

EXTENDED ABSTRACT

Exploring cloud's characteristics and some effective physical indices in Mashhad's precipitation

M. Rahmdel^{1*}, S. H. Sanaeinejad² and Hadi Jabbari Nooghabi³

1* - Corresponding Author, PhD Student of Agricultural Meteorology, Ferdowsi University, Iran. (mohsen_rahmdel@yahoo.com).

2 - Assistant Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

3 - Assistant Professor, Faculty of Mathematics, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Received: 3 November 2017

Revised: 30 September 2018

Accepted: 3 October 2018

Keywords: CAPE index, K index, Precipitable water index, Showalter index, Skew-T diagram.

DOI: 10.22055/jise.2018.24038.1706.

Introduction

The aim of this study was to investigate cloud's characteristics and some effective physical indices on rainfall in Mashhad. We initially studied cloudy sky in Mashhad by consulting meteorological yearbook of 1986-2010. Density and prevalence for medium and low clouds as well as density, prevalence and average for vertical clouds (type 2 cumulus and cumulonimbus) were calculated for every month. This study shows that in Mashhad the highest frequency of low and medium clouds occurs in cold and rainy months during winter and spring, while most of the clouds with vertical development occur in spring. We also studied freezing level in clouds in both rainfall and no-rainfall cases, using skew-T diagrams and radiosonde data during 1992 to 2011. The condition considered here was overcast sky. We obtained a regression equation in order to specify role of physical indices (CAPE, SI, K, PWT) in precipitation. At first, rainfall days of Mashhad were extracted from Khorasan Razavi meteorological department archive (1992 to 2011). On these days, six hour rainfall (00 to 06 Z) were determined. Then, instability and physical indices were obtained from radiosonde data of Mashhad weather station. A regression equation was estimated by analyzing the relationship between natural logarithm of six-hour rainfall as dependent variable and instability indices as independent variable. This research determines which relationship between some indices with natural logarithm of six-hour rainfall is nonlinear. Analysis of regression variance shows that regression was significant at 99% level. This means that at least one of the indices has a linear relationship with logarithm of six-hour rainfall. In this equation, due to significant level, CAPE and PWT were removed. Most relationships were found between SI and natural logarithm of six-hour rainfall.

Methodology

In this study, the method is documental, statistical, physical and analytical. At first, cloudiness of the sky in Mashhad was studied using archived data of Khorasan Razavi meteorological department (1986-2010). Then average temperature in cloud's base was estimated using skew-T diagrams in both rainfall and no rainfall conditions. Next, physical indices and radiosonde data of Mashhad station during 1992 to 2011 were extracted from Wyoming University website. Then, a regression equation was estimated to determine the relationship between natural logarithm of rainfall as dependent variable with physical indices as independent variable.

Result and discussion

We have investigated cloudiness of the sky in Mashhad using data of Mashhad synoptic station during 1986-2010. This study shows that the highest frequency of overcast cloudy sky occurs in March, February, Jan, December and April. Then, due to the importance of medium and low clouds in precipitation process, we have studied prevalence and average of low and medium clouds in each month. This research indicates that the highest frequency of low and middle clouds occurs in December, January, February, March, April and May. We reviewed the formation of low clouds in the sky. As shown in Table (1), the most semi-low cloudy sky occurs in December, January, February, March, April and May. Most overcast skies with low clouds happen in December, January, February, March and April. Because of importance the low clouds with vertical development (cumulus 2 and cumulonimbus), the formation of this clouds in this paper was investigated. As shown in Table (2), most vertical development of clouds occurs in March, April and May.

Table 1- Average number of days with semi-low cloudy sky and overcast low cloudy sky

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Semi cloudy	12.3	12	13.7	14.3	16.6	10.2	7.6	4.3	5	9.2	9.6	11.9
Overcast cloudy	6.5	7.5	7.3	7.5	8.4	0.8	0.6	0.1	0.7	2	5.8	8

Table 2- Average number of days with vertical development clouds

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
CB-CU2	4.9	9.3	14.8	19	20	9.1	5.4	3.2	3.4	6.7	8.7	7.3

We also found that the lowest temperature of cloud's base in rainy weather happens in January, March and December, as indicated in Table (3). In no-rainfall days with overcast cloudy sky, however, the lowest temperature of cloud's base occurred in October and December.

Table 3- Average temperature of cloud's base (rainy weather)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature	-4.5	-0.6	-3	-1.5	-0.3	-	-	-	-	-0.2	-0.3	-2.5

Then, a regression equation was estimated by analyzing the relationship between the natural logarithm of precipitation as dependent variable and instability indices as independent variable. There are five fundamental postulates without which the regression model will not be statistically and scientifically desirable: 1-The mean of model's errors is zero; 2-Errors of the model is not self-correlated; 3-Errors of the model have a constant variance; 4-Errors have a normal distribution; 5-In the multiple regression, there is no linearity between the independent variables (Jabbari Nooghabi, 2011). The normal distribution of dependent variables (precipitation) was examined using Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk test. According to the results, the assumed normality of dependent variables (precipitation) was refused. Therefore, Box-Cox converter parameter was used for data normalization and the natural logarithm of 6-hours rainfall (from 00Z to 06z) as dependent variable. Also, the backward method was used to enter independent variables and Durbin-Watson test to evaluate independence of errors. Another hypothesis was that the errors have normal distribution. Therefore, standard errors were calculated and regression standardized residual histogram was plotted in SPSS software. The results showed that mean of errors was zero and standard deviation was 1.39. Thus, the distribution of errors was normal. The VIF and Tolerance indices were calculated for multi collinearity explanation. The results indicate that all regression's preconditions have been met. Then, multiple correlation (R) and coefficient of determination (R^2) were calculated. The results show that only 7% of the natural logarithmic variations of rainfall can be explained by the regression line, which shows that the role of most indices in rainfall is probably non-linear. Analysis of regression variance show that regression

was significant at 99% level. This means that at least one of the indices has a linear relationship with logarithm of six-hour rainfall.

Conclusion

Highest frequency of overcast cloudy sky occurs in March, February, January, December and April while highest frequency of low and middle clouds occurs in cold and rainy months (December, January, February, March, April and May) in Mashhad. This study also indicates that most semi-low cloudy sky occurs in December, January, February, March, April and May. Overcast sky with low clouds occurs mostly in December, January, February, March and April. Clouds with vertical development occur in March, April, and May. The lowest temperature of cloud's base in rainy weather happens in January, December, and March, but in the days without rainfall (overcast cloudy sky), the lowest temperature in base of clouds occurred in October and December. In the regression model, the CAPE index and PWT index were removed due to significant level. The most relationships were found between SI and natural logarithm of six-hour rainfall. Therefore, the following equation was obtained:

$$\ln RA = -2.225 + 0.087SI + 0.076K \quad (1)$$

Acknowledgement

I would like to express my gratitude for the efforts of the late Dr. Hassan Asgari-Shirazi and Dr. Mohammad Kheirandish, who supervised and advised my master's thesis at the Islamic Azad University, North Tehran Branch. Parts of this article have been taken from this thesis.

References

- 1- Jabbari Nooghabi, H. 2011. *Statistical Analysis*, viewed 18 Apr 2017., <http://jabbarinh.profcms.um.ac.ir/index.php/e-courses>. (In Persian).



© 2020 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



واکاوی خصوصیات ابرها و برخی شاخص‌های فیزیکی موثر در بارش مشهد

محسن رحمدل^{۱*}، سید حسین ثنائی نژاد^۲ و هادی جباری نوقایی^۳

۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. mohsen_rahmdel@yahoo.com

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

۳- دانشیار، گروه آمار، دانشکده ریاضی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۱

بازنگری: ۱۳۹۷/۷/۸

دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۲

چکیده

نظر به اهمیت نوع، میزان و خصوصیات ابرناکی، هم‌چنین نقش رطوبت و شرایط ناپایداری در فرایند بارش، تحقیق زیر برای واکاوی مشخصات ابرها در فصول مختلف سال و بررسی برخی شاخص‌های فیزیکی تأثیرگذار بر بارش، انجام شد. به این منظور در ابتدا، اطلاعات ابرناکی شهر مشهد در دوره زمانی ۲۰۱۰ - ۱۹۸۶ از بانک اطلاعاتی اداره کل هواشناسی خراسان رضوی استخراج گردید. مقدار ابرناکی، فراوانی رخداد ابرهای پایین، متوسط و فراوانی رخداد ابرهای با رشد قایم شامل ابرهای کومولوس نوع ۲ و کومولونیمبوس، در ماه‌های مختلف سال مشخص شد. در بررسی خصوصیات فیزیکی ابرها، با توجه به نقش دمای ابر در فرایند بارش، با استفاده از نمودارهای جو بالای ایستگاه مشهد، در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱، دمای پایه ابر در ماه‌های مختلف مشخص گردید. سپس با توجه به اهمیت و نقش شرایط ناپایداری و رطوبت جو، در ایجاد بارش به بررسی رابطه بین برخی شاخص‌های ناپایداری، شامل شاخص CAPE، شاخص K، شاخص Showalter و شاخص آب قابل بارش، با میزان بارش پرداخته شد، در انتها با ایجاد یک معادله رگرسیونی، سهم هر کدام از این شاخص‌ها در میزان بارش مشخص گردید. بررسی‌ها نشان داد که ارتباط برخی از شاخص‌ها و لگاریتم بارش، به صورت خطی نمی‌باشد. اما، نتایج حاصل از تحلیل واریانس رگرسیون، نشان از معنی‌دار بودن رگرسیون در سطح ۹۹ درصد داشت یعنی حداقل یکی از شاخص‌های ناپایداری دارای رابطه خطی با لگاریتم طبیعی بارش شش ساعته است. مشخص شد که تنها ارتباط متغیرهای K و SI با لگاریتم طبیعی بارش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار هستند.

کلید واژه‌ها: شاخص آب قابل بارش، شاخص Showalter، شاخص CAPE، شاخص K، نمودارهای جو بالا.

مقدمه

(Anonymous, 2002). سیستم‌های افزایش بارندگی، در ابر شامل افزایش اثرات بالقوه دینامیکی و میکروفیزیکی می‌باشد (Woodley and Rosenfeld, 2004). فرایند (برخورد - هم‌آمیزی) ابر گرم برای آغاز بارندگی در اکثر ابرهای روی خشکی کارایی ندارد. تحول بارندگی در چنین ابرهایی نیاز به فعالیت فرایند ابر سرد دارند، به این معنی که ابرها بایستی بالاتر از سطح دمای صفر درجه بسط یابند (Bodaghjamali and Javnard, 2003). از تحقیقاتی که در گذشته در ارتباط با شاخص‌های ناپایداری و بارش انجام شده، می‌توان موارد ذیل را نام برد. Simonov و Georgiev (2001) توفندهای روی داده طی سال‌های ۱۹۸۹-۱۹۰۴ در جنوب کوهستان (Rhodopes) را به‌طور موردی، بررسی کردند. آن‌ها چندین شاخص ناپایداری را محاسبه کرده و همان‌طور که انتظار می‌رفت برای انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (Convective available potential energy) و سرعت‌های بالارو مقادیر بزرگی به‌دست آوردند. از طرفی Costa

انتخاب عنوان "شناخت ابرها" برای روز جهانی هواشناسی در سال ۲۰۱۷، حاکی از اهمیت فوق‌العاده ابرها در حوزه هوا، اقلیم و آب است. ابرها در چرخه آب و چگونگی توزیع جهانی آن نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند (Anonymous, 2017). با توجه به اهمیت ابرها در فرایند بارش در این پژوهش به بررسی خصوصیات ابرهای تأثیرگذار بر بارش در ایستگاه مشهد پرداخته شده است. فرایندهایی که منجر به بارش می‌شوند، به دو گروه فرایند ابر سرد (Cooled cloud) و ابر گرم (Warm cloud) تقسیم می‌شوند (Bodaghjamali and Javanmard, 2003). زمانی که دانشمندان متوجه شدند باران در نواحی حاره‌ای اغلب ناشی از ابرهایی است که کاملاً در دمای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد قرار دارند، اصطلاح ابر گرم را به کار بردند. در فرایند بارش ابر سرد وجود ذرات یخ ضروری است. بنابراین، این فرایند فقط در شرایطی که دمای متوسط محیط زیر صفر درجه سانتی‌گراد است، اتفاق می‌افتد

ناپایداری‌های منطقه مورد مطالعه در عصر اتفاق می‌افتد، اطلاعات جو بالا در ساعت ۱۲ گرینویچ در پیش‌بینی‌های آبی و هشدارهای سریع انواع پدیده‌های مخرب جوی، می‌تواند مفید واقع شود. در پژوهشی که توسط Arkian (2016) بر شاخص‌های ناپایداری در بازه زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۰، برای تخمین احتمال بارندگی به‌منظور عملیات بارورسازی ابرها در مشهد صورت گرفت، آستانه مناسب برای عملیات بارورسازی ابرها، برای شاخص آب قابل بارش (Precipitable Water Index)، ده میلی‌متر، شاخص Showalter، دو درجه سانتی‌گراد و شاخص K برابر ۲۴ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. برای شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی آستانه‌ای برای شروع بارش به‌دست نیامد، زیرا بارندگی‌ها در مقادیر مختلف این شاخص حتی مقادیر صفر اتفاق می‌افتاد. هدف از این پژوهش بررسی ابرهای تأثیرگذار در فرایند بارش در منطقه مشهد و همچنین به‌دست آوردن یک مدل رگرسیونی در ارتباط با برخی شاخص‌های فیزیکی است که در فرایند بارش نقش دارند. لذا ضمن بررسی شرایط ابرناکی منطقه، با توجه به فرایندهای فیزیکی مؤثر در بارش و تعاریف برخی شاخص‌های فیزیکی مرتبط با آن، بررسی میزان و سهم هر کدام از این فرایندها و شاخص‌های فیزیکی در فرایند بارش منطقه، مورد نظر می‌باشد. در کارهایی که قبلاً در این ارتباط صورت گرفته، تنها به تعیین مقدار آستانه هر کدام از این شاخص‌ها به‌منظور پیش‌بینی رخداد عناصر جوی پرداخته شده است، بدون این که سهم هر کدام از آن‌ها در فرایند بارش مشخص شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مشهد، مورد مطالعه در ۵۹ درجه و ۳ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۹ دقیقه، عرض شمالی قرار گرفته است. این شهر در انتهای جنوبی دشت توس واقع شده و رشته کوه هزار مسجد در شمال شرقی و رشته کوه بینالود در غرب و جنوب غربی آن قرار دارد. مشهد دارای ۲۵ ایستگاه باران‌سنجی، یک ایستگاه سینوپتیک و یک ایستگاه جو بالاست. ایستگاه هواشناسی مشهد در طول جغرافیایی ۵۹/۳۷ و عرض جغرافیایی ۳۶/۱۴ و ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد (شکل ۱).

et.al. (2001) شاخص‌های ناپایداری را برای سه طبقه مهم از طوفان‌ها که طی سال‌های ۱۹۹۷-۱۹۹۹ در شمال ایتالیا رخ داده بود، محاسبه کردند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، شاخص K نمی‌توانست نوع طوفان را به خوبی مشخص کند. در این بررسی‌ها مقادیر شاخص (Showalter) در بسیاری از توفندهای رخ داده، از ۳- درجه‌ی سلسیوس کمتر بود و کمی بیشتر از این مقدار نشان‌دهنده باریدن تگرگ و مقادیر خیلی بیشتر از ۳- درجه‌ی سلسیوس، نشان‌دهنده بارش باران بود. در این تحقیق، مقادیر بالای CAPE برای توفند و طوفان‌های تگرگ‌زا و مقادیر کمتری برای رگبارها به‌دست آمد. در پژوهشی دیگر Manzato (2003) طی دوره‌ای شش ساله (۱۹۹۵-۲۰۰۰) طوفان‌های تندری رخ داده در منطقه‌ای از ونیز ایتالیا را مورد بررسی قرار داد. چندین شاخص ناپایداری برای روزهایی که تگرگ گزارش شده، محاسبه و میانگین آن‌ها تعیین شد. مقدار میانگین آب قابل بارش برابر ۱۸/۸ میلی‌متر، شاخص Showalter، ۱/۳- درجه‌ی سلسیوس، شاخص بالاروی، ۳- درجه‌ی سلسیوس و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی، برابر با ۷۸۱ ژول بر کیلوگرم به دست آمد. در کار پژوهشی دیگری که توسط Simeonov و Georgiev (2003) روی طوفان‌های شدید باد/تگرگ رخ داده در صوفیه بلغارستان، طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۱، به عمل آمد، شاخص‌های ناپایداری برای این طوفان‌ها محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده، مقادیر بسیار زیاد شاخص‌های ناپایداری جو را نشان می‌دهد که برای مثال در مورد انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی مقدار ۳۷۸۵ ژول بر کیلوگرم، سرعت‌های بالارو ۲۱/۹ متر بر ثانیه و آب قابل بارش ۱۲/۹ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین در تحقیقی که توسط Sadeghi و Rezaian (2006) در دوره‌ای ۱۲ ساله (۲۰۰۲-۱۹۹۱) در اصفهان انجام گرفت، از بین شاخص‌های مورد بررسی، بهترین شاخص برای پیش‌بینی مقدار بارش، آب قابل بارش به‌دست آمد. در تحقیقی دیگر که توسط Salehi et.al. (2014) انجام گرفت، جمع‌بندی کاملی از حدود و آستانه پارامترها و شاخص‌های ناپایداری در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ برای پیش‌بینی انواع ناپایداری‌ها در مشهد تهیه شد. در این تحقیق به خوبی اهمیت اطلاعات جو بالای ساعت ۱۲ گرینویچ مشخص گردید و نشان داده شد که اکثر شاخص‌ها در ساعت ۱۲ گرینویچ نسبت به ساعت صفر گرینویچ، برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری وضعیت بهتری داشته‌اند. با توجه به این که اغلب



Fig. 1- Aerial image of the geographical location of Mashhad meteorological station

شکل ۱- تصویر هوایی موقعیت جغرافیایی ایستگاه هواشناسی مشهد

تعاریف و واژه‌ها

تراز چگالش (میعان) صعودکننده (Lifting Condensation Level): سطحی است که به وسیله صعود بسته هوای مرطوب و غیراشباع به صورت بی درروی خشک به دست آمده و در این سطح تراکم صورت می‌گیرد و پایه ابر در این نقطه تشکیل می‌گردد (Retallack, 1991).

تراز چگالش (میعان) همرفت (Convective Condensation Level): سطحی است که پایه ابر همرفتی در آن سطح تشکیل می‌شود. CCL همیشه بالاتر از LCL و یا حداکثر منطبق بر آن است (Retallack, 1991).

تراز همرفت آزاد (Level of Free Convection): سطحی است که اگر بسته هوا تا آن سطح بالا برده شود پس از آن بسته هوا در اثر آزاد شدن گرمای نهان حاصل از میعان و بارش گرم‌تر شده و بدون وارد کردن نیروی خارجی به صعود خود ادامه می‌دهد (Retallack, 1991).

تراز توازن (Equilibrium Level): سطحی است که بسته هوا در اثر آزاد شدن گرمای نهان حاصل از میعان و بدون وارد کردن نیرو تا آن سطح به صعود خود ادامه می‌دهد و در آنجا متوقف می‌شود، قله ابر هم در این سطح در نظر گرفته می‌شود (Retallack, 1991).

شاخص Showalter: این شاخص که در رابطه (۱) به آن اشاره شده است، تفاوت دمای محیط و دمای بسته هوا در تراز ۵۰۰ میلی‌بار است در شرایطی که فرض شود بسته اولیه در سطح ۸۵۰ میلی‌بار قرار داشته باشد. واحد آن درجه سانتی‌گراد است (Hamidi Mirkolayi, 2011).

شاخص K: مقدار شاخص K بیان‌گر تفاوت دما بین ۸۵۰ میلی‌بار و ۵۰۰ میلی‌بار که نشان دهنده کاهش قایم دما و دمای نقطه شبنم در ۸۵۰ میلی‌باری و تفاوت دما و دمای نقطه شبنم در سطح ۷۰۰ میلی‌باری است که تخمینی برای محتوای رطوبتی می‌باشد. واحد آن درجه سانتی‌گراد است که در رابطه شماره (۲) به آن اشاره شده است (Hamidi Mirkolayi, 2011).

انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE): انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی در حکم کاری است که نیروی شناوری باید روی بسته هوا عملی سازد تا بسته از تراز همرفت آزاد (LFC) تا تراز توازن (EI) بالا رود و واحد آن ژول بر کیلوگرم می‌باشد (Hamidi Mirkolayi, 2011) نحوه محاسبه‌ی این شاخص در رابطه شماره (۳) آورده شده است.

آب قابل بارش (PWC): که در رابطه (۴) به آن اشاره شده است، بنا به تعریف، مقدار آب چگالیده شده موجود در یک ستون هوای نمناک، آب قابل بارش نامیده و برحسب سانتی‌متر یا میلی‌متر بیان می‌شود (Hamidi Mirkolayi, 2011).

$$SI = T_{d_{500}} - T' \quad (1)$$

$$K = (T_{850} - T_{d_{500}}) + T_{d_{850}} - (T_{v_{500}} - T_{d_{v_{500}}}) \quad (2)$$

$$CAPE = \int_{LFC}^{Z_{EL}} Bdz \quad (3)$$

$$PWC = \int_0^Z \rho_w dz \quad (4)$$

تعریف متغیرهای استفاده‌شده در روابط (۱) تا (۴) در جدول (۱) نشان داده شده است. مقادیر شاخص‌های مذکور در شرایط ناپایداری در مناطق مختلف متفاوت است. اما خدمات ملی جوی National weather service (2019) زیر مجموعه مرکز ملی جوی و اقیانوسی و Atmospheric Administration در اسناد آموزشی مقادیر ذیل را که در جداول (۲) تا (۴) نشان داده شده است، برای پیش‌بینی ناپایداری بیان کرده است.

شاخص آب قابل بارش هر چند می‌تواند برای برآورد میزان بارش موثر باشد اما برای تشخیص میزان ناپایداری کاربرد چندانی ندارد.

جدول ۱- متغیرهای استفاده شده در شاخص‌های ناپایداری

Table 1- Variables used in instability indices

T': Saturation adiabatic temprature at level of 500 mbar	T ₈₅₀ : Temperature at level of 850 mbar
Z _{el} : Equilibrium Level	T ₅₀₀ : Temperature at level of 500 mbar
Z _{lfc} : Level of Free Convection	T _{d850} : Dewpoint temperature at level of 850 mbar
B: Maximum Buoyantcy per unit mass	T ₇₀₀ : Temperature at level of 700 mbar
ρ_w : Water vapour density	T _{d700} : Dewpoint temperature at level of 700 mbar

جدول ۲- ارتباط شاخص (SI) Showalter و میزان ناپایداری

Table 2- Relationship between showalter (SI) index and instability

SI over 0	Stable, but weak convection possible for SI = 1-2 if strong lifting is present.
SI = 0 to -3	Moderately unstable.
SI = -4 to -6	Very unstable.
SI below -6	Extremely unstable.

جدول ۳- ارتباط شاخص K و میزان ناپایداری

Table 3- Relationship between K index and instability

K below 30	Thunderstorms with heavy rain or severe weather possible (see note below).
K over 30	Better potential for thunderstorms with heavy rain.
K = 40	Best potential for thunderstorms with very heavy rain.

جدول ۴- ارتباط شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) و میزان ناپایداری

Table 4- Relationship between convective available potential energy (CAPE) index and instability

CAPE below 0	Stable.
CAPE = 0 to 1000	Marginally unstable.
CAPE = 1000 to 2500	Moderately unstable.
CAPE = 2500 to 3500	Very unstable.
CAPE above 3500-4000	Extremely unstable.

روش تحقیق

با رشد و توسعه قایم شامل کومولوس نوع ۲ و کومولونیمبوس مورد بررسی قرار گرفت. سپس در بازه زمانی ۲۰۱۱-۱۹۹۲ با استفاده از نمودارها و داده‌های جو بالایی ایستگاه مشهد و با استفاده از نرم افزارهای اسکیریتی به بررسی دمای پایه ابر و تراز یخبندان ابرهای منطقه در دو حالت بارندگی و بدون بارندگی پرداخته شد. میانگین دمای پایه ابر در هر یک از حالات مشخص گردید. به دلیل تاثیر دمای ابر در فرایند تشکیل بارش، نوع بارش و هم‌چنین تاثیر هسته های میعان و یخ‌ساز بر آن، دمای مزبور با استفاده از نمودارهای جو بالا (برای روزهای همراه با بارندگی و فاقد بارندگی) در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ تعیین گردید. مبنای استخراج اطلاعات، ابرناکی هفت هشتم به بالا (تمام ابری) در نظر گرفته شده است. در گزارش-هایی که بیشترین ابرهای تشکیل شده در مقیاس گسترده و از نوع ابرهای سامانه‌ای بود و بارندگی‌ها به صورت رگباری نبود، پایه ابر در تراز چگالش بالا (LCL) در نظر گرفته شد. لیکن مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بوده مانند ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس، پایه ابر در تراز چگالش همرفت (CCL) در نظر گرفته شد. سپس روزهایی که طی مدت بارش رخ داد، استخراج و میزان بارندگی در مقیاس زمانی سه ساعته، مشخص گردید. با توجه به اهمیت

در این پژوهش از دو نوع پایگاه داده استفاده شد. داده‌های سطحی شامل میزان ابرناکی و بارش که از بانک اطلاعاتی سازمان هواشناسی کشور از تارنمای سامانه Meteorological Organization (2018) درخواست داده‌های هواشناسی، اخذ شده و داده‌های جو بالا که شامل شاخص‌های ناپایداری (شاخص CAPE، شاخص K و شاخص Showalter) (University of Wyomong (2018) و هم‌چنین شاخص آب قابل بارش است که از تارنمای وابسته به دانشگاه ایومینگ آمریکا برداشت شده است. روش کار در این پژوهش اسنادی، آماری، فیزیکی و تحلیلی است. در این تحقیق ابتدا در بازه زمانی ۲۰۱۰-۱۹۸۶ به بررسی ابرناکی منطقه پرداخته شد و ماه‌های با بیشینه ابرناکی مشخص گردید و آن‌گاه با توجه به اهمیت نقش ابرهای پایین و متوسط در فرایند بارش، در هر ماه، فراوانی روزهایی که در آن، ابرهای پایین و متوسط تشکیل شده بود، استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بعد از آن میزان ابرناکی ابرهای پایین در شرایط نیمه ابری (سه تا شش هشتم ابری) و شرایط تمام ابری (هفت تا هشت هشتم ابری) بررسی شد. در مرحله بعد تشکیل ابرهای پایین

علت کمتر بودن p -مقدار ($0/00$) از سطح معنی داری $0/05$ فرض نرمال بودن توزیع خطاها رد شد. با توجه به سطح معنی داری این آزمون، مشخص شد خطاهای حاصل از مدل رگرسیون بارش بر متغیرهای توزیعی نرمال نیست. لذا برای نرمال کردن توزیع خطاها از تبدیلات توانی باکس-کاکس استفاده شد. در نتیجه تبدیلات منجر به تبدیل لگاریتم برای بارش شد. یکی از فرض‌هایی که در رگرسیون در نظر گرفته می‌شود، استقلال خطاها از یکدیگر است. در صورتی که فرضیه استقلال خطاها رد شود و خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشد، امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد (Rahimzadeh, 2011). به منظور بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از آماره دوربین واتسون استفاده شد. برای بررسی ثابت بودن واریانس خطا، نمودار پراکنش خطای استاندارد در مقابل مقادیر پیش بینی شده رسم گردید. برای بررسی وجود هم‌خطی مشکل‌زا از شاخص Tolerance استفاده شد. هم‌خطی وضعیتی است که نشان می‌دهد یک متغیر مستقل تابعی خطی از سایر متغیرهای مستقل است. اگر هم‌خطی مشکل‌زا باشد بدین معنی است که بین متغیرهای مستقل همبستگی بالایی وجود دارد و ممکن است با وجود بزرگ بودن R^2 مدل، اعتبار قابل قبولی نداشته باشد. برای هر متغیر مستقل، Tolerance نسبتی از پراکندگی آن متغیر است که توسط روابط خطی آن متغیر با سایر متغیرهای مستقل موجود در مدل توجیه نمی‌شود. پس از بررسی‌های انجام شده، با توجه به نتایج ضریب همبستگی چندگانه و ضریب تعیین مدل محاسبه شد. سپس برای مشخص کردن سهم هر یک از این شاخص‌ها در میزان تغییرات بارش، با توجه به نتایج حاصل یک معادله رگرسیونی بین لگاریتم بارش و شاخص‌های ناپایداری به دست آمد. در بررسی رگرسیون و آزمون‌های آماری مربوطه از نرم افزارهای SPSS (IBM SPSS STATISTIC20) و نرم افزار (MINITAB16) استفاده شده و نتایج همه آزمون‌ها با جزئیات در قسمت نتایج و بحث ارائه شده است.

نتایج و بحث

شرایط ابرناکی

یکی از معیارهای مهمی که می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ابرناکی و پتانسیل باران‌زایی در یک منطقه مورد مطالعه قرار گیرد، میزان ابرناکی و مقادیر ابر در آن ناحیه است که به صورت رخدادهای آسمان کمی ابری (یک تا دو هشتم)، نیمه ابری (سه تا شش هشتم) و تمام ابری (هفت تا هشت هشتم) از طرف سازمان هواشناسی جهانی بیان می‌شود. در این رابطه، در صد فراوانی آسمان تمام ابری، از اهمیت بیشتری برخوردار است. طبق اطلاعات استخراج شده از سالنامه‌های هواشناسی از تارنمای مربوطه Meteorological Organization (2014) در سازمان هواشناسی، بیشترین فراوانی رخداد تمام ابری به ترتیب در ماه‌های مارس با مجموع ۱۷۴ روز در طی این مدت و میانگین $7/6$ روز در هر ماه، فوریه با مجموع ۱۵۰ روز و میانگین $6/5$ روز در هر ماه، ژانویه با مجموع ۱۴۷ روز و میانگین $6/4$ روز در هر ماه، دسامبر با مجموع ۱۴۰ روز و میانگین

نقش شرایط ناپایداری و رطوبت جو، در فرایند بارش، با استفاده از داده‌های جو بالایی ایستگاه هواشناسی مشهد، از تارنمای وابسته به دانشگاه وایومینگ آمریکا، شاخص‌های ناپایداری شامل شاخص K ، شاخص (Showalter) و شاخص (CAPE) که نشان‌دهنده وضعیت ناپایداری جو و همچنین شاخص آب قابل بارش که بیانگر میزان رطوبت موجود در جو می‌باشد، در روزهایی که بارندگی رخ داده بود، به دست آمد. با توجه به این که اندازه‌گیری‌ها در ساعت صفر گرینویچ انجام شده بود، میزان بارش شش ساعته از ساعت ۰۰ تا ۰۶ گرینویچ مشخص گردید. در مجموع ۳۷۲ رخداد بارش شش ساعته در روزهایی که اطلاعات جو بالایی آن روزها موجود بود، اتفاق افتاد. سپس برای مشخص کردن سهم هر یک از شاخص‌ها در میزان بارش، ارتباط رگرسیونی بین این شاخص‌ها به‌عنوان متغیر مستقل و میزان بارش شش ساعته به‌عنوان متغیر وابسته، مورد بررسی قرار گرفت. برای وارد کردن متغیرهای مستقل از روش پس‌رو (Backward Method) استفاده شد. چون در روش پس‌رو ابتدا کلیه متغیرها وارد معادله شده و اثر کلیه متغیرها بر روی متغیر وابسته سنجیده می‌شود، در این روش متغیرهای ضعیف‌تر و کم اثرتر به تدریج از معادله خارج شده و در نهایت این مراحل تا زمانی ادامه می‌یابد که خطای آزمون معنی داری به ۱۰ درصد برسد. با کاهش متغیرهای مستقل به تدریج بر R^2 تعدیل شده افزوده شده تا جایی که با خروج بعضی از این متغیرها این میزان به بیشترین مقدار می‌رسد، طبیعی است در این روش متغیرهای مهم شناخته می‌شوند و در معادله نهایی باقی می‌مانند (Jabbari Nooghabi, 2011). آن‌گاه با استفاده از رگرسیون چندگانه، رابطه خطی موجود بین مجموعه شاخص‌ها به‌عنوان مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل و بارش به‌عنوان متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفت. در رگرسیون چندگانه مقادیر یک متغیر (متغیر وابسته یا Y) از روی مقادیر چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل X_1, X_2, \dots, X_k) برآورد می‌شود. این کار از طریق ساختن یک معادله خطی به شکل عمومی رابطه (۵) انجام می‌شود.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \varepsilon \quad (5)$$

در این معادله مقادیر b_1, \dots, b_k ضرایب رگرسیونی تفکیکی جزئی است و b_0 مقدار عرض از مبدا است و مقادیر x_1, \dots, x_k متغیرهای مستقل می‌باشند. ε خطای مدل می‌باشد. با توجه به روش برآورد ضرایب مدل رگرسیون، پنج فرض زیر به‌عنوان فرض‌های زیربنایی مدل وجود دارند که در صورت برقرار نبودن آن‌ها مدل رگرسیون به لحاظ آماری و علمی مدل مناسبی نخواهد بود.

- خطاهای مدل دارای میانگین صفر باشند.
- خطاهای مدل ناخود همبسته باشند.
- خطاهای مدل دارای واریانس ثابت (هرچند نامعلوم) باشند.
- خطاهای توزیع نرمال باشند.
- در رگرسیون چندگانه هم خطی بین متغیرهای مستقل نباشد (Jabbari Nooghabi, 2011). برای پی بردن به نرمال بودن یا نبودن توزیع خطاها از آزمون شاپیرو-ویلک استفاده شد که به

دفترهای سینوپتیک با کدهای $CL=2$, $CL=3$, $CL=9$ مشخص می‌شوند، گویای شرایط ناپایداری و همرفتی در جو می‌باشند (Omidvar, 2002). جدول (۶) میانگین روزهای همراه با تشکیل ابرها با توسعه قائم را نشان می‌دهد

دمای پایه ابر

برای تعیین پایه ابر به‌وسیله اطلاعات جو بالا از بخار آب موجود در لایه‌های جو استفاده می‌شود، سطحی که از بخار آب اشباع می‌شود یعنی دمای محیط و دمای نقطه شبنم برابر است، پایه ابر در آن سطح در نظر گرفته می‌شود (Anonymous, 2002). با توجه به کدهای هواشناسی، در گزارش‌هایی که بیشترین ابرهای تشکیل شده، ابرهای سیستمی بوده است و بارندگی‌ها به‌صورت رگباری نباشد، پایه ابر در سطح تراکم هوای صعودکننده یا LCL در نظر گرفته شد و در مواقعی که ابرها از نوع همرفتی بود، مانند ابرهای کومولوس و کومولونیمبوس پایه ابر در تراز چگالش همرفت یا CCL در نظر گرفته شد. از روی نمودارهای جو بالا (Skewt diagrams) دمای این سطوح را مشخص کرده و به‌عنوان دمای پایه ابر منظور گردید. از پارامترهایی که در تعیین و تشخیص فاصله مکانی و زمانی مناسب یک منطقه برای اجرای طرح‌های افزایش بارش مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. ارتفاع تراز یخبندان و یا موقعیت مکانی استقرار آن در ارتباط با ارتفاع پایه ابرهاست. بنابراین ماه‌هایی که در آن‌ها تمام یا قسمتی از ضخامت ابرها در بالای تراز یخبندان قرار می‌گیرند، زمان مناسب‌تری را برای اجرای طرح‌های باروری فراهم می‌کند (Omidvar, 2002). با استفاده از نمودارهای جو بالای موجود دمای پایه ابر، در روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی در بازه زمانی (۲۰۱۱-۱۹۹۲) تعیین شد. مبنای استخراج اطلاعات، ابرناکی هفت هشتم به بالا (تمام ابری) در نظر گرفته شد و بر این اساس اطلاعات جو بالای روزهای همراه با بارندگی و بدون بارندگی استخراج شد. بر این اساس اطلاعات ذیل که در جداول (۷) و (۸) خلاصه گردیده است، به‌دست آمد.

۶/۱ روز در هر ماه و آوریل با مجموع ۱۰۵ روز و میانگین ۴/۶ روز در هر ماه رخ داد و کمترین فراوانی رخداد آن در ماه‌های آگوست با فراوانی و میانگین صفر بود.

فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط

ابرها را علاوه بر نوع یا دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی براساس معیار ارتفاع کف یا پایه ابر از سطح زمین نیز می‌توان تقسیم‌بندی کرد. در رابطه با بارش عمدتاً توجه زیادی به ابرهای پایین و متوسط می‌شود (Omidvar, 2002). ارتفاع کف ابرهای پایین در منطقه مشهد براساس دیدبانی‌های انجام شده تا ارتفاع ۱۵۰۰ متر و ابرهای متوسط و بالاتر از ۱۵۰۰ متر تا ارتفاع ۳۰۰۰ متر می‌باشد. لذا از بانک اطلاعاتی سازمان هواشناسی و از تارنمای مربوطه اطلاعات مربوط به گروه ابر دریافت گردید و فراوانی تشکیل ابرهای پایین و متوسط مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تعداد روزهایی که در هر ماه در آن ابر پایین یا متوسط و یا هر دو تشکیل شده بود، مشخص گردید. بر این اساس بیشترین فراوانی رخداد ابرهای پایین و متوسط در دشت مشهد در ماه‌های دسامبر با میانگین ۲۶/۱ روز، ژانویه با میانگین ۲۵/۲ روز، فوریه با میانگین ۲۵/۱ روز، مارس با میانگین ۲۸/۸ روز، آوریل با میانگین ۲۷/۸ روز و می با میانگین ۲۸/۵ روز در ماه و کمترین آن در ماه‌های سپتامبر با میانگین ۱۲/۸ روز و آگوست با میانگین ۱۳/۲ روز رخ می‌دهد.

ابرناکی ابرهای پایین

در این قسمت با توجه به اهمیت ابرهای پایین در فرایند بارش، میزان ابرناکی ابرهای پایین براساس نیمه ابری و تمام ابری در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است.

ابرهای پایین با رشد و توسعه قائم

در فرایند بارش به‌خصوص بارش‌های رگباری به فراوانی رخداد، ارتفاع پایه، شرایط تشکیل ابرهای پایین که قابلیت بسط و گسترش قائم را دارند، توجه ویژه‌ای می‌شود. تشکیل این ابرها که در

جدول ۵- میانگین تعداد روزهای نیمه ابری و تمام ابر پایین (۲۰۱۰-۱۹۸۶)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Semi cloudy	12.3	12	13.7	14.3	16.6	1.2	7.6	4.3	5	9.2	9.6	11.9
Cloudy	6.5	7.5	7.3	7.5	8.4	0.8	0.6	0.1	0.7	2	5.8	8

جدول ۶- میانگین روزهای همراه با تشکیل ابرهای کومولوس نوع ۲ و کومولونیمبوس در مشهد (۲۰۱۰-۱۹۸۶)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
CB-CU2	4.9	9.3	14.8	19	20	9.1	5.4	3.3	3.4	6.7	8.7	7.3

جدول ۷- میانگین دمای پایه ابر در شرایط بدون بارندگی (۲۰۱۱-۱۹۹۲)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature(C°)	-2.4	-3.2	-1	-6.5	-8.6	-	-	-	-	-10.5	-8.6	-10

جدول ۸- میانگین دمای پایه ابر در شرایط همراه با بارندگی، (۲۰۱۱-۱۹۹۲)

Table 8- Mean cloud base temperature in rainy days (1992-2011)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature(C°)	-4.5	-0.6	-3	-1.5	-0.3	-	-	-	-	-0.2	-0.3	-2.5

ارتباط شاخص‌های فیزیکی و بارش

با توجه به اهمیت شرایط ناپایداری و رطوبت جو در فرایند بارش، در این قسمت به بررسی ارتباط برخی شاخص‌های ناپایداری شامل شاخص K، شاخص (Showalter) و شاخص CAPE که میزان شرایط ناپایداری در جو را نشان می‌دهد و همچنین شاخص آب قابل بارش که به نوعی بیانگر رطوبت موجود در جو می‌باشد، با میزان بارش پرداخته شد و سهم هر کدام از این شاخص‌ها در تغییرات میزان بارش تعیین شد. در مجموع ۳۷۲ رخداد بارش شش ساعته در روزهایی که اطلاعات جوبالای آن روزها موجود بود مشخص گردید. سپس برای مشخص کردن سهم هر یک از شاخص‌ها در فرایند بارش، ارتباط رگرسیونی بین این شاخص‌ها به عنوان متغیر مستقل و بارش شش ساعته به عنوان متغیر وابسته، مورد بررسی قرار گرفت. برای وارد کردن متغیرهای مستقل از روش پس‌رو استفاده شد. یعنی در این روش ابتدا همه متغیرهای مستقل پیشنهاد شده توسط محقق در معادله در نظر گرفته شده است و از یک معادله رگرسیون خطی چندگانه بهره برداری می‌شود. آن‌گاه برای دست یافتن به مدل مناسب، متغیرهایی که ضرورت ندارند، یکی یکی از مدل کنار گذاشته می‌شوند. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که متغیر مستقلی (غیر مهمی) برای خروج از مدل باقی نماند. معمولاً در روش‌های انجام رگرسیون شرط‌های ورود متغیرهای مستقل به معادله رگرسیون و حذف آن‌ها را مقدار آزمون همبستگی بین یک متغیر مستقل و متغیر p- مقدار کنترل می‌کنند. به عنوان نمونه چنانچه مقدار P کمتر از پنج درصد باشد، این متغیر به معادله افزوده می‌شود. شرط خروج را معمولاً مقدار p بیشتر یا مساوی ده درصد در نظر می‌گیرند (Jabbari Nooghabi, 2011). یکی از فرض‌های رگرسیون خطی این است که توزیع داده‌های متغیر وابسته یا به‌طور معادل خطاهای حاصل از مدل رگرسیون متناظر، نرمال یا نزدیک به نرمال باشد. در بررسی نرمال بودن توزیع متغیر وابسته (بارش) با آزمون شاپیرو-ویلک مشخص گردید، به علت کمتر بودن مقدار p (۰/۰۰) از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ فرض نرمال بودن توزیع خطاها رد شد. بنابراین، برای نزدیک کردن داده‌ها به توزیع نرمال یا به عبارتی نرمال‌تر کردن داده‌ها از تبدیل باکس-کاکس استفاده شد. در تبدیل باکس-کاکس بهترین مقدار پیشنهادی برای پارامتر تبدیل (λ) عدد صفر به دست آمد، به این معنی که برای نرمال‌سازی باید از تبدیل لگاریتمی استفاده نمود. بنابراین برای انجام رگرسیون از لگاریتم طبیعی مقدار بارش شش ساعته به عنوان متغیر وابسته استفاده شد. برای بالا بردن قدرت پیش‌بینی، در تحلیل رگرسیون داده‌های پرتی که به اندازه سه انحراف معیار از مرکز داده‌ها فاصله داشتند، نادیده گرفته شدند. از دیگر فرض‌هایی که در رگرسیون مد نظر قرار گرفت، استقلال

خطاها از یکدیگر بود که برای این منظور از آماره دوربین-واتسون استفاده شد. مقدار آماره دوربین-واتسون ۱/۹۶۸ به دست آمد که چون در فاصله بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار داشت، فرض عدم وجود خودهمبستگی بین خطاها پذیرفته شد. برای بررسی واریانس خطاها از نمودار پراکنش استاندارد خطاها و مقادیر پیش‌بینی آن استفاده شد که در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است خطاها دارای واریانس ثابت می‌باشد. برای بررسی نرمال بودن خطاها نیز از نمودار هیستوگرام استفاده شد که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده است. در جدول (۹) آمار مانده‌ها، مشاهده می‌شود میانگین خطاها صفر و انحراف استاندارد آن ۱/۳۹ می‌باشد. بنابراین توزیع خطاها تقریباً نرمال است. برای تفسیر آزمون هم‌خطی که نشان‌دهنده وضعیتی است که یک متغیر مستقل تابعی خطی از سایر متغیرهای مستقل است از شاخص Tolerance استفاده شد. همان‌گونه که در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود، برای کلیه شاخص‌های ناپایداری مقادیر Tolerance بیشتر از ۰/۱ می‌باشد، که وجود عدم هم‌خطی بین متغیرهای مستقل را مشخص می‌کند. بنابراین فرض استقلال متغیرها از یکدیگر پذیرفته می‌شود. بنابراین چون همه پیش‌شرط‌های رگرسیون خطی رعایت شده است، بنابراین می‌توان از روش تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی استفاده کرد. بنابراین ضریب همبستگی چندگانه و ضریب تعیین محاسبه شده است. R ضریب همبستگی چندگانه که میزان همبستگی چندگانه بین شاخص‌های ناپایداری و لگاریتم طبیعی بارش را مشخص می‌کند، برابر ۰/۲۵۸ به دست آمد. R^2 به مجذور ضریب همبستگی چندگانه یا ضریب تعیین معروف است که میزان تبیین واریانس و تغییرات متغیر وابسته توسط مجموعه‌های مستقل را نشان می‌دهد که مقدار ۰/۰۶۷ را نشان داد. یعنی حدود هفت درصد از تغییرات لگاریتم طبیعی بارش توسط خط رگرسیونی قابل تبیین است که نشان می‌دهد احتمالاً نقش اکثر این شاخص‌ها در بارش کاملاً خطی نمی‌باشد. در جدول (۱۱) معنی‌دار بودن رگرسیون توسط آماره F محاسبه شده است. سطح معنی‌داری محاسبه شده برای این آماره نشان می‌دهد رگرسیون در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. بنابراین حداقل یکی از شاخص‌های ناپایداری دارای رابطه خطی با لگاریتم بارش شش ساعته است. ضرایب رگرسیونی نشان‌دهنده میزان تغییرات در لگاریتم طبیعی بارش به‌ازای تغییری به اندازه یک انحراف معیار در شاخص‌های ناپایداری است. در جدول (۱۲) ضرایب رگرسیونی هر کدام از متغیرهای مستقل و مقدار ثابت نشان داده شده است. با توجه به نتایج، تنها سطح معنی‌داری مقدار ثابت و ضرایب رگرسیونی K و SI کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. بنابراین ارتباط این متغیرها با لگاریتم طبیعی بارش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار هستند. با توجه به سطح معنی‌داری شاخص‌های

CAPE و آب قابل بارش، این شاخص‌ها از مدل حذف شدند. بنابراین ارتباط رگرسیونی شاخص‌های ناپایداری با لگاریتم بارش شش ساعته به صورت رابطه (۶) به دست آمد.

$$\ln RA = -2.225 + 0.087SI + 0.076K \quad (6)$$

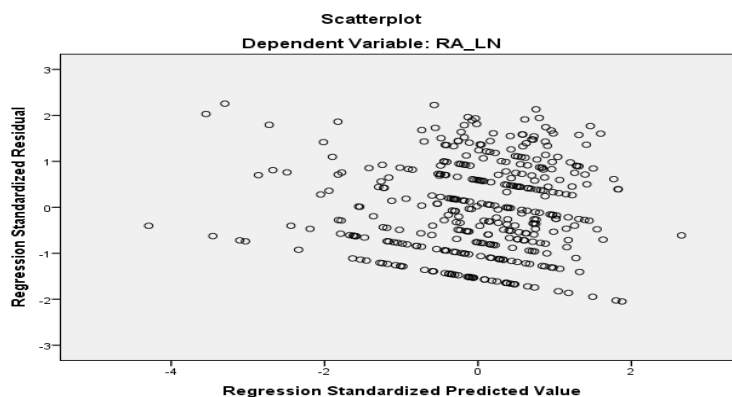


Fig. 2- Diagram of distribution of predicted values against residual (Error variance)

شکل ۲- نمودار پراکنش مقادیر پیش بینی شده در برابر مانده ها (واریانس خطا)

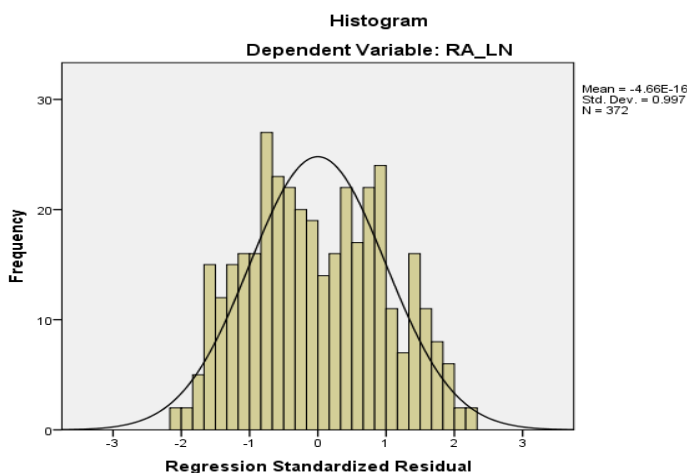


Fig. 3- Histogram of error distribution

شکل ۳- هیستوگرام توزیع خطاها

جدول ۹- آمار مانده ها (متغیر وابسته RA_LN)

Table 9- Residual statistics

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	-1.7394	0.8570	-0.1347	0.37377	372
Residual	-2.86993	3.16015	0.00000	1.39726	372
Std. Predicted Value	-4.293	2.653	0.000	1.000	372
Std. Residual	-2.048	2.256	0.000	0.997	372

جدول ۱۰- شاخص Tolerance و VIF

Table 10- Tolerance and VIF index

Index	Tolerance	VIF
SI	0.298	3.354
K	0.298	3.354

جدول ۱۱- تحلیل واریانس رگرسیون

Table 11- Analysis of regression variance

Model	Sum of Squares	Df	Mean Squares	F	Sig.
Regression	51.830	2	25.915	13.202	0.000
Residual	724.318	369	1.963		
Total	726.148	371			

جدول ۱۲- ضرایب رگرسیونی

Table 12- Regression coefficients

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Constant	-2.225	0.493	-	-	0.00
SI	0.087	0.208	0.287	4.510	0.002
K	0.076	0.016	0.446	3.120	0.000

شاخص CAPE و بارش، صورت بگیرد. در مورد آب قابل بارش نیز با توجه به نتایج پیشنهاد می‌شود ارتباط این شاخص با میزان بارندگی ۲۴ ساعته به جای بارش شش ساعته مورد بررسی قرار بگیرد.

نتیجه گیری

بررسی میزان ابرناکی منطقه نشان داد که بیشترین شرایط ابرناکی موثر در فرایند بارش، مربوط به ابرهای پایین، متوسط و همچنین ابرهای با رشد قایم، شامل ابرهای همرفتی و کومه‌ای عموماً در اواخر پاییز، زمستان و اوایل بهار می‌باشد. همچنین بررسی تراز یخبندان و دمای پایه ابر نشان داد که کمترین درجه حرارت پایه ابر در شرایط بارندگی مربوط به فصل زمستان می‌باشد. بررسی همبستگی بین شاخص‌ها و بارش نشان داد که ارتباط برخی از شاخص‌ها و لگاریتم بارش به صورت کاملاً خطی نمی‌باشد. در عین حال نتایج حاصل از تحلیل واریانس رگرسیون، مبنی بر معنی‌دار بودن رگرسیون در سطح ۹۹ درصد به دلیل وجود رابطه خطی یکی از شاخص‌های ناپایداری با لگاریتم طبیعی بارش شش ساعته می‌باشد. مشخص شد که صرفاً ارتباط متغیرهای K و SI با لگاریتم طبیعی بارش در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار هستند.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از زحمات مرحوم دکتر حسن عسگری شیرازی و دکتر محمد خیراندیش که راهنمایی و مشاوره پایان‌نامه کارشناسی ارشد اینجانب در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال را بر عهده داشتند کمال تشکر را دارم. در مباحثی از این مقاله از اطلاعات این پایان‌نامه استفاده شده است.

با توجه به ضرایب رگرسیونی مشخص شد از بین شاخص‌های نامبرده شده، شاخص شوالتر (SI) و شاخص k رابطه قویتری با لگاریتم طبیعی بارش شش ساعته دارد و تغییر در آن باعث تغییرات بیشتری در لگاریتم بارش خواهد گردید. بنابراین با توجه به پارامترهایی که در تعریف این شاخص‌ها به کار رفته‌اند به نظر می‌رسد تفاوت دما بین بسته هوا و محیط اطراف در سطح ۵۰۰ میلی‌باری که به نوعی بیانگر شرایط ناپایداری است، تفاوت دما بین سطوح ۸۵۰ میلی‌باری و ۵۰۰ میلی‌باری که نشان‌دهنده کاهش قایم دماست و همچنین محتوای رطوبتی در سطوح ۸۵۰ و ۷۰۰ میلی‌باری که تعیین‌کننده رطوبت مورد نیاز جهت بارش می‌باشد، احتمالاً بر میزان بارش تاثیرگذار است. با توجه به نتایج به دست آمده، و سطح معنی‌داری، شاخص‌های CAPE و آب قابل بارش از معادله حذف شدند. به نظر می‌رسد از آنجا که فرایندهای همرفتی بیشتر در بعد ازظهرها اتفاق می‌افتد و زمان اندازه‌گیری اطلاعات جو بالا و میزان شاخص CAPE (نشان‌دهنده حداکثر انرژی ممکن بسته هوای ناپایدار است) در بازه زمانی مورد نظر در ساعت صفر گرینویچ اندازه‌گیری شده بود (در منطقه مورد مطالعه این زمان مصادف با ساعات قبل از طلوع خورشید بود) که در این ساعات غالباً شرایط پایداری حاکم است. بنابراین نمی‌توان اعلام کرد این شاخص در ساعت صفر گرینویچ بر میزان بارش شش ساعته تاثیرگذار است. ولی با توجه به وقوع شرایط همرفت در ساعات بعد از ظهر و از طرفی نبود اطلاعات جو بالا در ساعت دوازده گرینویچ به دلیل عدم اندازه‌گیری و ارسال رادبوسوند در این ساعت به مقدار کافی، در بازه زمانی مورد نظر، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری در مورد ارتباط میزان شاخص CAPE با بارش در ساعت دوازده گرینویچ در آینده و با استفاده از سایر روش‌های آماری، با توجه به غیرخطی بودن رابطه

References

- 1- Anonymous, 2002. The Final Report of Artificial Weather Modification, Feasibility of Cloudseeding in Khorasan and Test it. Report No 6. autumn. Meteorological Research Institute. *Technical Rep. INP-CHL, 6.* (In Persian).

- 2- Anonymous . 2017. viewed 15 may 2017., http://www.irimo.ir/far/services/general_content
- 3- Arkian, F., 2016. The potential of rainfall for the cloud Seeding operations based on Instability Indices. *Journal of Climatology & weather forecasting*, 4(2), pp1-4.
- 4- Bodaghjamali, J. and. Javnmard, S. 2003. *Basic concepts of weather modification using cloudseeding technology*. Booklet Climatology Research Institute. (In persian)
- 5- Costa, S., Mezzasalma, P., Levizzani, V., Alberoni, P.P. and Nanni, S., 2001. Deep convection over Northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis. *Atmospheric Research*, 56(1-4), pp.73-88.
- 6- Hamidi Mirkolayi. E. 2011, Determination of cloud Seeding potential based on instability indices in Mashhad region. 2011, *Msc Thesis*. Islamic azad university-Tehran north branch. p.11 (In Persian).
- 7- Meteorological Organization., viewed 15 June 2018. <https://data.irimo.ir>
- 8- Meteorological Organization., viewed 12 June 2014., <http://www.irimo.ir/farsi/publication/index.aspx>
- 9- Jabbari Nooghabi, H. 2011. *Statistical Analysis*, viewed 18 Apr 2017.,: <http://jabbarinh.profems.um.ac.ir/index.php/e-courses>. (In Persian).
- 10-Manzato, A., 2003. A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research*, 67, pp.417-454.
- 11-National weather service., 2019. *NWS Louisville Scientific Training Documents*. Convective/Severe Weather Environment. convective season Environmental Parameters and Indices. Env Parameters and Indices. viewed 18 June 2016., <https://www.weather.gov/lmk/indices>. Accessed 8 Apr. 2019.
- 12-Omidvar , K ., 2002. Some characteristics of climatology of cloud in southern mountains of Kerman to assess the possibility of the performance of cloudseeding project, in the. *Humanities*, 27 , pp 37-50. (In Persian).
- 13-Rahimzadeh, F., 2011. *Statistical methods in meteorological studies*. Seyed bagher hoseini Publication, Tehran. p.436. (In Persian).
- 14-Retallack, B.J., 1991. *Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico de la clase IV: Meteorología (2 ed.)*. Organización Meteorológica Mundial.
- 15-Sadeghi, H.S. and Rezaeian, M., 2006. Study of few instability indices and potential of convective clouds for the Esfahan area. *Journal of Earth and Space Physics*, 2006, 32(2),. pp.83-98. (In Persian).
- 16-Salehi, H., SanaeiNejad, H., Mousavi Baygi, M., 2014 Analysis of instability indices during severe weathers, in Mashhad metropolis. *Geography and Environmental Hazards*. 9, . pp. 113-123. (In Persian).
- 17-Simeonov, P. and Georgiev, C.G., 2001. A case study of tornado-producing storm south of Rhodopes mountain in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Research*, 57(3), pp.187-199.
- 18-Simeonov, P. and Georgiev, C.G., 2003. Severe wind/hail storms over Bulgaria in 1999–2001 period: synoptic-and meso-scale factors for generation. *Atmospheric Research*, 67, pp.629-643.
- 19-University of Wyomong. viewed 12 Oct 2018., <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- 20- Woodley, W.L. and Rosenfeld, D., 2004. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding programs in Texas. *Journal of Applied Meteorology*, 43(2), pp.249-263.