

تحلیل پایداری جوّی و همبستگی آن با غلظت آلاینده‌های هوا: بررسی موردی بحران آلودگی هوای تهران

خسرو اشرفی^۱ و علی احمدی ارکمی^{*}

^۱دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۱۳)

چکیده

در تحقیق حاضر سعی شده است تا با بررسی شرایط جوّی در بحران‌های آلودگی هوا، رابطه معنی‌داری بین غلظت آلاینده‌های کربن مونوکسید و ازت دی‌اکسید و پارامترهای هواشناسی مانند دما، سرعت و جهت باد و عدد بی‌بعد ریچاردسون حاصل شود. برای این مهم، یک دوره یازده روزه، از ۳۰ نوامبر تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۲ در نظر گرفته شد که در این دوره یک وارونگی دمای شدید و به تبع آن شرایط پایداری طولانی‌مدت برای هوای شهر تهران مشاهده شده بود. رده‌های پایداری حاکم با استفاده از روش ترنر (Turner) و روش گرادیان دمایی مورد بررسی قرار گرفت. پس از تایید بحرانی بودن شرایط حاکم از روی مقایسه رده‌های پایداری، بیشینه عمق آمیختگی و میدان دید، ارتباط بین پارامترهای جوّی و غلظت آلاینده‌ها با به‌کارگیری روش وایزش (رگرسیون) چندمتغیره به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در دوره مورد بررسی، شرایط پایدار در ۸۹ درصد مواقع غالب بوده و کمترین مقدار بیشینه عمق آمیختگی در روز ششم و به میزان ۶۰۰ متر رسیده است. همچنین ضرایب همبستگی غلظت بهنجار شده آلاینده کربن مونوکسید به پارامترهای دما، سرعت باد در راستای غرب به شرق، سرعت باد در راستای جنوب به شمال و عدد ریچاردسون به ترتیب برابر ۰/۷۰۷ و ۰/۰۷۸ و ۰/۰۲۸ و ۰/۰۱۹ است و این همبستگی‌ها برای آلاینده ازت دی‌اکسید به ترتیب برابر ۰/۳۵۳ و ۰/۰۱۶ و ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۹- به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، رگرسیون، روش ترنر، رده پایداری، غلظت، وارونگی دما

Atmospheric stability analysis and its correlation with the concentration of air pollutants: A case study of a critical air pollution episode in Tehran

Khosro Ashrafi¹ and Ali Ahmadi Orkomi^{1*}

¹Faculty of environment, University of Tehran, Iran

(Received: 15 September 2013, accepted: 3 May 2014)

Summary

In the present survey, it has been tried to demonstrate a significant correlation between air pollutant concentrations and meteorological parameters, by the study of the atmospheric conditions in an air pollution episode. Carbon monoxide and nitrogen dioxide were selected as air pollutants. Temperature, wind speed and direction and the dimensionless Richardson number were considered as the meteorological parameters in this study. To this aim, a period of eleven days from 30 November to 10 December 2012 was

*Corresponding author:

Orkomi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

considered. In this period, a severe temperature inversion and consequently a long-term stable situation was seen in the Tehran weather. The governing stability classes were studied using the Turner algorithm and vertical temperature gradient scheme. For the mentioned period, the sun altitude, wind speed at the height of 10 meters, total cloud cover and ceiling were extracted from the U.S. Naval Observatory web page (<http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.php>) to be used in the Turner algorithm. The stability analysis showed that for this time interval, stable conditions prevailed in 89% of cases. The sounding data was collected from the Mehrabad weather station. By the sounding data, the daily maximum mixing depth was calculated and the vertical trend of the temperature was plotted in each day during this period. The morning vertical temperature gradients showed a strong temperature inversion in these eleven days. Also, the maximum mixing depth decreased to the minimum value of 600 meters on the 6th day of the time interval. The maximum mixing height and visibility graphs also confirmed that the atmospheric mixing decreased and consequently more pollutants were trapped in the middle of the period. Once confirming critical conditions by comparing the stability classes, maximum mixing depth and the visibility, the correlation between atmospheric parameters and pollutants concentration was obtained by multiple regression method. Among the meteorological parameters that were considered, temperature, wind speed, wind direction and the Richardson number had a greater correlation with the pollutant concentration. The bulk Richardson number was calculated from the sounding data and used in the regression. The CO and NO₂ concentrations were gathered from the pollutant concentration measuring station which is located on the region-10 municipality building, 2500 meters far from the Mehrabad weather station. The coefficients of correlation between the normalized CO concentrations and temperature, West-East component of wind, South-North component of wind and the Richardson number were 0.707, 0.078, 0.028 and -0.019, respectively. And for NO₂ concentration, the correlation coefficients were 0.353, 0.016, 0.015 and -0.019, respectively. It could be observed that the coefficients of temperature and surface wind for the CO concentration were almost twice the corresponding coefficients for the NO₂ concentration. The reason is that the NO₂ concentration has been influenced by chemical and photochemical reactions and the mixing depth, while the CO concentration is only affected mainly by the rate of transportation and the mixing depth. In fact, the CO concentration had a stronger functionality to temperature and wind speed than the NO₂ concentration. In the most cases, the Richardson number had a positive value and by increasing its value (in the early morning hours or night hours), the pollutant concentration were reduced. Therefore, as expected, its coefficient were negative in both regressions.

Keywords: Air pollution, regression, turner scheme, stability class, concentration, temperature inversion

۱ مقدمه

عمومی دارد، از مدت‌ها پیش مورد توجه بوده است. از تحقیقات به ثبت رسیده، می‌توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل مهم در پراکندگی و یا حبس آلاینده‌ها، شرایط جوئی حاکم بر منطقه است. در این زمینه می‌توان به تحقیقات سلیک و کادی (۲۰۰۷) که تاثیر باد را روی غلظت آلاینده‌ها در شهر کارابوک ترکیه بررسی

امروزه با افزایش جمعیت شهرها و همچنین صنعتی شدن اغلب شهرهای بزرگ، غلظت آلاینده‌های هوا به سرعت افزایش یافته است. این مسئله در تحقیقی که مایر (۱۹۹۹) به انجام رساند، گزارش شده است. بررسی آلودگی هوای کلان‌شهرها به علت اینکه تاثیر مستقیم روی سلامت

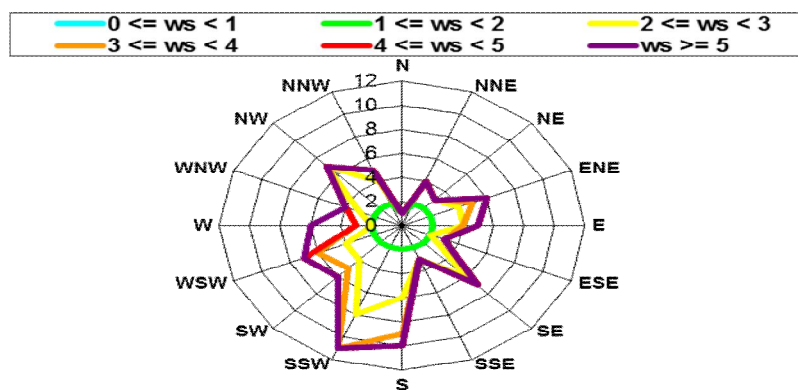
تهران مشاهده شده بود. برای این منظور داده‌های هواشناسی ایستگاه همدیدی مهرآباد شهر تهران، در این یازده روزه در هر روز و در فاصله‌های زمانی ۳ ساعته جمع‌آوری شد. ابتدا داده‌های موردنیاز از داده‌های خام دریافتی استخراج شد و در جدول‌های مربوط، برای ساعت‌های متفاوت و روزهای موردنظر دسته‌بندی شد. داده‌های سرعت و جهت باد در دوره مورد بررسی به‌صورت گلباد در شکل ۱ نشان داده شده است. از روی نمودار گلباد شکل ۱ می‌توان یافت که غالب بادهای وزیده از سمت جنوب و جنوب غربی است و بیشینه سرعت ثبت شده برابر با ۱۱ متر در ثانیه است. در بخش دیگری از تحقیق، به‌منظور بررسی ارتباط بین غلظت آلاینده‌ها و پارامترهای هواشناسی، از وایزش (رگرسیون) چندمتغیره استفاده شد.

از میان پارامترهای هواشناسی به‌کار رفته در وایزش، غیر از عدد ریچاردسون، بقیه از داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه مهرآباد انتخاب شدند. عدد ریچاردسون که بیانگر نسبت اهمیت همرفت گرمایی به تلاطم مکانیکی است، به دو صورت کپای و محلی تعریف می‌شود. در این تحقیق از تعریف کپای عدد ریچاردسون استفاده شده است. مقدار این عدد از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

کرده‌اند، کوهادار آگلو و دمیرسی (۱۹۹۷) که تاثیر شرایط جوئی روی آلودگی هوای شهر ترابوزان را بررسی کرده‌اند، و بررسی تاثیر میزان تهویه و رطوبت روی انباشت آلاینده‌ها در سائوپانالو از سوی سانچز کویلو و آندرید (۲۰۰۲) در سطح بین‌المللی اشاره کرد. همچنین اشرفی و هشیاری‌پور (۲۰۱۰) با جمع‌آوری و تحلیل داده‌های هواشناسی و آلودگی شهر تهران در سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۰ ارتباط معنی‌داری بین شرایط پایداری و غلظت کربن مونوکسید گزارش کرده‌اند. شرعی‌پور و علی‌اکبری بیدختی (۱۳۸۹) تاثیر ترافیک صبحگاهی، پایداری ایستایی شبانه و کاهش ارتفاع آمیختگی در شب را روی غلظت کربن مونوکسید در شهر تهران بررسی کرده‌اند. در تحقیق حاضر سعی شده است تا با بررسی شرایط جوئی در بحران‌های آلودگی هوا، رابطه معنی‌داری بین غلظت آلاینده‌های کربن مونوکسید و ازت دی‌اکسید با پارامترهای هواشناسی مانند دما، سرعت و جهت باد و عدد بی‌بعد ریچاردسون حاصل شود.

۲ تحلیل داده‌های هواشناسی و محاسبات پایداری

در این تحقیق به‌منظور بررسی پایداری جوئی شهر تهران، یک دوره یازده روزه از ۳۰ نوامبر تا ۱۰ دسامبر در نظر گرفته شد که در این دوره وارونگی دمای شدیدی و به تبع آن شرایط پایداری طولانی‌مدت برای هوای



شکل ۱. نمودار گلباد دوره مورد بررسی از ۳۰ نوامبر تا ۱۰ دسامبر ۲۰۱۲.

جدول ۱. شاخص تابشی و سرعت باد در محاسبات رده پایداری ترنر (اشنل و دی (۲۰۰۰)).

سرعت باد		شاخص تابشی خالص						
(knots)	(m/s)	۴	۳	۲	۱	۰	-۱	-۲
۰ و ۱	۰/۷-۰	۱	۱	۲	۳	۴	۶	۷
۲ و ۳	۱/۸-۰/۸	۱	۲	۲	۳	۴	۶	۷
۴ و ۵	۲/۸-۱/۹	۱	۲	۳	۴	۴	۵	۶
۶	۳/۳-۲/۹	۲	۲	۳	۴	۴	۵	۶
۷	۳/۸-۳/۴	۲	۲	۳	۴	۴	۴	۵
۸ و ۹	۴/۸-۳/۹	۲	۳	۳	۴	۴	۴	۵
۱۰	۵/۴-۴/۹	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۵
۱۱	۵/۹-۵/۵	۳	۳	۴	۴	۴	۴	۴
۱۲ ≥	۶ ≥	۳	۴	۴	۴	۴	۴	۴

شاخص تابش خالص دخالت دارند. شاخص تابش خالص با روش عرضه شده در جدول ۲ به دست می آید. البته شاخص تابش خالص در هنگام روز، به رده تابشی بستگی دارد که این متغیر نیز با توجه به ارتفاع خورشید در آسمان، در جدول ۳ محاسبه می شود. با استفاده از الگوریتم ترنر و داده های استخراج شده، معیار پایداری برای بازه های زمانی سه ساعته برای روزهای ۳۰ نوامبر تا ۱۰ دسامبر محاسبه شد.

رده های پایداری برای بازه های زمانی سه ساعته در کل دوره مورد بررسی تعیین شد. داده های مربوط به تابش خورشید، ابرناکی و دمای هوا برای دوره پیش گفته با فواصل زمانی ۳ ساعت که در کل ۲۶۴ ساعت است، در جدول ۴ گنجانده شده است. داده های مربوط به تغییرات دما در راستای قائم نیز از داده های گمانه زنی ایستگاه مهرآباد جمع آوری شد.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ تحلیل پایداری

با استفاده از داده های مورد نیاز، رده های پایداری از روش ترنر برای دوره زمانی مورد نظر با فواصل زمانی سه

$$Ri = \frac{g \Delta \theta_v \Delta z}{\theta_v [(\Delta U)^2 + (\Delta V)^2]}, \quad (1)$$

که U و V مولفه های سرعت افقی باد هستند و θ_v دمای پتانسیلی مجازی هوا است. مقادیر مثبت و منفی این عدد به ترتیب نشان دهنده پایداری و ناپایداری جوئی است. مقدار مثبت بزرگ، نشان دهنده وارونگی دمایی شدید و میرایی تلاطم مکانیکی است و مقدار مثبت کوچک، نشان دهنده این است که تلاطم مکانیکی توسط چینه بندی قائم ضعیف شده است. در مقابل عدد منفی بزرگ، نشان دهنده غالب شدن همرفت بر تلاطم مکانیکی و عدد منفی کوچک نشان دهنده وجود همرفت و تلاطم مکانیکی و تاثیر به نسبت یکسان آنها است. به منظور بررسی پایداری جوئی از الگوریتمی که ترنر عرضه کرده است، استفاده شد. طبق این الگوریتم پارامترهای سرعت باد در ارتفاع ده متری، ارتفاع خورشید در آسمان (و بگاه رصدخانه کشتیرانی ایالات متحد آمریکا، ۲۰۱۲)، ابرناکی کل و بالاترین ارتفاع ابرها روی شرایط پایداری جوئی موثر هستند. در جدول ۱ الگوریتم ترنر برای محاسبه شاخص پایداری داده شده است.

برای محاسبه شاخص پایداری دو عامل سرعت و

جدول ۲. الگوریتم ترنر برای یافتن شاخص تابشی کل (اشنل و دی، ۲۰۰۰).

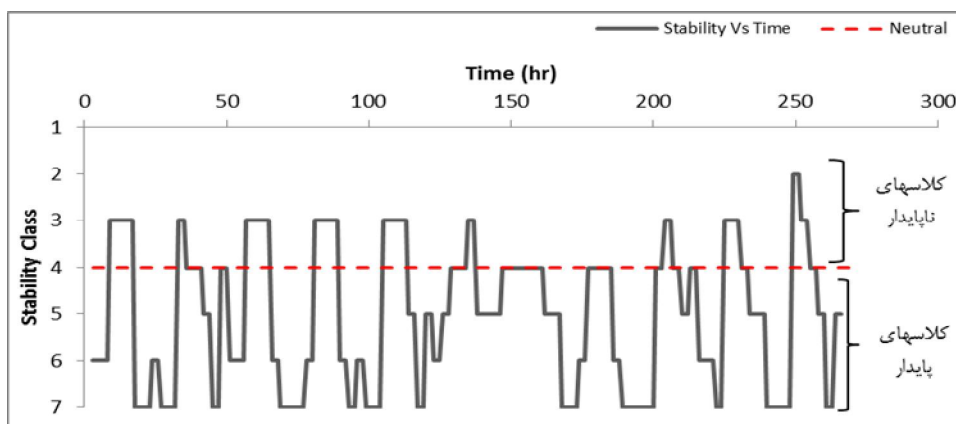
۱- اگر پوشش کلی ابر ۸/۸ باشد و ارتفاع پایه ابر کمتر از ۷۰۰۰ فوت باشد، شاخص تابشی کل صفر است (به شب یا روز بستگی ندارد).
۲- برای زمان شب (یک ساعت قبل از غروب و یک ساعت بعد از طلوع آفتاب):
الف- اگر کل پوشش ابر کمتر یا مساوی ۰.۴ باشد، شاخص تابشی کل برابر ۲- است.
ب- اگر کل پوشش ابر بیشتر از ۰.۴ باشد، شاخص تابش کلی برابر ۱- است.
۳- برای زمان روز:
الف- ابتدا رده تابشی خورشید را از جدول ۳ محاسبه کنید.
ب- اگر کل پوشش ابر کمتر از ۰/۵ باشد، شاخص تابشی کل که در جدول ۲ استفاده می‌شود، برابر با همان رده تابشی خورشید است.
ج- اگر کل پوشش ابر بیشتر از ۰/۵ باشد، طبق روال زیر عمل شود:
۱- اگر هیچ‌کدام از شرایط سه‌گانه بالا حاکم نبود، شاخص تابشی کل برابر با همان رده تابشی خورشید است.
۲- اگر با تغییرات بالا، شاخص تابشی کل کمتر از ۱ شد، آن را برابر با ۱ در نظر بگیرید

جدول ۳. رده تابش بر اساس ارتفاع خورشید در آسمان (اشنل و دی، ۲۰۰۰).

رتبه تابشی	تابش	ارتفاع خورشید Φ (درجه)
۴	شدید	$\Phi < 60$
۳	متوسط	$60 \leq \Phi < 35$
۲	کم	$35 \leq \Phi < 15$
۱	ضعیف	$15 \leq \Phi$

استفاده شده است. یعنی مقادیر در ساعت‌های بین دو زمان نمونه‌گیری برابر با مقادیر مربوط به زمان نمونه‌گیری قبلی در نظر گرفته شده است.

ساعته، محاسبه شد. نتایج که شامل عددهایی بین ۱ و ۷ هستند، در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است. که بین فاصله زمانی سه ساعته از تقریب مرتبه صفر



شکل ۲. رده‌های پایداری محاسبه شده از روش ترنر در دوره مورد بررسی.

جدول ۴. داده‌های هواشناسی مورد نیاز در الگوریتم ترنر.

روز ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
۳	ارتفاع خورشید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ابرنایکی	۰	۰	۲	۸	۶	۰	۰	۰	۴	۰
	ارتفاع ابر	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۷۰۰	۰
۶	ارتفاع خورشید	-۱۱/۲	-۱۱/۳	-۱۱/۵	-۱۱/۶	-۱۱/۸	-۱۱/۹	-۱۰/۲	-۱۰/۳	-۱۰/۵	-۱۰/۸
	ابرنایکی	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۴	۴	۲	۲
	ارتفاع ابر	۰	۰	۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۹	ارتفاع خورشید	۱۹/۵	۱۹/۳	۱۹/۲	۱۹	۱۸/۸	۱۸/۷	۱۸/۵	۱۸/۴	۱۸/۲	۱۷/۹
	ابرنایکی	۱	۴	۰	۰	۰	۷	۸	۴	۵	۰
	ارتفاع ابر	۷۰۰	۷۰۰	۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۱۲	ارتفاع خورشید	۳۲/۶	۳۲/۵	۳۲/۳	۳۲/۲	۳۲	۳۱/۹	۳۱/۸	۳۱/۷	۳۱/۶	۳۱/۵
	ابرنایکی	۱	۴	۰	۰	۱	۶	۸	۷	۷	۳
	ارتفاع ابر	۷۰۰	۷۰۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۱۵	ارتفاع خورشید	۱۷/۶	۱۷/۶	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۴	۱۷	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۷/۳	۱۷/۳
	ابرنایکی	۰	۴	۰	۰	۳	۳	۸	۷	۷	۴
	ارتفاع ابر	۷۰۰	۷۰۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۱۸	ارتفاع خورشید	-۱۱/۸	-۱۱/۸	-۱۱/۸	-۱۱/۸	-۱۱/۸	-۱۱/۸	-۱۲	-۱۱/۸	-۱۱/۷	-۱۱/۷
	ابرنایکی	۱	۴	۰	۰	۶	۵	۷	۱	۷	۵
	ارتفاع ابر	۷۰۰	۷۰۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۲۱	ارتفاع خورشید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ابرنایکی	۰	۰	۰	۰	۳	۵	۴	۰	۸	۴
	ارتفاع ابر	۰	۰	۰	۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۵۰	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۲۴	ارتفاع خورشید	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

و در هنگام شب دوباره شرایط پایدارتری حاکم می‌شود. این روند به صورت تناوبی در همه روزها تکرار می‌شود، اگرچه شدت تغییرات در روزهای گوناگون متفاوت است. همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در طول

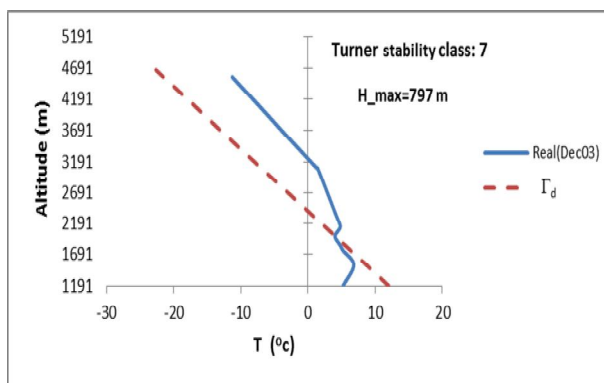
در شکل ۲ رده پایداری ۷، پایدارترین حالت و رده ۱، ناپایدارترین حالت است. همان‌طور که انتظار می‌رود و از نتایج مندرج در شکل ۲ پیدا است، در طول هر روز با نزدیک شدن به میانه روز، شرایط جوئی ناپایدارتر می‌شود

واقعی در شکل‌های ۳-الف تا ۳-و و رده‌های پایداری ترنر همخوانی قابل‌قبولی مشاهده می‌شود، گرچه در شکل ۴ نیز به این موضوع توجه شده است. در شکل ۳-الف بیشینه عمق آمیختگی محاسبه شده، برابر ۱۰۲۰ متر است. همان‌طور که روی بقیه نمودارهای شکل ۳ گنجانده شده است، هرچه به سمت روزهای میانی دوره موردنظر نزدیک می‌شویم، بیشینه عمق آمیختگی کمتر می‌شود و در روزهای انتهایی، دوباره روند افزایشی پیدا می‌کند. در شکل ۳-و این مقدار به ۱۱۲۰ متر می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود شرایط آمیختگی قائم است. در شکل‌های ۳-الف تا ۳-و عددی روی نمودار، رده‌های پایداری محاسبه شده از روش ترنر است که به‌منظور مقایسه آورده شده است. در شکل ۴ گرادیان‌های دمایی زمان ۱۲ ظهر گرینویچ برای روزهای متفاوت رسم شده است. در رسم این شکل نیز مانند شکل ۳ از داده‌های گمانه‌زنی استفاده شده، با این تفاوت که در اینجا از مقادیر عصرگاهی (ساعت ۱۵ محلی) به جای صبحگاهی استفاده شده است.

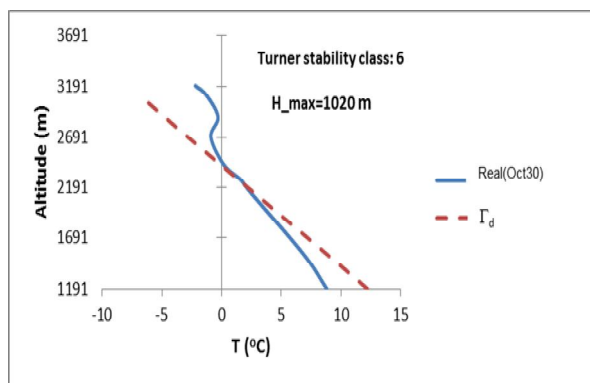
علاوه بر نمودار گرادیان دمایی عصرگاهی، نمودار مربوط به Γ_d نیز برای مقایسه، رسم شده است. شیب گرادیان دمایی زمان ۱۲ ظهر گرینویچ تقریباً برابر با Γ_d است. یعنی در این ساعت از روزهای متفاوت، شرایط پایداری خنثی است. در قسمت راهنمای نمودار، رده‌های پایداری که از الگوریتم ترنر محاسبه شده نیز برای ساعت ۱۲ آورده شده است. طبق این محاسبات، رده‌های پایداری ۳ و ۴ برای این روزها حاکم است که تقریباً با شرایط پایداری پیش‌بینی شده از روی گرادیان دمایی روزهای مربوط (شرایط خنثی) مطابقت دارد. داده‌های مربوط به میدان دید در دوره مورد بررسی در ایستگاه مهرآباد نیز جمع‌آوری و در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در روزهای میانی دوره، میدان دید کمتر می‌شود و در روزهای پایانی دوباره بهبود می‌یابد. این نمودار نیز شاهدی بر بحرانی

این دوره تحقیقاتی، رده‌های پایدار بسیار غالب هستند و تقریباً در ۸۹ درصد مواقع، شرایط خنثی و پایدار حاکم است.

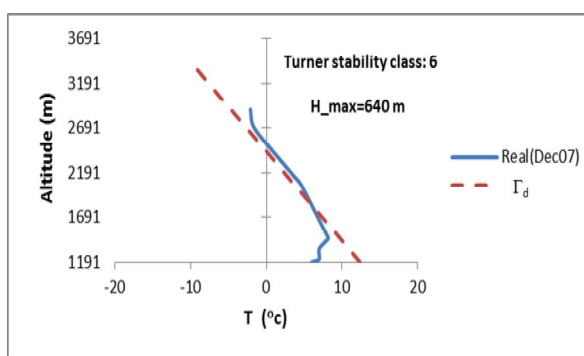
با استفاده از داده‌های گرادیان دمایی صبحگاهی در راستای قائم نیز می‌توان رده‌های پایداری را به‌صورت تصویری و با مقایسه با آهنگ کاهش دمای بی‌دررو خشک (Γ_d) محاسبه کرد. اگر آهنگ کاهش دمای واقعی صبحگاهی بیشتر از Γ_d باشد، شرایط ناپایدار، اگر آهنگ کاهش دما مساوی Γ_d باشد، شرایط خنثی و اگر کمتر از Γ_d باشد، شرایط پایدار حاکم خواهد شد. همچنین اگر شیب تغییرات دمای واقعی، مثبت باشد، شرایط وارونگی دمایی و پایداری شدید حاکم خواهد شد. برای رسم تغییرات دمای واقعی نسبت به ارتفاع، از داده‌های گمانه‌زنی (Sounding) صبحگاهی ایستگاه مهرآباد استفاده شده است. در شکل‌های ۳-الف تا ۳-و این نمودارها برای تعدادی از روزهای دوره موردنظر رسم شده است. همچنین بیشینه ارتفاع آمیختگی (H_{max}) مربوط به هر روز از راه تقاطع خطوط منحنی دمای واقعی صبحگاهی و منحنی دمای بی‌دررو خشک، محاسبه و به همراه رده پایداری به‌دست آمده از روش ترنر، در شکل‌های ۳-الف تا ۳-و آورده شده است. در محاسبه بیشینه ارتفاع آمیختگی بیان این نکته ضروری است که ارتفاع پایه در ایستگاه مهرآباد برابر ۱۱۹۱ متر است. در شکل ۳-الف که مربوط به صبحگاه روز ۳۰ اکتبر است، آهنگ کاهش دمای صبحگاهی کمتر از Γ_d است که نشان‌دهنده شرایط پایدار است. این در حالی است که طبق روش ترنر رده پایداری برای صبح این روز عدد ۶ و معرف شرایط پایدار است. در شکل ۳-ب شیب دمای واقعی نسبت به ارتفاع، مثبت است که نشان‌دهنده وارونگی دمایی است. رده پایداری ترنر متناظر نیز ۷ است که بیانگر وضع پایداری شدید است. در کل بین رده‌های پایداری قابل پیش‌بینی از روی شیب منحنی‌های دمای



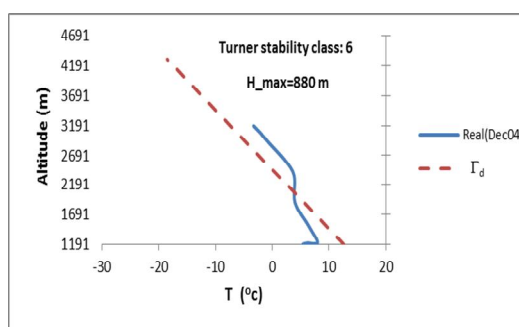
(ب)



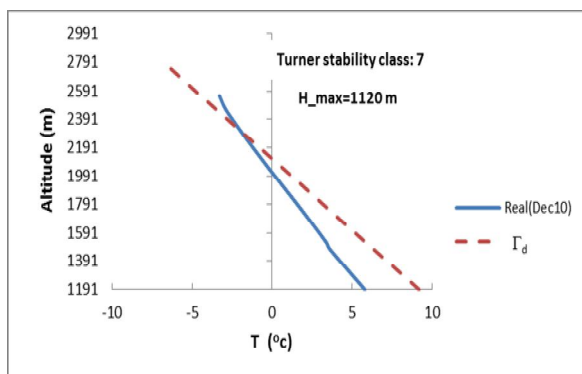
(الف)



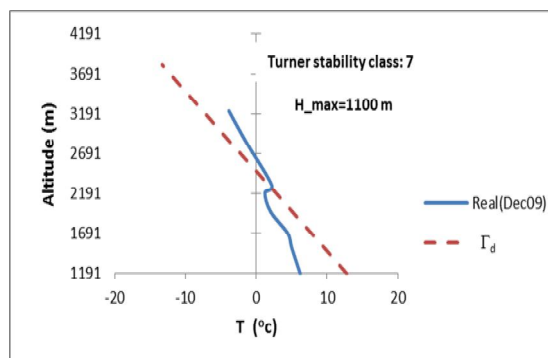
(د)



(ج)

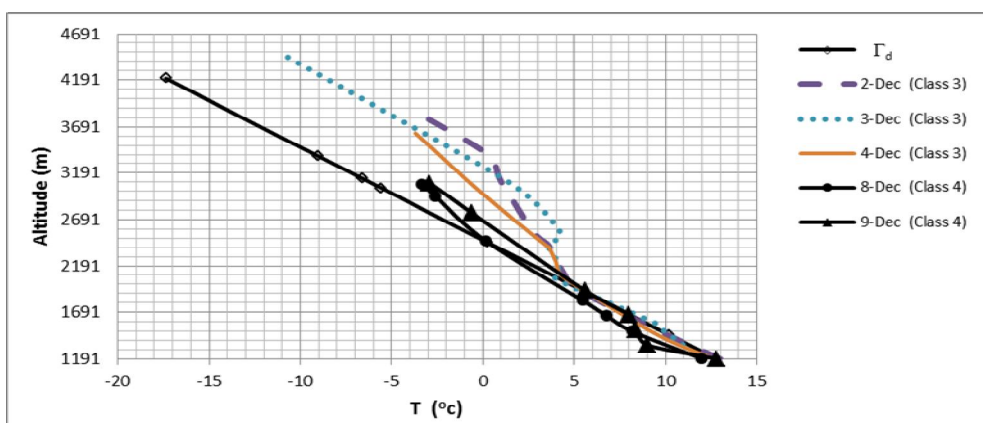


(و)

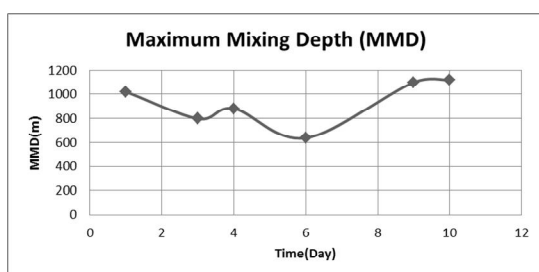


(ه)

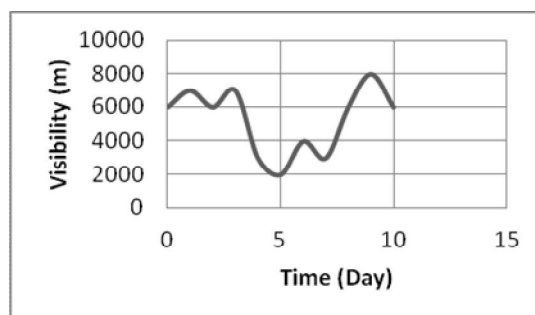
شکل ۳. (الف) تغییرات دمای صبحگاهی در سی‌ام اکتبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۶ است). (ب) تغییرات دمای صبحگاهی در سوم دسامبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۷ است). (ج) تغییرات دمای صبحگاهی در چهارم دسامبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۶ است). (د) تغییرات دمای صبحگاهی در هفتم دسامبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۶ است). (ه) تغییرات دمای صبحگاهی در نهم دسامبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۷ است). (و) تغییرات دمای صبحگاهی در دهم دسامبر (رده پایداری محاسبه شده از ترنر برابر ۷ است).



شکل ۴. نمودار تغییرات دما برحسب ارتفاع در ساعت ۱۲ گرینویچ برای چندین روز متفاوت.



شکل ۶. نمودار بیشینه عمق آمیختگی در روزهای متفاوت.



شکل ۵. نمودار میدان دید در ساعت ۱۲ ظهر در روزهای متفاوت.

است که در روزهای میانی این دوره، کمبود آمیختگی جوی و به تبع آن حبس آلودگی بیشتر بوده است.

۲-۳ تحلیل غلظت آلاینده‌ها و داده‌های هواشناسی

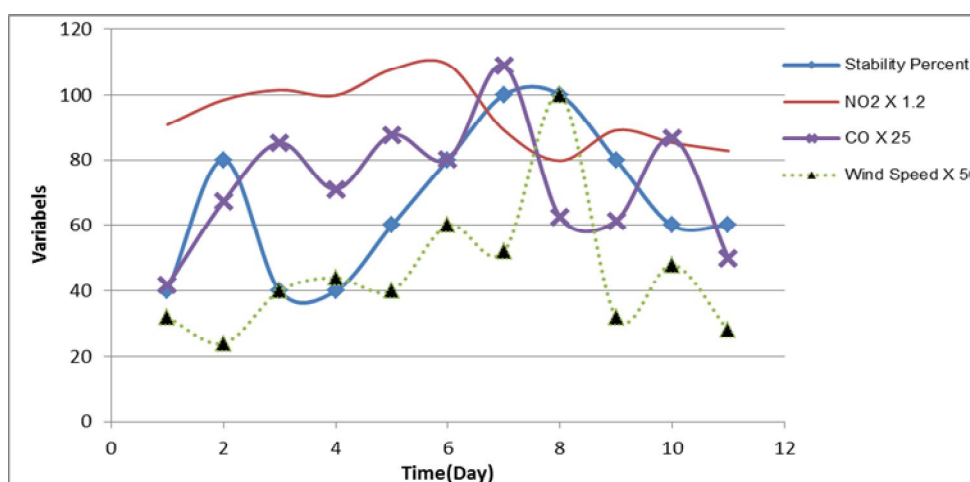
در بخش قبل به بررسی دوره زمانی پیش گفته از نظر رده‌های پایداری حاکم پرداخته و صحت بحرانی بودن وضع موجود تایید شد. با توجه به اینکه در دوره موردنظر غلظت آلاینده‌ها نیز افزایش یافته بود، این هدف دنبال شد که بتوان رابطه‌ای معنی‌دار بین غلظت آلاینده‌ها و پارامترهای موثر بر پایداری جوی پیدا کرد. برای این مهم ابتدا داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌ها در دوره پیش گفته، در ایستگاه سنجش آلاینده‌های شهرداری منطقه ۱۰ تهران که در فاصله ۲۵۰۰ متری از ایستگاه همدیدی مهرآباد قرار دارد، جمع‌آوری شد. از بین

بودن دوره موردنظر است. با توجه به اطلاعات مربوط به بیشینه عمق آمیختگی روزانه که در شکل‌های ۳-الف تا ۳-و محاسبه شده است، نمودار ۶ تغییرات این پارامتر را در طول دوره نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، از آغاز دوره موردنظر به تدریج بیشینه عمق آمیختگی کم می‌شود و در روزهای پنجم و ششم دسامبر که بیشترین محدودیت مربوط به آلودگی هوا در شهر تهران وضع شد، به کمترین مقدار می‌رسد. سپس با بهبود شرایط جوی، بیشینه عمق آمیختگی نیز روند صعودی به خود می‌گیرد. با توجه به مباحث ذکر شده، نتایج تحلیل داده‌های هواشناسی و محاسبات مربوط نشان‌دهنده پایداری و وارونگی دمایی در دوره یازده روزه بود و همچنین نمودارهای مربوط به بیشینه عمق آمیختگی و میدان دید نیز موید این مطلب

به غلظت متوسط روزانه CO و NO₂، بیشینه دمای روزانه و سرعت متوسط باد روزانه در جدول ۵ گزارش شده است. همچنین با توجه به رده‌های پایداری محاسبه شده از روش ترنر، از بین ساعت‌های نمونه‌گیری سه ساعته روزانه یعنی ساعت‌های ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، درصدی که دارای رده پایداری بیشتر از ۳ (خنثی و پایدار) بودند نیز در جدول پیش گفته گنجانده شد.

داده‌های یاد شده در دوره زمانی موردنظر، داده‌های غلظت آلاینده‌های شبانه، کنار گذاشته شد. زیرا در هنگام شب، منابع عمده آلاینده‌های موردنظر که در شهر تهران، وسایل نقلیه هستند، غیر فعال‌اند. بنابراین از بین داده‌های باقی‌مانده که مربوط به دوره‌های روزانه است، سعی شد که ارتباطی منطقی بین پارامترهای هواشناسی و غلظت آلاینده‌ها پیدا شود. برای دوره موردنظر داده‌های مربوط



شکل ۷. نمودار هم‌مقیاس شده متغیرهای رده پایداری-سرعت متوسط باد و غلظت‌های CO و NO₂.

جدول ۵. تعدادی از متغیرهای روزانه دوره زمانی مورد بررسی.

روز	غلظت متوسط CO (ppm)	غلظت متوسط NO ₂ (ppb)	درصد ساعات روزانه پایدار	سرعت متوسط باد (m/s)	بیشینه دمای روزانه °C
۳۰ نوامبر	۱/۶۷	۷۵/۸	۴۰	۱/۶	۱۲/۶
۱ دسامبر	۲/۶۹	۸۲/۱	۸۰	۱/۲	۱۱/۸
۲ دسامبر	۳/۴۱	۸۴/۶	۴۰	۲	۱۳
۳ دسامبر	۲/۸۵	۸۳/۲	۴۰	۲/۲	۱۲/۲
۴ دسامبر	۳/۵۰	۸۹/۸	۶۰	۲	۱۲/۴
۵ دسامبر	۳/۲۱	۹۱/۱	۸۰	۳	۱۳/۱
۶ دسامبر	۴/۳۵	۷۴/۳	۱۰۰	۲/۶	۹/۸
۷ دسامبر	۲/۵	۶۶/۵	۱۰۰	۵	۱۲/۲
۸ دسامبر	۲/۴۵	۷۴/۳	۸۰	۱/۶	۱۲
۹ دسامبر	۲/۴۷	۷۱/۱	۶۰	۲/۴	۱۲
۱۰ دسامبر	۲/۰۰	۶۹/۰	۶۰	۱/۴	۱۲/۲

همه داده‌های سه ساعته در کل دوره یازده روزه، صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۶ گزارش شده است. لازم به ذکر است که برای اجرای وایازش، ابتدا همه پارامترهای درگیر، به صورت کسری از فراوانی تجمعی در کل دوره ($a_i / \sum_i a_i$)، بهنجار شدند. از بین پارامترهای هواشناسی که در نظر گرفته شد، همبستگی پارامترهای دما، سرعت باد، جهت باد و عدد ریچاردسون، با غلظت آلاینده‌های پیش‌گفته بیشتر بود. بنابراین پارامترهای هواشناسی پیش‌گفته درحکم متغیرهای مستقل موثر روی غلظت آلاینده‌ها در نظر گرفته شدند. به منظور در نظر گرفتن جهت باد، ابتدا متغیر سرعت، به دو مولفه، یکی در راستای غرب به شرق (U) و دیگری در راستای جنوب به شمال (V)، تجزیه شد. نتایج به دست آمده، در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶. ضرایب وایازش چندخطی برای دو آلاینده CO و NO₂.

متغیرهای مستقل	NO ₂ غلظت	CO غلظت
ثابت	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴
T	۰/۳۵۳	۰/۷۰۳
U	۰/۰۱۶	۰/۰۷۸
V	۰/۰۱۵	۰/۰۲۸
Ri _b	-۰/۰۱۹	-۰/۰۱۹
سطح معنی‌داری ضرایب	۱ %	۵ %

تعداد مشاهدات برای هر آلاینده، ۸۸ است. برای آلاینده CO ضریب همبستگی مطلق (R) برابر با ۰/۴۱ به دست آمد و طبق نتایج تحلیل واریانس و آزمون-F، پارامتر F که معرف نسبت میانگین مربعات مدل به میانگین مربعات خطای مدل است، برابر با ۳/۸۹۷ است و در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. یعنی با توجه به جدول آزمون-F، پارامتر F محاسبه شده از مقدار F جدول آزمون به ازای درجات آزادی مربوط و $\alpha = 0.05$ ، بزرگ‌تر است. بنابراین ضرایب وایازش به دست آمده در حد ۹۵ درصد

به منظور مقایسه، چند متغیر گزارش شده در جدول ۵، ابتدا این مقادیر به صورتی بهنجارسازی شد که همه در مقیاس ۱۰۰ با هم قابل مقایسه باشند. سپس این مقادیر در شکل ۷ رسم شد. همان طوری که در شکل ۷ مشخص است در طول دوره درصد ساعت‌های پایدار روزانه افزایش می‌یابد تا اینکه در روز هشتم دوباره شرایط بهبود پیدا می‌کند. منحنی رده پایداری در شکل ۷ را می‌توان با منحنی تغییرات بیشینه عمق آمیختگی و میدان دید مقایسه کرد. در طول دوره با افزایش میزان پایداری، میدان دید و بیشینه عمق آمیختگی، طبق انتظار کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۷، با افزایش میزان پایداری در طول دوره، غلظت‌های CO و NO₂ نیز افزایش می‌یابد. یعنی با افزایش میزان پایداری رابطه مستقیم دارد که این گونه نیز انتظار می‌رفت. در انتهای دوره، با بهبود شرایط پایداری، غلظت این آلاینده‌ها نیز روند کاهشی به خود می‌گیرد. سرعت متوسط باد نیز در طول دوره ابتدا روند افزایشی دارد و سپس در روزهای هشتم به بالا روند کاهشی پیدا می‌کند. از آنجا که در فصل زمستان میزان تابش ضعیف و چینش قائم پایدار در هوا حاکم است، تلاطم‌های مکانیکی با این چینه‌بندی‌ها تضعیف می‌شود و افزایش سرعت باد تاثیر چندانی بر آمیختگی قائم ندارد. این مورد در نمونه مورد بررسی نیز به چشم می‌خورد. با افزایش سرعت باد، که اغلب از جنوب غربی است، آلاینده‌ها به سمت ایستگاه سنجش آلودگی شهرداری منطقه ۱۰ که در پایین دست مسیر باد عبوری از ترافیک سنگین و پایانه‌های غرب قرار دارد، منتقل می‌شوند و همان گونه که در شکل ۷ مشخص است، غلظت آلاینده‌ها تقریباً روند مشابهی با روند تغییرات سرعت باد روزانه دارد.

در مرحله بعد به منظور بررسی دقیق اثر پارامترهای هواشناسی روی غلظت آلاینده‌های CO و NO₂، عملیات وایازش چندمتغیره برای هر دو آلاینده براساس

قابل اعتماد و آزمون در سطح ۵ درصد معنی دار است. برای NO_2 نیز R برابر با ۰/۵۲ به دست آمد و F نیز ۴/۹۵ و در سطح ۱ درصد معنی دار است. برای دو نمونه واپازش، نتایج نشان می دهد از آنجا که عدد ریچاردسون (R_i) در اغلب مواقع در داده های مورد استفاده، مثبت بوده است، با افزایش R_i که نشان دهنده کاهش تلاطم مکانیکی و یا کاهش آمیختگی گرمایی است، یعنی زمان اولیه روز و یا آغاز شب، غلظت CO و NO_2 کم می شود. همچنین مشاهده می شود که ضرایب T و U و V برای آلاینده CO تقریباً دو برابر ضرایب متناظر برای آلاینده NO_2 است. علت این امر آن است که غلظت NO_2 با واکنش های شیمیایی و فوتوشیمیایی و عمق آمیختگی تغییر می کند. در صورتی که آلاینده CO بیشتر تابعی از میزان انتقال و عمق آمیختگی است و در واقع تاثیر پذیری آن از پارامترهای U و V بیشتر از آلاینده NO_2 است.

۴ نتیجه گیری

در این مقاله یک بازه زمانی یازده روزه (سی ام اکتبر - دهم دسامبر ۲۰۱۲) برای بررسی آلودگی هوای شهر تهران در نظر گرفته شده است. علت این انتخاب آن بود که در این دوره زمانی شرایط آلودگی هوای شهر در روزهای میانی دوره پیش گفته به حد هشدار رسیده بود. با استفاده از داده های هواشناسی اعم از گرادان دما در راستای قائم که از داده های گمانه زنی ایستگاه مهرآباد استخراج شد، سرعت و جهت باد، زاویه تابش خورشید و ابرناکی شرایط جوئی دوره پیش گفته از نظر رده های پایداری حاکم، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط نشان دهنده وارونگی دمایی شدید در دوره یازده روزه بود. با توجه به نتایج روش ترنر برای دوره مورد نظر، می توان گفت که در طول هر روز با نزدیک شدن به میانه روز، شرایط جوئی ناپایدارتر و در هنگام شب دوباره شرایط پایدارتری حاکم

می شود. چنین روندی با شدت و ضعف متفاوت، در همه روزها تکرار می شود. همچنین نتایج روش ترنر نشان می دهد که در طول این دوره، رده های پایدار بسیار غالب هستند و تقریباً در ۸۹ درصد مواقع، شرایط خنثی و پایدار حاکم است. نمودارهای مربوط به بیشینه عمق آمیختگی و میدان دید نیز مویید این مطلب است که در روزهای میانی این دوره، کمبود آمیختگی جوئی و به تبع آن حبس آلودگی بیشتر بوده است. پس از تایید بحرانی بودن شرایط حاکم از روی مقایسه مقایر رده های پایداری، بیشینه عمق آمیختگی و میدان دید، با جمع آوری داده های غلظت آلاینده های کربن مونوکسید و ازت دی اکسید در ایستگاه سنجش نصب شده در شهرداری منطقه ۱۰ که در فاصله ۲۵۰۰ متری از ایستگاه مهرآباد قرار دارد، ارتباط بین پارامترهای جوئی و غلظت این آلاینده ها بررسی شد. این ارتباط ابتدا به صورت طرحوار و با مقایسه تغییرات غلظت آلاینده ها با درجه پایداری و سرعت متوسط باد روزانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نشان می دهد که با افزایش پایداری در طول دوره، غلظت آلاینده های CO و NO_2 افزایش می یابد. همچنین غلظت آلاینده ها با افزایش سرعت باد که اغلب از جنوب غربی است، نیز افزایش می یابد. این امر به این علت است که در فصل زمستان به سبب تضعیف تلاطم مکانیکی با چینه بندی قائم، سرعت باد نقش زیادی در ناپایداری ایفا نمی کند و فقط باعث انتقال آلاینده ها از پایانه غرب که در بالادستی محل اندازه گیری قرار دارد، می شود. سپس با به کارگیری روش واپازش چندمتغیره بین پارامترهای هواشناسی مانند سرعت و جهت باد افقی، دما و عدد ریچاردسون و غلظت آلاینده های CO و NO_2 ارتباط معنی داری از نظر آماری برقرار شد. از آنجا که عدد ریچاردسون در اکثر موارد مثبت بود، طبق نتایج واپازش، با افزایش R_i (افزایش پایداری) غلظت آلاینده ها نیز افزایش می یابد. با توجه به نتایج مدل، تابعیت غلظت

- Celik, M. B. and Kadi, I., 2007, The relation between meteorological factors and pollutants concentrations in Karabuk city: Gazi University Journal of Science, **20**(4), 87-95.
- Cuhadaroglu, B. and Demirci, E., 1997, Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city: Energy and Buildings, **25**, 179-184.
- Mayer, H., 1999, Air pollution in cities, Atmospheric Environment, **33**, 4029-4037.
- Sanchez-Ccoyllo, O. R., and Andrade, M. de F., 2002, The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in Sao Paulo, Brazil: Environmental Pollution, **116**, 257-263.
- Schnelle, K. B., and Dey, P. R., 2000, Atmospheric dispersion modeling compliance guide: McGraw-Hill.
- Web page of the Astronomical Applications Department of the U.S. Naval Observatory, 2012, <http://aa.usno.navy.mil/data/docs/AltAz.php>, accessed 10 September 2013.

آلاینده CO از دما و سرعت و جهت باد، تقریباً دو برابر تابعیت غلظت NO₂ پیش‌بینی شد. از آنجا که غلظت NO₂ بر خلاف CO تابع واکنش‌های شیمیایی و فوتوشیمیایی است، تابعیت قوی‌تر CO از دما و باد مطابق انتظار است.

منابع

- شرعی‌پور، ز، علی‌اکبری بیدختی، ع.، ۱۳۸۹، ارتباط شرایط هواشناسی جو بالا با حالات حاد آلودگی هوای تهران: چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت، تهران، ۱۸۷-۱۹۱.
- Ashrafi, Kh. and Hoshyaripour, A., 2010, A model to determine atmospheric stability and its correlation with CO concentration, International Journal of Civil and Environmental Engineering, **2**, 83-88.