

چنانچه پیشتر هم ذکر شد، برای پیش‌بینی کمی بارش بهتر است از نقشه‌های ساعت ۰۰ همان روز استفاده شود. زیرا ممکن است تا ساعت ۱۲ مقداری بارش انجام شود، که می‌تواند از مقدار آب قابل بارش ابر بکاهد. ولی با توجه به افزایش ناپایداری‌ها در بعد از ظهر بهتر است که رابطه‌ای نیز برای پیش‌بینی کمی بارش براساس آب قابل بارش اندازه‌گیری شده در ساعت ۱۲ ارائه شود، تا در صورتی که تا ساعت ۱۲ ریزشی صورت نگیرد از آن استفاده شود.

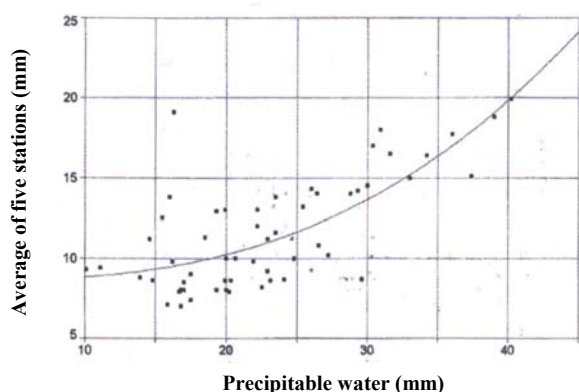
۱-۲-۳ رابطه حاصل از داده‌های متوسط پنج ایستگاه

و ایستگاه مهرآباد

با توجه به کمتر بودن داده‌های ساعت ۱۲، تحلیل‌های گسترده روی آن‌ها امکان‌پذیر نبود، مع‌الوصف چکیده نتایج در زیر می‌آید: فرم عمومی معادله مربوط به تمامی داده‌های ساعت ۱۲ به صورت زیر است:

$$Y = 8.56 + 0.004 \times x^{2.7} \quad (13)$$

که نمودار آن به شکل ۳ است:



شکل ۳. نمایش بستگی داده‌های مقدار آب قابل بارش محاسبه شده در ساعت ۱۲ و بارش اندازه‌گیری شده در پنج ایستگاه زمینی.

جدول ۵. مقایسه عملکرد رابطه (۹) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۹) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۸/۷	۹/۳	۱۳/۹
۹/۳	۸/۱	۱۸/۵
۱۰/۶	۱۳/۱	۲۵/۴
۱۳/۴	۱۵/۳	۳۳

۲-۲-۱-۳ روابط حاصل برای بازه‌های تفکیکی آب

قابل بارش

با تقسیم آب قابل بارش به بازه‌های ۰ تا ۱۵ میلی‌متر، ۱۵ تا ۳۰ میلی‌متر و ۳۰ تا ۴۵ میلی‌متر به ترتیب روابط زیر به دست آمد:

$$Y = 8.56 + 6.37 \times 10^{-7} e^x \quad (10)$$

$$Y = 1.76 + 0.36 x \quad (11)$$

$$Y = 10.55 + 0.16 x \quad (12)$$

که مقایسه عملکرد این روابط با نمونه‌های تصادفی بارش واقعی در جدول‌های ۶، ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۶. مقایسه عملکرد رابطه (۱۰) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۱۰) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۷/۹	۸/۶	۱۴/۸
۷/۳	۷/۴	۱۳/۶

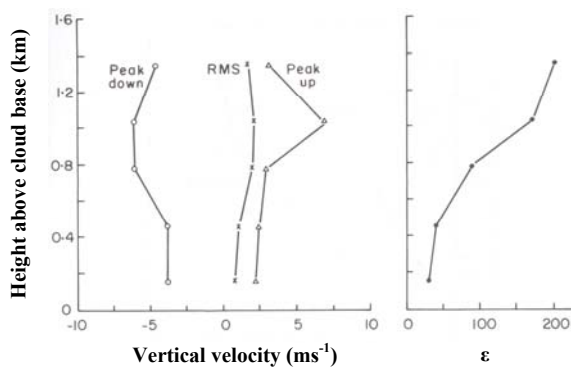
جدول ۷. مقایسه عملکرد رابطه (۱۱) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۱۱) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۸/۶	۸/۱	۱۸/۵
۱۱/۲	۱۳/۱	۲۵/۴

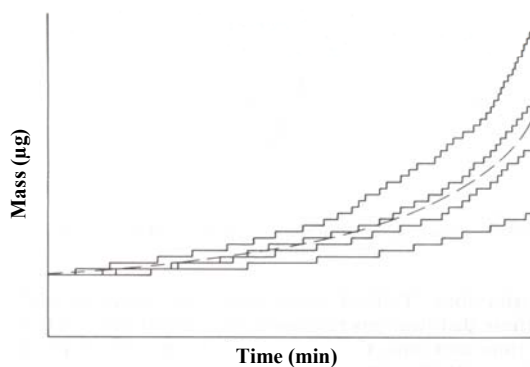
جدول ۸. مقایسه عملکرد رابطه (۱۲) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۱۲) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۱۶/۴	۱۸	۳۹
۱۵/۱	۱۷	۳۱/۶
۱۴/۸	۱۶/۴	۳۲/۲

راه رسیدن به زمین تبخیر می‌شوند. به همین دلیل تا وقتی که آب قابل بارش ابر تا حدود ۲۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد، میزان بارش اندازه‌گیری شده در حدود مقدار ثابت ۸ تا ۱۳ میلی‌متر است ولی با افزایش ضخامت و عمر ابر، همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ برمی‌آید رشد قطرات تا ارتفاع ۳/۴ از پایه ابر به صورت نمایی افزایش می‌یابد و اندازه آن‌ها به حدی می‌رسد که می‌توانند از ابر فرو ریزند و علی‌رغم تبخیر در زیر پایه به سطح زمین برسند. لذا بارش اندازه‌گیری شده نیز با همبستگی خوبی طبق شکل‌های ۱، ۲ و ۳ افزایش می‌یابد (راجرز و یو، ۱۹۹۶).



شکل ۴. تغییرات سرعت قائم قطره‌های آب و انرژی تلاطمی برحسب ارتفاع از پایه ابر (راجرز و یو، ۱۹۹۶).



شکل ۵. چگونگی افزایش جرم قطره‌های آب با گذشت زمان و افزایش ضخامت ابر (راجرز و یو، ۱۹۹۶).

مقایسه عملکرد رابطه (۱۳) با نمونه‌های تصادفی بارش واقعی در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹. مقایسه عملکرد رابطه (۱۳) با داده‌های واقعی.

پیش‌بینی رابطه (۱۳) (mm)	متوسط داده‌های واقعی (mm)	آب قابل بارش (mm)
۸۳	۸/۸	۱۳/۹
۹/۲۸	۹/۳	۱۶/۳
۱۶/۱	۱۷/۷	۳۶

۳-۳ تحلیل فیزیکی نتایج

چنانچه در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ دیده می‌شود به نظر می‌رسد که بارش منطقه برای آب‌های قابل بارش کمتر از ۲۵ میلی‌متر مقداری ثابت در حدود ۸ تا ۱۳ میلی‌متر است ولی بعد از آن تغییرات به صورت نمایی افزایش می‌یابد. دلیل احتمالی این است که حرکات همرفتی و انتقال گرما با افزایش عمر و ضخامت ابر افزایش می‌یابد. در نزدیکی پایه ابر، حرکات بالاروی قطره‌ها سرعت کمی دارد ولی هرچه ضخامت ابر افزایش می‌یابد سرعت بالارو با افزایش ناپایداری حاصل از آزاد شدن گرمای نهان میعان قطره‌ها بیشتر خواهد شد و بنابراین آب قابل بارش ابر، انتقال گرما و انرژی پتانسیل همرفت قابل دسترس (CAPE) نیز افزایش می‌یابد. در واقع برهم‌کنش‌های همرفتی، حرکات بالارو و رشد قطره‌ها در فاصله ۳/۴ از پایه ابر به بیشینه خود می‌رسد (راجرز و یو، ۱۹۹۶، شکل ۴) و بعد از آن در نزدیکی قله و لبه‌های ابر به علت درون‌آمیزی هوای خشک و سرد اطراف با ابر قطره‌ها تبخیر می‌شوند و آب قابل بارش ابر سیر نزولی پیدا می‌کند. در نتیجه حرکات بالا رونده کم کم به حرکات پایین‌رو تبدیل می‌شوند.

بنابر دلایل فوق و در صورتی که بارش از ابری که عمر و ضخامت آن به اندازه کافی نباشد و یا آب قابل بارش آن از ۲۵ میلی‌متر کمتر باشد، از آنجا که قطرات باران در این ابرها هنوز به اندازه کافی رشد نکرده‌اند در

تقریبی ۷ میلی‌متر برای آب قابل بارش می‌تواند معیاری برای ریزش بعدی باشد. به زبان دیگر اگر آب قابل بارش اندازه‌گیری شده روی نقشه Skew-Tlnp در ساعت ۰۰ کمتر از ۷ میلی‌متر باشد انتظار بارش روی تهران نمی‌رود، گرچه مواردی نیز وجود داشته است که آب قابل بارش حدود ۱۱ میلی‌متر نیز به بارندگی قابل ملاحظه در ایستگاه زمینی منجر نشده است. این احتمالاً به دلیل دمای زیاد محیط و یا ضخامت کم ابر و در نتیجه تولید قطرات با قطر کم بوده است که قبل از رسیدن به زمین در محیط تبخیر شده‌اند.

۵ بررسی اجمالی سیل‌های تهران

البته باید یادآور شد که بحث سیل و رابطه آن با آب قابل بارش، خود نیازمند بررسی جامع‌تری است که می‌تواند در قالب پژوهشی مستقل صورت گیرد. با این حال بررسی اجمالی زیر، روی چند سیل در تهران، در بازه زمانی این پژوهش صورت گرفته است.

جدول ۱۰. برآورد حداقل مقدار آب قابل بارش که منجر به بارش قابل ملاحظه می‌شوند.

میزان بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها (mm)	تاریخ اندازه‌گیری	مقدار آب قابل بارش محاسبه شده در ساعت (mm) 00
۵/۶	۸۴/۴/۲۴	۱۳/۶۳
—	۸۴/۱/۴	۹/۸۶
۴	۸۵/۱/۳۱	۱۲/۸۹
—	۸۵/۲/۲۵	۱۰/۸۸
—	۸۶/۳/۱۹	۷/۸
—	۸۶/۳/۲۳	۷/۶۱
۵/۱	۸۶/۴/۱۰	۱۰/۱۵
۰/۱	۸۷/۳/۱۵	۷/۵۰
—	۸۸/۱/۱۲	۷/۴۷
—	۸۸/۱/۱۷	۹/۸۶
—	۸۹/۱۰/۱۵	۱۱/۰۲
—	۹۲/۱۲/۲	۱۰/۵۹
—	۹۲/۱۲/۱۳	۱۰/۷۷
—	۹۸/۱/۱۵	۸/۰۱
—	۹۸/۱۲/۶	۸/۱۸
۴/۵	۹۸/۲/۱۱	۹/۸۹

سبز و اسکات (۱۹۹۳)، در پروژه موفق بارورسازی ابرهای PACE ایلینویز، آستانه آب قابل بارش ابر را در برآورد قابلیت بارورسازی ابرها، ۲۶ میلی‌متر گزارش کرده‌اند. بر معیار این پژوهش، احتمالاً این آستانه را برای موفقیت پروژه‌هایی که در تهران صورت می‌گیرد، می‌توان در حدود ۲۵ میلی‌متر دانست. البته برای حصول اطمینان از این آستانه، به تحقیقات نظری و میدانی بیشتری نیاز است.

۳-۴ تعیین آستانه آب قابل بارش برای دستور بارورسازی ابر

همان‌طور که در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ مطرح شد، هنگامی که آب قابل بارش محاسبه شده ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر است، بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی تقریباً ثابت و در حدود ۸ تا ۱۳ میلی‌متر است. از این مقدار آب قابل بارش به بعد، بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها با همبستگی نسبتاً زیادی به شکل نمایی افزایش می‌یابد که با پژوهش سبز و اسکات (۱۹۹۳) در پروژه بارورسازی PACE ایلینویز کاملاً همخوانی دارد. این پژوهشگران آستانه آب قابل بارش را برای موفقیت‌آمیز بودن دستور بارورسازی در پروژه PACE، ۲۶ میلی‌متر قلمداد کردند که در این پژوهش می‌توان این مقدار را برای تهران که دارای شرایط اقلیمی و جغرافیایی متفاوتی است در بازه حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر محاسبه کرد، ولی برای اطمینان بیشتر در حصول این کمیت باید کارهای نظری و میدانی بیشتری صورت گیرد.

۴ تعیین حداقل آب قابل بارش برای وقوع بارندگی در تهران

در بین روزهای انتخاب شده، روزهایی وجود داشت که بارش روز بعد از آن‌ها ناچیز بود و یا اساساً بارشی نداشتند. فهرست این روزها در جدول ۱۰ آمده است. با توجه به جدول ۱۰ دیده می‌شود که حداقل آستانه

توصیه می‌شود (جدول‌های ۶، ۷ و ۸).

۴. حداقل آب قابل بارش روی تهران باید ۷ میلی‌متر باشد تا احتمالاً شاهد بارندگی باشیم. در واقع اگر که آب قابل بارش کمتر از ۷ میلی‌متر باشد انتظار بارش روی تهران نمی‌رود (بخش ۴).

۵. بر اساس همانندی روابط ارائه شده از کارهای پژوهشگران فیزیک ابر از جمله سیز و اسکات (۱۹۹۳)، آستانه بارورسازی ابرهای همرفتی برای تهران بین بازه ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر برآورد می‌شود ولی برای مشخص کردن دقیق‌تر این بازه به کارهای پژوهشی بیشتری نیاز است. (بخش ۳-۴).

۶. گرچه در این مقاله تحلیل کاملی روی سیل‌های تهران صورت نگرفته است، با بررسی نمونه‌های آماری، آستانه ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر آب قابل بارش ساعت ۰۰ برای احتمال وقوع سیل توصیه می‌شود (بخش ۵).

تشکر و قدردانی

از شورای پژوهشی دانشگاه تهران به دلیل کمک‌هایی در قالب طرح پژوهشی "ارتباط آب قابل بارش ابر و بارندگی دیدبانی شده در منطقه تهران" به شماره ۶۵۱/۲/۷۴۲ سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- <http://www.Engr.colorado state / CE322 / Basic Hydrology / Barenz, 2000>.
Czys, R. R., and Scott, R. W., 1993, Simple objective methods used to forecast convective activity during the 1993 PACE cloud seeding Experiment: J. App. Meteor, **1.32**, 996-1005.
<http://www.Engr. colostate.Edu/depts/ce/ramirez/ramirez/ce 422.../Home work-2.Htm>. Jorge. A., Ramirez, 2000a.
<http://www.engr.colostate.du/depts/ce/faculty/ramiz/class /ltomeork-2-99-sln, ht. Jorge.A. Ramirez, 2000b>.
<http://www.engr.colostate.Edu/depts/ce/faculty/jorge. A.Ramires, 2000c>.
<http://www.Aoc.rrao.edu/vla/htm/memos/scientific /179/nodez. Html. Michael Ruppen. Thue sep 29, 1998>.

در تاریخ چهارم فروردین ۱۳۷۴ (بیست و چهارم مارس ۱۹۹۵) سیلی در تهران رخ داد که آب قابل بارش ساعت‌های ۰۰ و ۱۲ همان روز به ترتیب معادل ۵۸/۴ و ۴۲/۸ برآورد شد است. در روز سیزدهم اسفند ۱۳۶۵ (چهارم مارس ۱۹۸۷) نیز سیلی در تهران به وقوع پیوسته بود که آب قابل بارش محاسبه شده آن در ساعت‌های ۰۰ و ۱۲ روز وقوع سیل، به ترتیب برابر ۵۲/۴ و ۵۸/۴ میلی‌متر بود. در ماه‌های مرداد و بهمن سال ۱۳۶۵ نیز علی‌رغم کم بودن آب قابل بارش در تهران سیل‌هایی رخ داده است که شاید بتوان آنرا به زه‌کشی و یا مسیر جوی‌های شهر مربوط دانست.

افزون بر آنها در تاریخ دهم اسفند ۱۳۶۶ (یکم مارس ۱۹۸۸) نیز سیلی در شهرستان شمیران به وقوع پیوست که آب قابل بارش ساعت‌های ۰۰ و ۱۲ به ترتیب معادل ۵۸ و ۴۴/۶ میلی‌متر بود. با ملاحظه رقم‌های ذکر شده از چند وقوع سیل در تهران و شمیران به شرح فوق و به اجمال، می‌توان آستانه ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر آب قابل بارش ساعت ۰۰ را هشدار برای احتمال وقوع سیل دانست، که البته نتیجه‌گیری جامع‌تر در این مورد به بررسی‌های بیشتری نیازمند است.

۶ نتیجه‌گیری

۱. روابط به دست آمده از همبستگی آب قابل بارش در ساعت ۰۰ و متوسط بارش ایستگاه‌های زمینی جواب‌های معقول‌تری را به دست می‌دهند، زیرا ممکن است تا ساعت ۱۲ بارشی صورت گیرد و آب قابل بارش ساعت ۱۲ کاسته شود (بخش ۳-۲).
۲. روابط ارائه شده با مبانی نظری متون فیزیک ابر کاملاً همخوانی دارند (بخش ۳-۳).
۳. روابط به دست آمده با نمونه‌هایی تصادفی آزمون شدند که همگی جواب‌های نسبتاً خوبی به دست دادند، لذا استفاده از آنها برای پیش‌بینی کمی بارش روی تهران

- Manzato, A., and Morgan Jr, G., 2003, Evaluating the sounding instability with the lifted parcel theory: *J. Atmos. Res.*, **67-68**, 455-473.
- Rogers, R. R., and Yau, M. K., 1996, *A Short Course in Cloud Physics*, Third edition, Butterworth-Heinemann, 290.
- Saunders, C. P. R., and Hosseini, S. A., 2001, A laboratory study of the effect of velocity on Hallett-Mossop ice crystal multiplication: *J. Atmos. Res.*, 59-60, 3-14.
- Simoenov, P., and Georgiev, C. G., 2001, A case study of tornado producing storm south of Rhodopes Mountain in the Eastern Mediterranean: *J. Atmos. Res.*, 57, 187-199.