






## A statistical study of atmospheric boundary layer evolution using backscatter lidar data for the city of Zanjan

Askari, M.<sup>1</sup>  | Bayat, S.<sup>1</sup>  | Masoumi, A.<sup>1</sup>   | Moradhaseli, R.<sup>2</sup> 

1. Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Department of Physics, Faculty of Science, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

Corresponding Author E-mail: [a\\_masoumi@znu.ac.ir](mailto:a_masoumi@znu.ac.ir)

(Received: 16 April 2022, Revised: 17 Jan 2023, Accepted: 2 May 2023, Published online: 30 Aug 2023)

### Summary

The boundary layer is the lowest part of the Earth's atmosphere and is directly affected by the Earth's surface. Humans live within the boundary layer, and the height of this layer affects air quality and their physical and mental health. It also affects commercial activities such as air and sea transport. Therefore, measuring the height of the boundary layer and knowing how it evolves is very important.

The height of the atmospheric boundary layer is measured in two general ways: in-situ measurements and remote sensing methods. The main disadvantages of in-situ measurements are their cost and the impossibility of continuous measurement. On the other hand, remote sensing methods use the concept of the interaction of sound or electromagnetic waves with the components of the atmosphere. It uses instruments such as Sodar, Radar, and Lidar to continuously study the boundary layer's height at a lower cost.

In this study, the data obtained from the elastic backscatter Lidar measurements have been used to extract the boundary layer's height for the city of Zanjan. The Lidar is located at the Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), and its 532 nm wavelength channel is used in this study. Also, the method used in this study is the Wavelet Covariance Transform (WCT) method. The attenuated backscatter coefficient or the range-corrected signal is expected to decrease for ground-based Lidars as the height increases. As it exits the boundary layer, the concentration of atmospheric particles decreases sharply, and therefore the backscattered signal is expected to drop significantly. The WCT method uses this sharp reduction of the signal to detect the height of the boundary layer. The wavelet covariance transform function, in simple terms, calculates the difference between the Lidar range-corrected signal for a given height interval and the Lidar range-corrected signal for a higher altitude interval. As a result, the peak height equivalent of this function corresponds to the height of the boundary layer.

In this study, only the period 2011-2012 was studied because of the significant number of measurements. In total, we had 105 days of data during the mentioned period, the first of which is related to April 13, 2011, and the last of which is related to October 15, 2012. All measurements are taken for days with no active synoptic conditions. In winter, we have the lowest daily average value of the boundary layer height ( $0.975 \pm 0.556$  km), and in summer, we have its maximum value ( $2.597 \pm 0.714$  km). In the two seasons of spring and autumn, the extracted values of the height of the boundary layer are very close to each other and are about 1.9 km above ground level (AGL). Therefore, there is a direct correlation between air temperature and the height of the boundary layer. Finally, the daily-averaged value of the boundary layer height for the whole 105 days of data was 2,067 km AGL. Also, the hourly-averaged height of the atmospheric boundary layer has been extracted and plotted for all four seasons. For these data, a good relationship is observed between air temperature and the height of the boundary layer, especially in winter, which is expected to improve accuracy if further measurements are made.

**Keywords:** Atmospheric boundary layer, Remote sensing, Lidar, Wavelet Covariance Transform method, Zanjan.

Cite this article: Askari, M., Bayat, S., Masoumi, A., & Moradhaseli, R. (2023). A statistical study of atmospheric boundary layer evolution using backscatter lidar data for the city of Zanjan. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 423-430. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.341541.1007419>

E-mail: (1) [miladaskari7394@gmail.com](mailto:miladaskari7394@gmail.com) | [bayatsaeedeh73@gmail.com](mailto:bayatsaeedeh73@gmail.com) (2) [r.moradhaseli.iauz@gmail.com](mailto:r.moradhaseli.iauz@gmail.com)



## بررسی آماری تحول لایه مرزی جوی شهر زنجان با استفاده از داده‌های لیدار پس‌پراکنش کشسان

میلاذ عسکری<sup>۱</sup> | سعیده بیات<sup>۱</sup> | امیر معصومی<sup>۱</sup> | روح‌اله مراد حاصلی<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [a\\_masoumi@znu.ac.ir](mailto:a_masoumi@znu.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۲/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۶/۸)

### چکیده

ارتفاع لایه مرزی جوی بر اساس داده‌های حاصل از لیدار پس‌پراکنش کشسان مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان برای شهر زنجان استخراج شد. بر اساس کاهش محسوس نمایه ارتفاعی ضریب پس‌پراکنش خاموش شده لیدار در گذر از لایه مرزی جوی به جو آزاد و با روش تبدیل کوواریانس موجک، ارتفاع لایه مرزی برای ۱۰۵ روز داده‌برداری لیدار از جو زنجان و در بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ (۲۰۱۱-۲۰۱۲) محاسبه شد. تحول زمانی تغییرات ارتفاع لایه مرزی در طول شبانه‌روز به تفکیک فصلی و نیز برای کل داده‌ها انجام گرفت. با طلوع (غروب) آفتاب و افزایش (کاهش) دمای هوا، افزایش (کاهش) ضخامت لایه مرزی در توفیق با مطالعات گذشته مشاهده شد. همچنین مقدار میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی در طول سال مطالعه شد. بیشترین مقدار این کمیت در فصل تابستان و با مقدار میانگین ۲/۵۹۷ کیلومتر بالاتر از سطح زمین و با انحراف معیار ۰/۷۱۴ کیلومتر ثبت شد. کمترین مقدار آن نیز در فصل زمستان (با مقدار میانگین ۰/۹۷۵ کیلومتر بالاتر از سطح زمین و با انحراف معیار ۰/۵۵۶ کیلومتر) مشاهده شد. مقدار میانگین کل ارتفاع لایه مرزی نیز ۲/۰۶۷ کیلومتر به دست آمد. همچنین ارتباط معنادار و مستقیمی بین دمای سطح زمین و ارتفاع لایه مرزی به ویژه در فصل زمستان مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: لایه مرزی جوی، سنجش از دور، لیدار، روش تبدیل کوواریانس موجک، زنجان.

### ۱. مقدمه

غلظت آلاینده‌های جوی نزدیک سطح زمین دارد (پگاه‌فر و همکاران، ۲۰۱۳ و خوش‌سیما و همکاران، ۲۰۱۵). ما انسان‌ها عملاً در درون لایه مرزی زندگی می‌کنیم و ارتفاع این لایه بر کیفیت هوا و سلامت جسمانی و روانی ما اثرگذار است. همچنین فعالیت‌های تجاری نظیر حمل و نقل هوایی و دریایی نیز از آن متأثر می‌شود (اکه، ۲۰۰۲). بنابراین اندازه‌گیری ارتفاع لایه مرزی و آشنایی با نحوه تحول آن از اهمیت بالایی برخوردار است (اکه، ۲۰۰۲).

اندازه‌گیری ارتفاع لایه مرزی جوی به دو روش کلی اندازه‌گیری در محل و سنجش از دور صورت می‌گیرد (امیس، ۲۰۰۹). روش اندازه‌گیری در محل که معروف‌ترین آن استفاده از داده‌های رادیوسوند است

جو زمین بر اساس نحوه تغییرات ارتفاعی دما به چندین لایه تقسیم‌بندی می‌شود. لایه تروپوسفر پایین‌ترین این لایه‌ها است و از سطح زمین تا ارتفاع بیشینه حدود ۱۸ کیلومتری را شامل می‌شود (اندروز، ۲۰۱۰). لایه تروپوسفر خود به دو زیرلایه تقسیم می‌شود: لایه مرزی و جو آزاد (گرت، ۱۹۹۲). لایه مرزی پایین‌ترین بخش جو زمین است و مستقیماً از سطح زمین تأثیر می‌پذیرد. این لایه همچون واسطه‌ای جهت تبادل جرم و انرژی بین سطح زمین و جو آزاد عمل می‌کند. ضخامت یا ارتفاع لایه مرزی به عواملی چون مکان و زمان وابسته است و می‌تواند از چند صد متر تا چند کیلومتر متغیر باشد (گرت، ۱۹۹۲). بخش مهمی از گازها و نیز هواویزها در لایه مرزی محبوس‌اند و بنابراین ارتفاع این لایه تأثیر اساسی بر

استناد: عسکری، میلاذ؛ بیات، سعیده؛ معصومی، امیر و مراد حاصلی، روح‌اله (۱۴۰۲). بررسی آماری تحول لایه مرزی جوی شهر زنجان با استفاده از داده‌های لیدار پس‌پراکنش

کشسان. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۴۲۳-۴۳۰. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.341541.1007419>

رایانامه: (۱) [miladaskari7394@gmail.com](mailto:miladaskari7394@gmail.com) | [bayatsaeedeh73@gmail.com](mailto:bayatsaeedeh73@gmail.com) (۲) [r.moradhaseli.iauz@gmail.com](mailto:r.moradhaseli.iauz@gmail.com)

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.341541.1007419>

شده (range-corrected signal) اولین داده استخراجی از اندازه‌گیری‌های لیدار می‌باشد (ویتکمپ، ۲۰۰۵). این داده معمولاً با نماد  $P(z)z^2$  مشخص می‌شود و ترکیب هر دو سهم پس‌پراکنش از ذرات واقع در فاصله  $z$  از محل لیدار و نیز خاموشی نور لیزر در رفت و برگشت از نقطه موردنظر را دارد. برای لیدارهای زمین‌پایه انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع و فاصله از لیدار، این پارامتر با شیب معینی کاهش یابد. همچنین اگر نور لیزر به یکباره وارد محیط خیلی متراکم (ابر و یا لایه هوایی) شود به طور آنی شاهد افزایش این پارامتر خواهیم بود. از سوی دیگر با خروج از لایه مرزی و کاهش معنادار غلظت ذرات، افت قابل توجه سیگنال ثبت شده لیدار را خواهیم داشت (بارس و همکاران، ۲۰۰۸). روش تبدیل کوواریانس موجک یا WCT از این تغییرات سیگنال لیدار برای تشخیص ارتفاع لایه مرزی استفاده می‌کند. اساس کار بر رابطه (۱) استوار است:

$$W_f(a,b) = \frac{1}{n\Delta z} \left( \sum_{b-\frac{a}{2}}^b P(z)z^2\Delta z - \sum_b^{b+\frac{a}{2}} P(z)z^2\Delta z \right),$$

$$a = n\Delta z, n = 2, 4, 6, \dots \quad (1)$$

در رابطه بالا، تابع  $W_f(a,b)$  معرف تابع تبدیل کوواریانس موجک است. این تابع به زبان ساده تفاضل سیگنال لیداری یک بازه ارتفاعی از سیگنال لیداری بازه ارتفاعی بالاتر از آن را محاسبه می‌کند. در نتیجه ارتفاع معادل قله این تابع به معنی استخراج ارتفاع لایه مرزی می‌باشد (بارس و همکاران، ۲۰۰۸). به عنوان نمونه در شکل ۱، نمونه‌ای از نمایه ارتفاعی سیگنال (ضریب پس‌پراکنش خاموش شده) بهنجار شده و نیز تابع WCT معادل آن برای روز ۲۷ می ۲۰۱۲ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود محل کاهش شدید سیگنال بر قله تابع WCT منطبق است و ارتفاع معادل آن به معنی انتهای لایه مرزی است. به این ترتیب برای هر داده‌برداری، امکان تشخیص ارتفاع بالای لایه مرزی و به عبارت بهتر ضخامت لایه مرزی امکان پذیر می‌باشد.

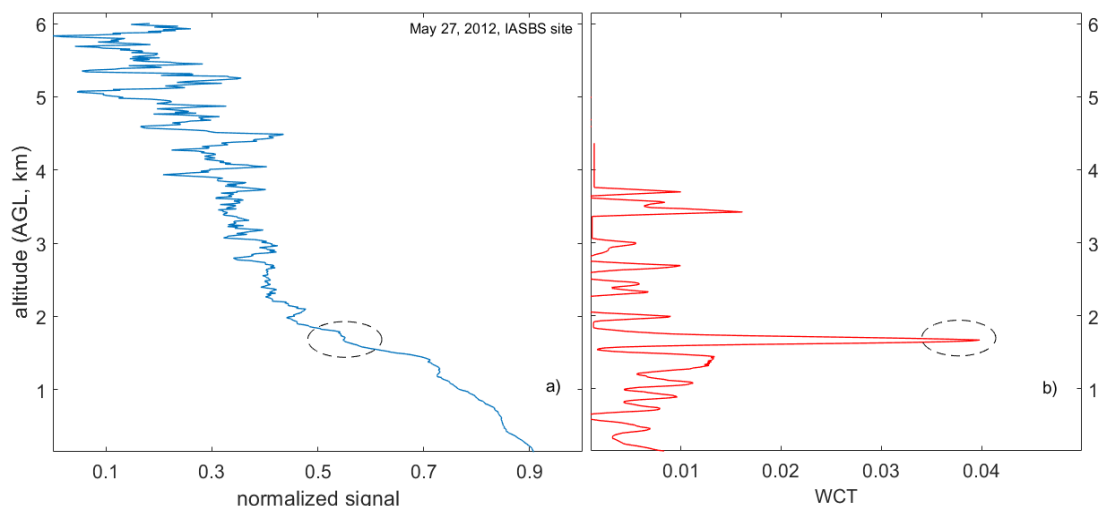
روش شناخته شده تر و با سابقه تری است و بر اندازه‌گیری نمایه ارتفاعی چندین پارامتر هواشناسی نظیر دما، فشار، رطوبت، سرعت و جهت باد مبتنی است. ایراد اساسی وارد بر این روش، هزینه بر بودن و عدم امکان اندازه‌گیری پیوسته آن است (وانگ و وانگ، ۲۰۱۶). روش سنجش از دور از مفهوم برهمکنش امواج صوتی یا الکترومغناطیسی با اجزای تشکیل دهنده جو استفاده می‌کند و با ابزارهایی نظیر سودار، رادار و لیدار به مطالعه پیوسته و کم‌هزینه تر ارتفاع لایه مرزی می‌پردازد (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸). در نتیجه امکان اندازه‌گیری مداوم ضخامت لایه مرزی و چگونگی تحول زمانی آن و پیش‌بینی تأثیرات احتمالی آن بر وضعیت آب‌وهوایی، کیفیت هوا و فعالیت‌های انسانی را فراهم می‌کند (اندرسون و همکاران، ۲۰۰۵؛ دنگ و همکاران، ۲۰۱۹).

در این مطالعه از داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های لیدار پس‌پراکنش کشسان مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS site) جهت اندازه‌گیری ارتفاع لایه مرزی و مطالعه نحوه تغییرات زمانی آن استفاده شده است. روش مورد استفاده، روش تبدیل کوواریانس موجک یا Wavelet Covariance Transform است که به اختصار WCT نامیده می‌شود (بارس و همکاران، ۲۰۰۸).

در ادامه مقاله و برای دستیابی به اهداف ذکر شده، ابتدا در بخش روش پژوهش، خلاصه‌ای از روش مورد استفاده معرفی خواهد شد. سپس در بخش اندازه‌گیری و محاسبه، داده‌های به کار گرفته شده به بحث گذارده خواهد شد. در بخش بحث به بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها پرداخته خواهد شد و سرانجام در بخش نتیجه‌گیری، جمع‌بندی مطالب ذکر خواهد شد.

## ۲. روش پژوهش

ضریب پس‌پراکنش خاموش شده (attenuated backscatter coefficient) یا به اصطلاح سیگنال تصحیح

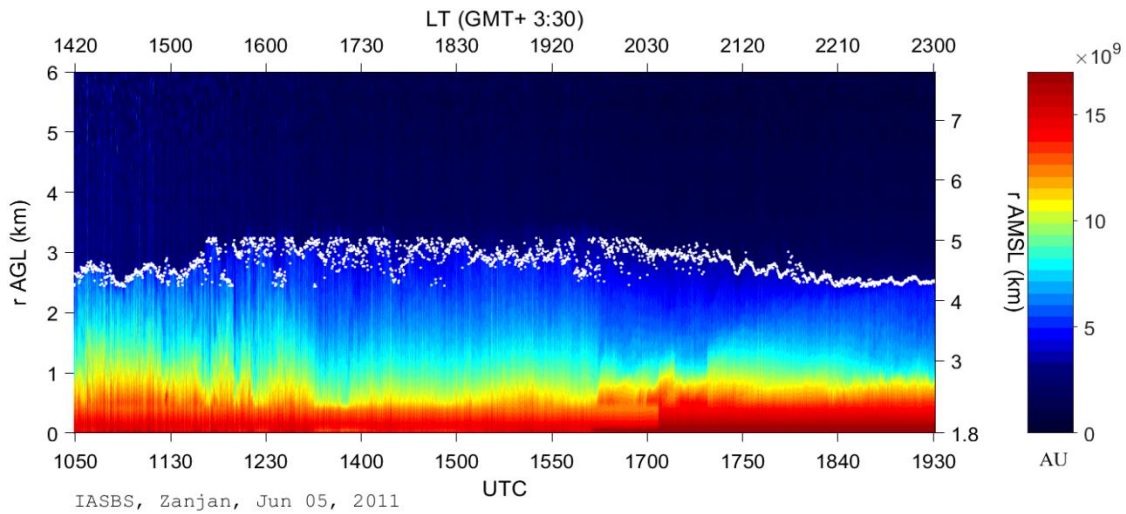


شکل ۱. نمونه‌ای از سیگنال (ضریب پس‌پراکنش خاموش‌شده) به‌نجارشده لیدار و تابع تبدیل کوواریانس موجک یا WCT برای روز ۲۷ می ۲۰۱۲ برای شهر زنجان. محل تقریبی ارتفاع لایه مرزی در شکل مشخص شده است.

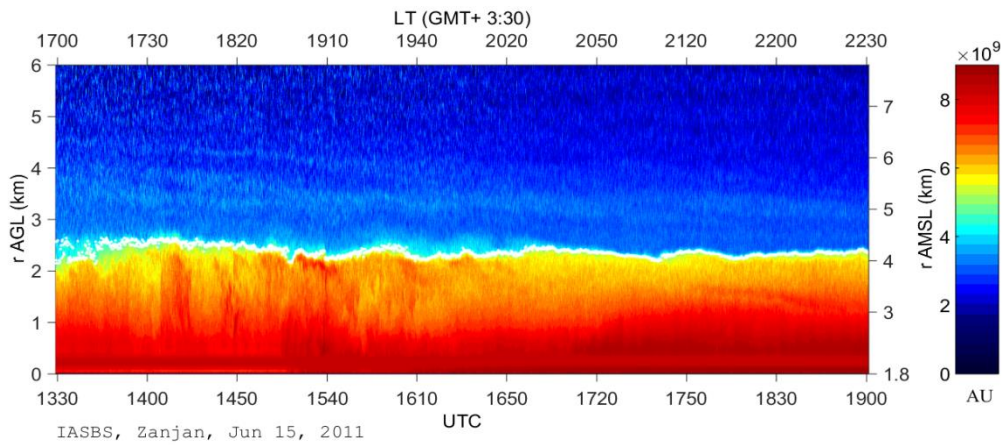
### ۳. اندازه‌گیری و محاسبه

رنگ نیز محل استخراج ارتفاع بالای لایه مرزی از روش مورد استفاده در این مقاله است. محور افقی بالا (پایین) زمان داده‌برداری بر اساس زمان محلی (زمان جهانی) است و محور قائم سمت چپ (راست) نیز بیانگر ارتفاع از سطح زمین (از سطح دریاهای آزاد) است. نوار رنگی نیز مقدار ضریب پس‌پراکنش خاموش‌شده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲ و ۳ مربوط به روزهای ۵ و ۱۵ ژوئن ۲۰۱۱ (۱۵ و ۲۵ خرداد ۱۳۹۰) است. در این دو شکل با دو روز نسبتاً صاف و بدون ابر سروکار داریم و میانگین ارتفاع لایه مرزی محاسبه شده برای این روزها، به ترتیب مقادیر  $۱۱/۰ \pm ۳۸/۲$  و  $۰/۲۴ \pm ۲/۸۴$  کیلومتر بالای سطح زمین است (در این مقاله، مقادیر پس از  $\pm$  همیشه به معنی انحراف معیار از داده‌های میانگین خواهد بود). شکل ۴ نیز برای روزهای ۲۴-۲۵ اکتبر ۲۰۱۱ (۲-۳ آبان ۱۳۹۰) و برای ساعت حدودی ۲۳ شب تا ۵ صبح می‌باشد. لکه‌های قرمز تیره بالای شکل به معنی حضور ابر در آسمان است و ارتفاع لایه مرزی برای این روز برابر  $۰/۱۳ \pm ۱/۸۸$  کیلومتر به دست آمد. برای هر لحظه داده‌برداری علاوه بر نمایش در شکل، مقدار ارتفاع لایه مرزی در فایل جداگانه‌ای ثبت می‌گردند تا در نهایت همه آنها مورد بررسی آماری قرار گیرند.

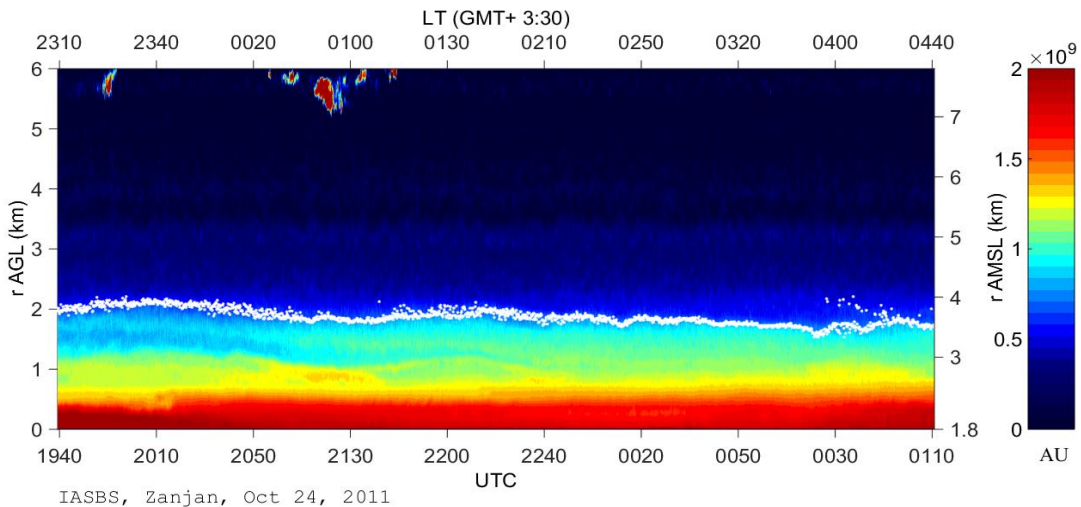
داده‌های به کار گرفته‌شده در این کار، از اندازه‌گیری‌های لیدار پس‌پراکنش کشسان مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS site) حاصل شده است. این لیدار در دو طول موج ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر داده‌برداری می‌کند. در این مطالعه از نتایج مربوط به طول موج ۵۳۲ نانومتر (نور مرئی سبز رنگ) استفاده شده است. به دلیل پراکندگی اندازه‌گیری‌ها، تنها بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار گرفت و دلیل آن وجود تعداد قابل توجه اندازه‌گیری در این بازه زمانی بود. در مجموع در بازه زمانی مورد اشاره، ۱۰۵ روز داده‌برداری داشتیم که اولین آنها مربوط به روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۱ (۲۴ فروردین ۱۳۹۰) و آخرین آنها مربوط به روز ۱۵ اکتبر ۲۰۱۲ (۲۴ مهر ۱۳۹۱) می‌باشد. به استثناء ماه ژانویه در تمامی ماه‌ها داده‌برداری انجام گرفته بود و بنابراین امکان مقایسه در طول سال فراهم بود. تمام اندازه‌گیری‌ها در شرایط همدیدی آرام انجام شده است. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به‌عنوان نمونه‌ای از نتایج اعمال روش WCT برای استخراج ارتفاع لایه مرزی است. در این شکل‌ها، سیگنال (ضریب پس‌پراکنش خاموش‌شده) لیدار با رنگ‌های در محدوده آبی تا قرمز مشخص شده است. دایره‌های سفید



شکل ۲. ضریب پس‌پراکنش خاموش شده لیدار به همراه ارتفاع لایه مرزی برای جو زنجان و برای روز ۵ ژوئن ۲۰۱۱ (۱۵ خرداد ۱۳۹۰) و برای زمان محلی حدود ۱۴-۲۳. مقدار بیشینه (کمینه) ضریب پس‌پراکنش خاموش شده لیدار با رنگ‌های قرمز (آبی) تیره مشخص شده است و دایره‌های سفید بیانگر ارتفاع بالای لایه مرزی است.



شکل ۳. همچون شکل ۲ اما برای روز ۱۵ ژوئن ۲۰۱۱ (۲۵ خرداد ۱۳۹۰).



شکل ۴. همچون شکل ۲ اما برای روزهای ۲۴-۲۵ اکتبر ۲۰۱۱ (۲-۳ آبان ۱۳۹۰). لکه‌های قرمز تیره بالای شکل به حضور ابر در آسمان مربوط است.

## ۴. نتایج و بحث

در جدول ۱، تعداد روزهای داده‌برداری و مقدار محاسبه شده ارتفاع لایه مرزی به تفکیک فصول و نیز برای کل اندازه‌گیری‌ها آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بین دمای هوا و ارتفاع لایه مرزی ارتباط مستقیم و معناداری دیده می‌شود. در دو فصل بهار و پاییز مقادیر استخراجی ارتفاع لایه مرزی خیلی به هم نزدیک‌اند (حدود ۱۹۰۰ متر)؛ در حالی که در فصل زمستان (تابستان) با کاهش (افزایش) ملموس دمای هوا، ارتفاع محاسبه شده برای انتهای لایه مرزی به زیر ۱ کیلومتر (بالای ۲/۵ کیلومتر) می‌رسد. مقدار میانگین ارتفاع لایه مرزی برای فصل بهار (حدود ۱/۹ کیلومتر برای ۱۶ روز داده‌برداری) بیشتر از نتایج مطالعات قبلی (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸) است که در آن مقدار ۱/۴ کیلومتر برای بازه ۱۰ روزه گزارش شده بود. همچنین مقدار میانگین ارتفاع لایه مرزی برای فصل تابستان (حدود ۲/۶ کیلومتر برای ۵۴ روز داده‌برداری) حدود ۳۰۰ متر بیش از نتایج مطالعات قبلی (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸) برای بازه ۱۰ روزه

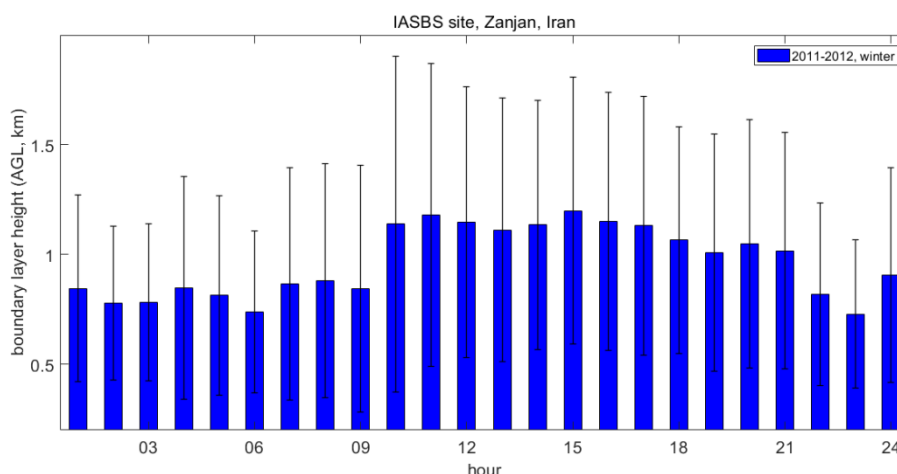
است.

در این مطالعه، نحوه تغییرات روزانه لایه مرزی نیز استخراج شده است. به‌عنوان نمونه روند تغییرات روزانه ارتفاع لایه مرزی برای فصل زمستان در شکل ۵ آورده شده است. در توافق با مطالعات قبلی (بیدختی و همکاران، ۲۰۰۸ و خوش‌سیما و همکاران، ۲۰۱۵) و همان‌گونه که انتظار می‌رود ارتفاع لایه مرزی در طول روز و با افزایش دما زیاد شده و پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود در حوالی ظهر دوباره رو به کاهش می‌گذارد. همچنین جهت مقایسه تغییرات روزانه داده‌ها در طول سال، شکل ۶ قابل مشاهده است که روند تغییرات روزانه ارتفاع لایه مرزی را برای تمامی فصول گرد آورده است.

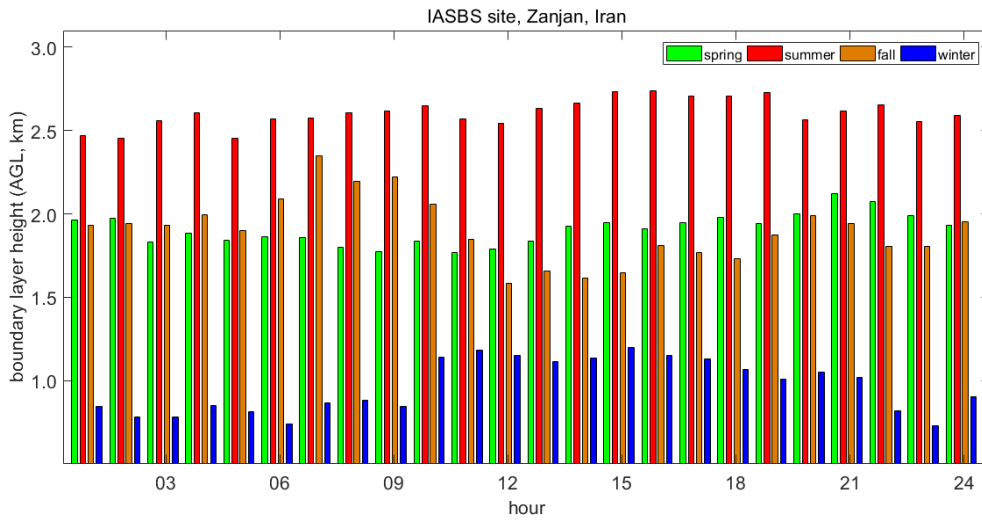
در نهایت در شکل‌های ۷ و ۸ برای همه ۱۰۵ روز داده‌برداری، مقدار میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی برحسب روز از سال و نیز برحسب دمای میانگین روزانه آورده شده است. این دو شکل به خوبی افزایش ارتفاع لایه مرزی در روزهای گرم سال و کاهش ملموس آن را در ایام سرد نشان می‌دهند.

جدول ۱. تفکیک فصلی تعداد داده‌برداری‌ها و ارتفاع محاسبه شده لایه مرزی.

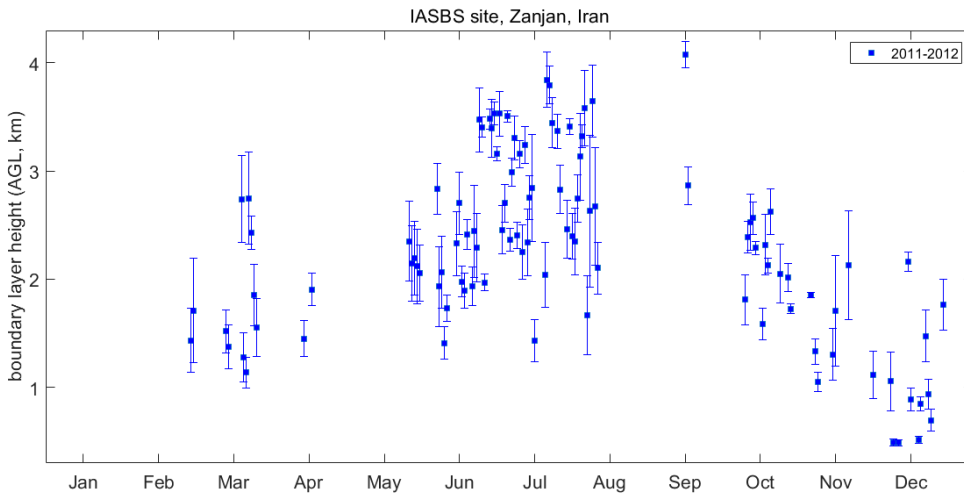
نام فصل	تعداد روزهای داده‌برداری	ارتفاع میانگین لایه مرزی (کیلومتر)
بهار (مارس-آوریل-می)	۱۶	۱/۹۰۷±۰/۵۷۹
تابستان (ژوئن-ژوئیه-آگوست)	۵۴	۲/۵۹۷±۰/۷۱۴
پاییز (سپتامبر-اکتبر-نوامبر)	۲۲	۱/۸۸۳±۰/۵۷۲
زمستان (دسامبر-ژانویه-فوریه)	۱۳	۰/۹۷۵±۰/۵۵۶
کل سال	۱۰۵	۲/۰۶±۰/۸۶۲



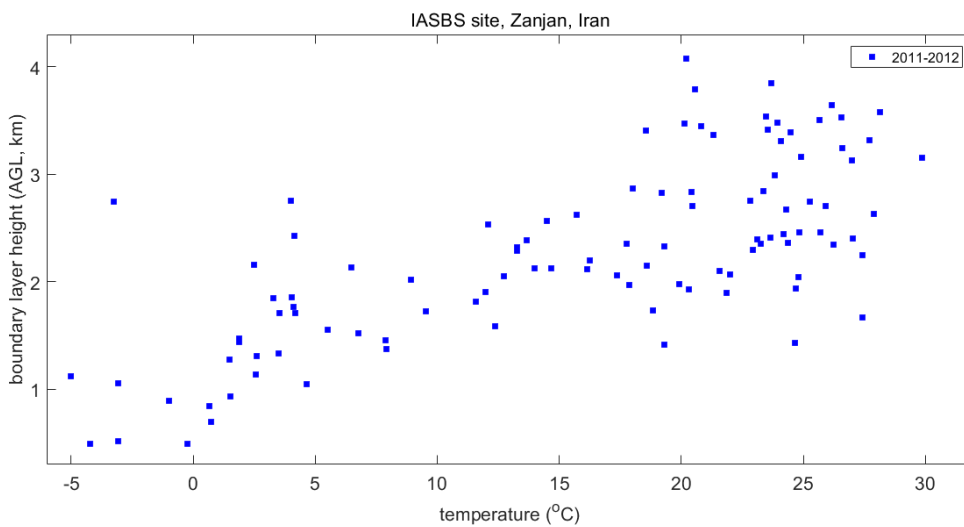
شکل ۵. روند تغییرات روزانه ارتفاع لایه مرزی برای فصل زمستان شهر زنجان.



شکل ۶. روند تغییرات روزانه ارتفاع لایه مرزی به تفکیک فصول برای شهر زنجان.



شکل ۷. مقدار میانگین (به‌همراه انحراف معیار) ارتفاع لایه مرزی برحسب روز از سال برای همه ۱۰۵ روز داده‌برداری از جو زنجان.



شکل ۸. مقدار میانگین ارتفاع لایه مرزی برحسب دمای میانگین روزانه برای همه ۱۰۵ روز داده‌برداری از جو زنجان.

## ۵. نتیجه گیری

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های لیدار کشسان پس‌پراکنش مستقر در ایستگاه سنجش از دور دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان (IASBS site) جهت محاسبه و بررسی نحوه تغییرات روزانه و فصلی ارتفاع لایه مرزی جو شهر زنجان مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل مشکلات تکنیکی ناشی از خرابی لیزر، داده‌ها پراکنده بوده و پیوستگی لازم برای بررسی آماری را نداشتند. بنابراین بررسی‌ها تنها به بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۲ (۱۳۹۰-۱۳۹۱) محدود شد که دارای ۱۰۵ روز داده‌برداری می‌شد. با استفاده از اعمال روش تبدیل کوواریانس موجک بر روی سیگنال تصحیح‌شده لیدار، ارتفاع لایه مرزی استخراج شد. مشاهده شد که در فصل زمستان کمترین مقدار میانگین روزانه ارتفاع لایه مرزی ( $0.975 \pm 0.556 \text{ km}$ ) و در فصل تابستان بیشینه مقدار آن

را ( $2.597 \pm 0.714 \text{ km}$ ) داریم.

همچنین نحوه تغییرات روزانه این کمیت نیز محاسبه و رسم شد. ارتباط معناداری بین دمای هوا و ارتفاع لایه مرزی مشاهده می‌شود که در صورت انجام داده‌برداری‌های بیشتر انتظار می‌رود دقت آن بهتر شود.

## تشکر و قدردانی

داده‌های لیدار مورد استفاده در این مقاله حاصل اندازه‌گیری‌های ایستگاه لیداری مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان به سرپرستی جناب آقای دکتر خالصی فرد است. نویسندگان مقاله از ایشان و سایر دست‌اندرکاران این ایستگاه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

## منابع

- Anderson, P. S., Ladkin, R. S., & Reinfrew, L. A. (2005). An autonomous Doppler sodar wind profiling system. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 22, 1309-1325.
- Andrews, D. G. (2010). *An introduction to atmospheric physics*, Cambridge university press.
- Baars, H., Ansmann, A., Engelmann R., & Althausen, D. (2008). Continuous monitoring of the boundary-layer top with lidar. *Atmospheric chemistry and physics*, 8, 7281-7296.
- Bidokhti, A. A., Khoshsima, M., Sabetghadam, S., & Khalesifard, H. M. (2008). Estimation of urban mixed layer height in Zanjan using LIDAR observations and numerical modeling. *Journal of earth system science*, 117, 925-934.
- Dang, R., Yang, Y., Hu, X., Wang, Z., & Zhang, S. (2019). A review of techniques for diagnosing the atmospheric boundary layer height (ABLH) using aerosol lidar data. *Remote Sensing*, 11, 1-28.
- Emeis, S. (2009). *Surface-based remote sensing of the atmospheric boundary layer*, Springer press.
- Garratt, J. R. (1992). *The atmospheric boundary layer*, Cambridge university press.
- Khoshsima, M., Sabetghadam, S., Ahmadi-Givi, F., & Aliakbari-Bidokhti, A. A. (2015). The role of atmospheric boundary layer height on remote sensing indices: Relationship between PM10 concentration and aerosol optical depth. *Journal of Climate Research*, 21, 1-8.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*, Taylor & Francis e-library press.
- Pegahfar, N., Aliakbari-Bidokhti, A. A., & Zavar-Reza P. (2013). Parameterization of nocturnal stable boundary layer height (NSBLH) and effect of NSBLH on air pollution in an urban area with complex topography (Tehran). *Journal of the earth and space physics*, 38, 4, 189-206.
- Wang, X., & Wang, K. (2016). Homogenized variability of radiosonde-derived atmospheric boundary layer height over the global land surface from 1973 to 2014. *Journal of climate*, 29, 6893-6908.
- Weitkamp, C. (2005). *Lidar, Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, Springer press.