

## لایه آمیخته شهری و آلودگی هوا

\* دکتر علی اکبر بیدختی  
\*\* دکتر تاج الدین بنی هاشم

### کلمات کلیدی:

جو شهری ، شار گرمای سطحی ، مدل پیش بینی ، توپوگرافی ، پایداری.

### چکیده:

بخش عمده‌ای از لایه مرزی جو روز هنگام را لایه آمیخته تشکیل می‌دهد که، آلودگی هوا در آن اغلب به طور یکنواخت پخش شده است. در این مقاله ضمن بحث در شیوه رشد لایه آمیخته شهری، که نقش مؤثری در غلظت آلودگی هوا دارد، مدلی تلاطمی برای آن ارائه و همراه با یک مدل انتگرالی برای پیش بینی آلودگی هوا در محیطهای شهری، تجربه می‌شود به طوری که، با گزینش و تنظیم مناسب مدلها، می‌توان آلودگی هوای شهری را، برای شهرهای مختلف و در شرایط گوناگون، به خوبی پیش بینی کرد.

از مقایسه نتایج حاصل از مدل برای دو روز نوعی تابستانی و زمستانی، با آنچه از اندازه‌گیریها به دست آمده است، پیداست که غلظت آلودگی هوا و آهنگ تغییر آن در طول روز به خوبی پیش بینی می‌شود. غلظت آلاینده‌ها در روزهای نوعی زمستانی، با شرایط هواشناختی یکسان، معمولاً بیشتر از روزهای نوعی تابستان است. توپوگرافی اطراف شهر، در پایداریهای نسبتاً شدید، در شهرهایی مانند تهران می‌تواند حرکت هوای لایه مرزی را محدود سازد و موجب افزایش بیش از حد آلودگی هوا شود.

\* - استادیار و مدیر گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

\*\* - عضو هیئت علمی مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

## مقدمه:

(برای نمونه، همانندی عدد رینولدز، Re، همانندی عدد فرود Fr، و مانند آن)، روشهای آزمایشگاهی به کار می رود (برای مثال بیدختی و بریتیر<sup>(۱)</sup>، ۱۹۸۶).

در این مقاله، ضمن بررسی شرایط حاکم بر رشد لایه آمیخته جو شهری، مدلی برای رشد آن ارائه می شود که می توان آن را همراه با مدل های پیش بینی آلودگی هوا به کار بست. مدل پیش بینی آلودگی هوا، که در اینجا همراه با مدل رشد لایه آمیخته آزمایش می شود، از نوع انتگرالی است که توسط بیدختی و دیگران (۱۳۷۳ و ۱۳۷۴) ساخته و آزمایش شده است.

در مدل رشد لایه آمیخته، لازم است دو عامل، ویژه شهرهایی مانند تهران، در نظر گرفته شود:

الف - توپوگرافی، که روی حرکت هوا در لایه آمیخته به فراز شهر اثر دارد (بل و تامسون<sup>(۱۰)</sup>، ۱۹۸۰).

ب - اثر جزیره گرمایی (آریا<sup>(۱۱)</sup>، ۱۹۸۸، و باین و آریا، ۱۹۹۰)، که می تواند گرتة باد را در سطح شهر متأثر سازد و نیز عمق لایه آمیخته را، بویژه در منطقه مرکزی شهر، افزایش دهد.

## مدلسازی رشد لایه آمیخته

لایه مرزی جو در طول روز عمدتاً شامل سه بخش متمایز است که در شکل ۱ نشان داده شده است. لایه مجاور سطح زمین که دارای گرادانهای شدید دما و سرعت باد در امتداد قائم است و ضخامت کمی، حدود یکدهم عمق لایه مرزی به هنگام روز (آریا، ۱۹۸۸)، دارد به لایه سطحی معروف است. لایه میانی، به دلیل تغییرهای قائم بسیار ناچیز سرعت باد، دما، رطوبت و آلودگی، لایه آمیخته نامیده می شود. این لایه که بیشتر بر اثر حرکت های همرفتی قائم شدید، دارای ساختار بی دررو است، بخش عمده از لایه مرزی جو را تشکیل می دهد، و به هنگام روز می تواند تا ارتفاع ۳ کیلومتر (استال<sup>(۱۲)</sup>، ۱۹۸۹) گسترش یابد. ناحیه درون آمیختگی<sup>(۱۳)</sup> لایه نازکی بر تارک لایه آمیخته است که آن را از جو زبرین (جو آزاد) جدا می کند. در این لایه جهشی دمایی به صورت وارونگی مشاهده می شود. به دلیل جهشی که در سرعت باد نیز وجود دارد، ناپایداری از نوع کلونین - هملهلتنز، با عدد ریچاردسون کوچکتر از ۱ (ترنر<sup>(۱۴)</sup>، ۱۹۷۹) شکل می گیرد و موجب درون آمیختگی هوای جو آزاد با لایه آمیخته می شود.

یکی از عوامل تعیین کننده آلودگی هوا در شهرها، شرایط حاکم بر لایه مرزی جو شهری است. گاهی این شرایط چنان مساعد است که آلودگی هوای می تواند به گونه ای خطرناک بالا رود و تهدیدی جدی برای موجودات زنده باشد. از اینرو، پژوهشهای بسیاری روی لایه مرزی جو شهری، از آن میان، شرایط و چگونگی رشد لایه آمیخته، انجام می گیرد (مانند هانت<sup>(۱)</sup>، ۱۹۸۰، باین و آریا<sup>(۲)</sup>، ۱۹۹۰ و رینر و واتسون<sup>(۳)</sup>، ۱۹۹۱).

امروزه برای کاهش اثرهای آلودگی هوا روی انسان و محیط زیست و ایجاد توازن قابل قبول میان نیازهای صنعتی - اقتصادی و معیارهای کیفیت هوا<sup>(۴)</sup>، با طراحی و تکامل مدل های پیش بینی، که اغلب بر پایه روشهای عددی استوارند، برآوردهای کمی انجام می شود (بریتیر<sup>(۵)</sup>، ۱۹۹۳). برای این گونه برآوردها، تحلیل آلودگی هوای شهری بر پایه داده های توزیع غلظت آلاینده ها در محدوده شهری، تغییرات شبانه روزی آلودگی، تغییرات مکانی چشمه های آلاینده و حتی تغییرات قائم آلاینده ها به عمل می آید. با ایجاد و راه اندازی شبکه ای در شهر، می توان داده های لحظه ای از آلاینده ها به دست آورد. لیکن غلظت و آهنگ تغییر آلاینده ها در محیط، جدای از چشمه ها و چاه ها، با شرایط هواشناختی در مقیاسهای مختلف نیز بستگی دارد. این شرایط، در واقع، همان چگونگی رفتار شاره جو در لایه مرزی است و به دلیل پیروی از قانونهای دینامیک شاره ها، رفتاری نادره ای دارد و از این رو پیش بینی، بویژه، میان مدت و بلند مدت آلودگی هوای شهری و توزیع و تغییر آن را پیچیده می کند.

مدلهای عددی پیش بینی آلودگی هوا، با هدف کنترل کیفیت هوا، بیشتر تکیه بر قوانین پخش آلاینده ها و قانونهای حاکم بر لایه مرزی دارند و با توجه به نوع مطالعه، به شرایط اقلیمی، توپوگرافی، گسیل و مانند آن وابسته اند (گزارش EPA<sup>(۶)</sup>، ۱۹۸۶). از این رو، هر مدل ویژگیهای خاص خود را دارد و اغلب نسبت به گونه های پیشین خود پیچیده تر است و بر پایه مطالعه موردی<sup>(۷)</sup> تکوین می یابد.

برای بررسی کارایی مدل های عددی دو راه هست، یا نتیجه های به دست آمده از مدل با اندازه گیری واقعی زمانی و مکانی آلودگی سنجیده می شود، و یا با توجه به همانندی<sup>(۸)</sup>، دینامیکی و هندسی

که در آن،  $\theta$  دمای پتانسیل لایه آمیخته،  $\Delta\theta$  جهش دما در ضخامت لایه درون آمیختگی (شکل ۱)،  $H$  شار گرمای محسوس در سطح زمین،  $\rho$  چگالی متوسط هوا در لایه آمیخته،  $C_p$  گرمای ویژه هوا در فشار ثابت،  $Z_i$  عمق لایه آمیخته است. در سمت راست معادله، جمله اول نشانگر آهنگ تغییر دمای لایه آمیخته در طی رشد قائم لایه و جمله دوم نشان دهنده گرم شدن لایه آمیخته با همرفت تلاطمی از سطح زمین است.

معادله انتگرالی انرژی جنبشی تلاطمی متوسط در عمق لایه آمیخته عبارت است از:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & - \frac{E}{Z_i} \frac{dZ_i}{dt} - \frac{2}{Z_i} \int_0^{Z_i+\delta} \overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial Z} dZ \\ & - \frac{2}{Z_i} [w' (\frac{P'}{\rho} + E)]_0^{Z_i+\delta} \\ & + \frac{g}{T} \left[ \frac{H}{\rho C_p} - \delta\theta \frac{dZ_i}{dt} \right] - \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

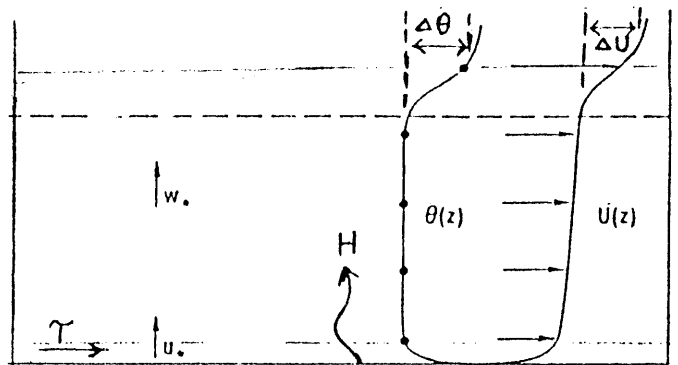
که در آن،  $E$  انرژی جنبشی کل در هر نقطه از لایه آمیخته،  $\delta$  عمق لایه درون آمیختگی،  $\overline{u'w'}$  تنش رینولدز،  $\partial U/\partial Z$  چپش قائم باد،  $P'$  افت خیز فشار،  $g$  شتاب گرانی،  $T$  دمای میانگین لایه و  $\varepsilon$  اتلاف و شکسانی انرژی است. جمله‌های سمت راست به ترتیب عبارتند از جمله‌های درون آمیختگی، تولید انرژی جنبشی با تنش رینولدز، توزیع انرژی، شناوری، و اتلاف و شکسانی انرژی جنبشی تلاطمی. اگر انرژی جنبشی در عمق لایه آمیخته همگن فرض شود، جمله توزیع حذف می‌شود. با پارامتری سازی جمله‌های تولید انرژی و اتلاف، معادله (۲) به صورت زیر در می‌آید (رینر و واتسون، ۱۹۹۱):

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & - \frac{E}{Z_i} \frac{dZ_i}{dt} + \frac{q_*^3}{Z_i} + \frac{C_s}{Z_i} (\Delta U)^2 \frac{dZ_i}{dt} \\ & - g \frac{\Delta\theta}{T} \frac{dZ_i}{dt} - C_E \frac{E^{3/2}}{Z_i} \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن

$$q_*^3 = W_*^3 + C_N^3 U_*^3 \quad (4)$$

البته، عامل مهم دیگر درون آمیختگی در این لایه، تلاطم همرفتی لایه است، که در واقع، عامل اصلی رشد لایه آمیخته به شمار می‌آید.



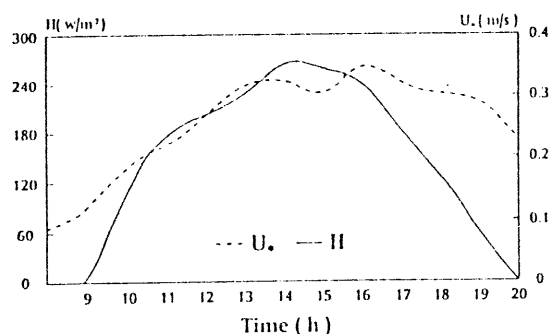
شکل ۱ - ساختار روز هنگام لایه مرزی جو

رشد لایه آمیخته را به روشهای گوناگون می‌توان حساب کرد، مانند روش پیوستگی، روش همانندی (بر پایه تحلیل ابعادی)، روش ترمودینامیکی و مدل‌های تلاطم (برای نمونه، استال، ۱۹۸۹). هر یک از این روشها برفرضهای متعددی استوار است بویژه، جدای از مدل‌های تلاطم، اغلب از پارامترهایی استفاده می‌شود که مستقیماً از معادله‌های حرکت به دست نمی‌آیند و از این رو، روشهای نیمه تجربی‌اند. این روشها بیشتر برای برآوردی تقریبی از عمق لایه آمیخته به کار می‌روند و جایگاهی در محاسبه‌های عددی دقیق ندارند. معمولاً در محاسبه‌های دقیق از مدل‌های بستاری<sup>(۱۵)</sup> تلاطم، با درجه یک و بالاتر، استفاده می‌شود. مدلی که در اینجا برای رشد لایه آمیخته ارائه و تجربه می‌شود از نوع بستاری تلاطم است که بر پایه معادله انرژی گرمایی و معادله انرژی جنبشی تلاطم لایه مرزی جو، با دو سازوکار مکانیکی و همرفت گرمایی، نهاده شده است (برای نمونه، رینر و واتسون، ۱۹۹۱).

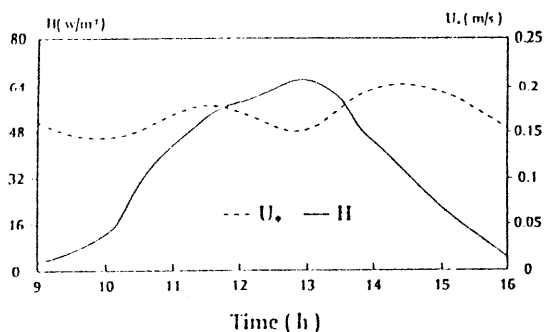
معادله یک بعدی انرژی گرمایی را برای لایه آمیخته، با چشمپوشی از انتقال تلاطمی شارگرما میان لایه درون آمیختگی و جو آزاد، به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta\theta}{Z_i} \frac{dZ_i}{dt} + \frac{H}{Z_i \rho C_p} \quad (1)$$

بزرگ نوعی، مانند شهر تهران، ارائه می شود.



شکل ۲ - شار گرمای محسوس H و سرعت مالشی  $U^*$  در طول یک روز تابستانی در تهران (مشکوتی، ۱۳۷۰).



شکل ۳ - مانند شکل ۲، ولی در زمستان (همان).

## نتایج مدل

معادله‌های (۱)، (۶) و (۷)، پس از برآورد پارامترهای لایه آمیخته شهری و داده‌های گسیل (بر پایه گرتنه رفت - آمد شهری)، به روش چهار مرحله‌ای رونگه - کوتا<sup>(۱۷)</sup> انتگرالگیری می شوند. در اینجا، انتگرالگیری از ساعت ۶ بامداد تا ساعت ۶ بعد از ظهر به وقت محلی، در دو روز نوعی تابستانی و زمستانی، با شرایط هوا شناختی یکسان (هوای صاف، آفتابی و همراه با باد ملایم) انجام شده است.

تغییر روزانه  $U^*$  سرعت مالشی، و H، شار گرمای محسوس، برای دو روز نوعی تابستانی و زمستانی در شکل‌های ۲ و ۳ نموده شده است. بدیهی است که، بویژه شار گرمای محسوس در سطح زمین، در تابستان بیشتر از زمستان خواهد بود و از این شکلها پیداست که بیشینه این شار در تابستان بیش از سه برابر آن

عبارت است از مجموع انرژیهای جنبشی مالشی سطحی و همرفتی سطحی،  $C_N$  و  $C_E$ ،  $C_s$ ، مقدارهایی ثابت و به ترتیب برابر حدود  $0/2$ ،  $1/15$  و  $1/33$ ، و  $\Delta U$  اختلاف سرعت باد میان لایه آمیخته و جو آزاد است.  $U^*$  سرعت مالشی است و  $W_*$  سرعت شناوری قائم است که با رابطه زیر داده می شود:

$$W_* = \left[ \frac{g Z_i H}{\rho C_p T} \right]^{1/3} \quad (5)$$

در حالت توازن (برابری چشمه‌ها و چاهه‌های انرژی،  $dE/dt=0$ )، از معادله (۳) می توان  $dZ_i/dt$  را به دست آورد:

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{C_k q_*^3}{C_T q_*^2 + g Z_i \Delta\theta/T - C_s (\Delta U)^2} \quad (6)$$

که در آن،  $C_T$  و  $C_k$  مقدارهایی ثابتند، وابسته به  $C_E$ ، به ترتیب حدود  $0/18$  و  $0/8$ .

از معادله‌های (۶) و (۱۱)، به ترتیب، آهنگ رشد و دمای لایه آمیخته در جو شهری به دست می آید.

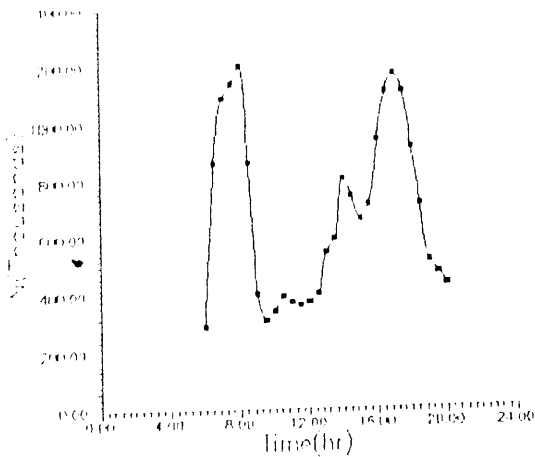
## کاربرد مدل رشد لایه آمیخته

محاسبه تغییر زمانی و پیش‌بینی غلظت آلودگی هوا نمونه‌ای از کاربردهای سودمند مدل رشد لایه آمیخته است. در مدل انتگرالی، معادله آهنگ تغییر آلودگی هوا را برای محدوده فضای شهر، که دارای مساحت معین ولی ارتفاع - عمق لایه آمیخته - متغیر است، می توان به صورت زیر نوشت (بیدختی و دیگران، ۱۳۷۳ و ۱۳۷۴):

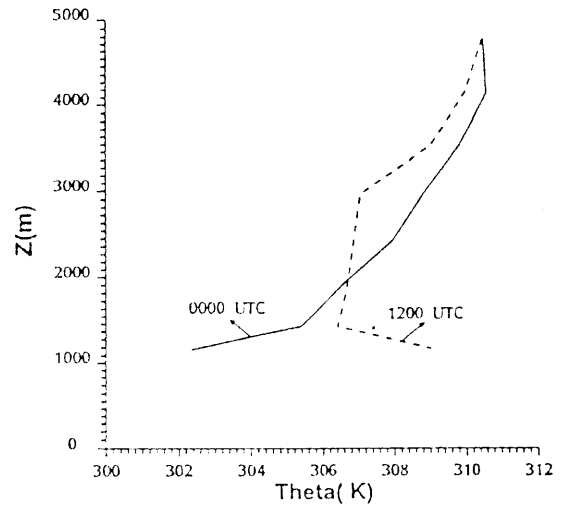
$$\frac{\partial C}{\partial t} = U \frac{(C_b - C)}{\Delta x} + \frac{\partial Z_i}{\partial t} \frac{(C_a - C)}{Z_i} - \frac{Q_a(t)}{Z_i} + \frac{S}{\Delta x Z_i} \quad (7)$$

که در آن، C غلظت متوسط آلودگی در حجم مدل، U تندی فرارفتی متوسط هوا،  $\Delta x$  پهناي فضای شهر،  $C_a$  و  $C_b$ ، به ترتیب، مقدارهای متوسط غلظت آلودگی زمینه<sup>(۱۸)</sup> در سمت رو به باد و در بالای لایه آمیخته،  $Q_a$  آهنگ گسیل آلاینده از سطح شهر - مقدار آلاینده بر واحد سطح بر واحد زمان - و S- آهنگ برداشت آلاینده از محدوده فضای شهر است.

در زیر نتیجه‌های به دست آمده از این کاربرد، در باره شهری

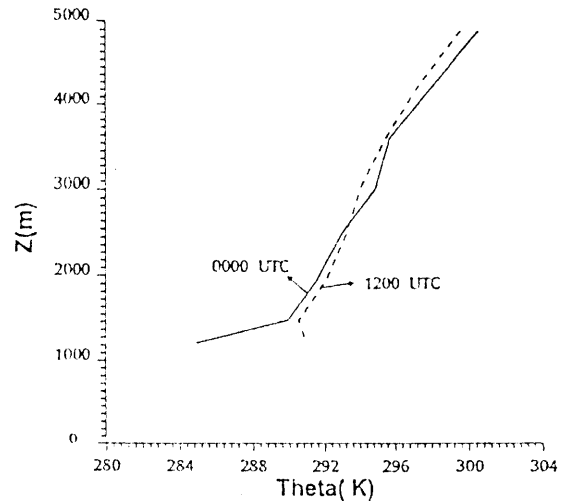


شکلی ۶ - نمودار رفت - آمد شهری برحسب تعداد اتومبیل‌های در حال حرکت.

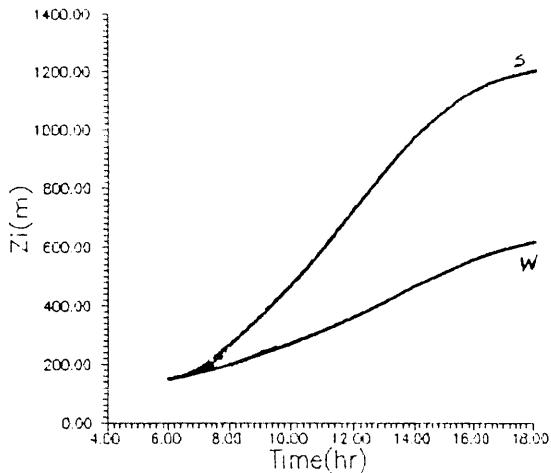


شکل ۴ - نمایه قائم دمای پتانسیل در تابستان بر پایه گمانه زنیهای ساعتها ۰۰۰ و ۱۲۰۰ به وقت گرینویچ، ۱۲ دسامبر ۱۹۹۲، ایستگاه مهرآباد تهران (سازمان هواشناسی کشور، ۱۹۹۲).

شکل ۷ روند محاسبه شده رشد لایه آمیخته را برای دو روز نوعی تابستانی و زمستانی نشان می‌دهد. عمق آغازین لایه ۱۰۰ متر فرض شده است. آهنگ رشد در آغاز روز کند است، ولی بار زمان، بویژه در تابستان، به سرعت افزایش می‌یابد؛ آنگاه از حدود ساعت دو و نیم بعد از ظهر، دوباره کند می‌شود، و سرانجام، رشد به تقریب پایان می‌پذیرد. در اغلب شهرهای بزرگ، این روند رشد در مشاهدات عمق لایه آمیخته نیز به روشنی پیداست (برای نمونه، شکل ۸).



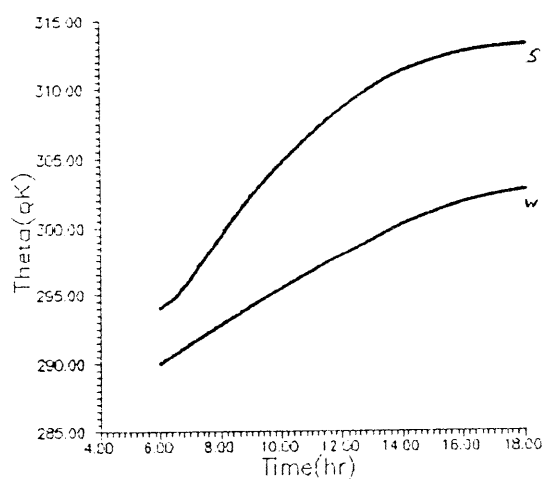
شکل ۵ - مانند شکل ۴، ولی در زمستان، ۱۷ مه ۱۹۹۲ (همان).



شکل ۷ - رشد عمق لایه آمیخته برای دو روز نوعی تابستانی (S) و زمستانی (W).

در زمستان است. برای تخمین  $\Delta\theta$  در دو روز نوعی تابستانی و زمستانی، از نمایه دمای پتانسیل، که به وسیله رادیوگمانه (۱۸) به دست آمده است (شکل‌های ۴ و ۵)، استفاده می‌شود. آهنگ گسیل در فضای شهر از سوی خودروهای در حال حرکت، از نمودار رفت - آمد شهری در یک روز کاری (شکل ۶) برآورد می‌شود. در این مورد، فرض شده است که از هر خودرو به طور متوسط  $4 \times 10^{-4}$  کیلوگرم بر متر مربع بر ثانیه (السون<sup>(۱۹)</sup>، ۱۹۷۷) آلودگی به صورت گازهای  $CO$ ،  $NO_x$  و  $HC$  و  $O_3$  گسیل می‌شود.

می‌رسد. آنگاه بر اثر رشد سریع لایه آمیخته، به سرعت کاهش می‌یابد. بیشینه آلودگی در تابستان در فاصله ساعتی حدود ۷ تا ۹/۵ و در زمستان در حدود ۷ تا ۱۰ صبح روی می‌دهد، و مقدار این بیشینه در تابستان به تقریب ۷۰٪ مقدار آن در زمستان است. ولی از حدود ظهر محلی، آلودگی در تابستان به ۵۰٪ مقدار آن در زمستان می‌رسد. این پدیده بازتابی از عمق لایه آمیخته است که مقدار آن، چنانکه در شکل ۷ دیده می‌شود، از ساعتی پیش از ظهر محلی، در طول روز، در تابستان به تقریب دو برابر زمستان است.



شکل ۹ - دمای پتانسیل لایه آمیخته برای دو روز نوعی تابستانی (S) و زمستانی (W).

برای بررسی اثر مرکب توپوگرافی پیرامون شهر و پایداری جو، در مدل غلظت آلودگی هوا از عدد بی بعد فرود

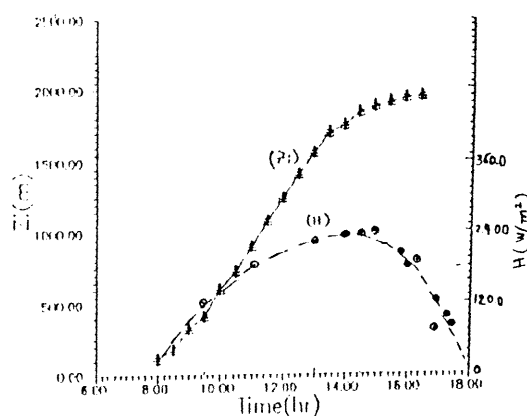
$$F_r = \frac{U}{Nh} \quad (8)$$

استفاده شده است، که در آن U سرعت متوسط باد، h عمق متوسط فضای دره‌ای شهر است و N بسامد شناوری برانت - وایسالا (۲۰) است که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$N = \left( \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)^{1/2} \quad (9)$$

مقدار بحرانی عدد فرود برای دره‌ای شهر برابر ۱/۳

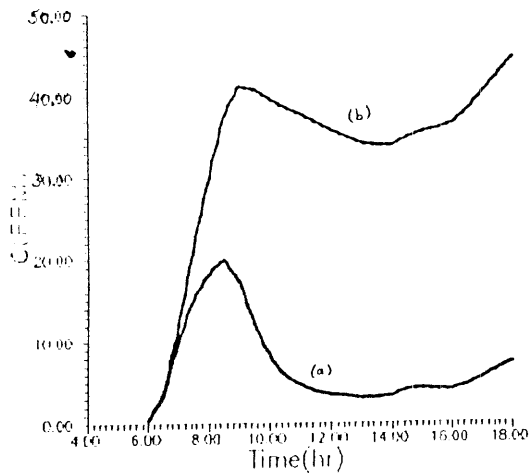
شکل ۹ تغییر روز هنگام دمای پتانسیل لایه آمیخته را برای دو روز نوعی تابستانی و زمستانی نشان می‌دهد. دمای لایه در تابستان به سبب فزونی شار گرمای محسوس سطحی، سریعتر بالا می‌رود. به علاوه، شهرهای بزرگ، مانند تهران، بر اثر شار گرمای مضاعف حاصل از فعالیت‌های صنعتی و خانگی، اثر جزیره گرمایی از خود نشان می‌دهند. در این کار، شار گرمای انسانی حدود ۶۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است. وجود این شار موجب بیشتر عمق لایه آمیخته در فضای درونی شهر نسبت به اطراف آن می‌شود. این اثر می‌تواند در گرتة باد غالب در سطح شهر نیز دگرگونی پدید آورد (جهانگیری و دیگران، ۱۳۷۵) که با توجه به معادله‌های (۶) و (۷) از این راه نیز در آهنگ رشد لایه آمیخته، و در نتیجه در آهنگ تغییر غلظت آلودگی هوا، اثر می‌گذارد.



شکل ۸ - رشد تجربی عمق لایه آمیخته ( $Z_i$ ) برای مینزوتای آمریکا در طول یک روز تابستانی (آریا، ۱۹۸۸). ( $H$  گرمای محسوس سطح زمین).

شکل ۱۰ نمونه‌ای از پیش بینی غلظت گازهای آلاینده هوای تهران را برای دو روز نوعی تابستانی و زمستانی نشان می‌دهد. در هر دو روز، مقدار آغازین آلودگی بسیار ناچیز گرفته شده است. پیداست که در هر دو روز، آلودگی پس از افزایش تند در آغاز روز به دلیل افزایش رفت - آمد شهری و شدت وارونگی سطحی که همراه با کم عمق بودن لایه آمیخته است، به بیشینه خود

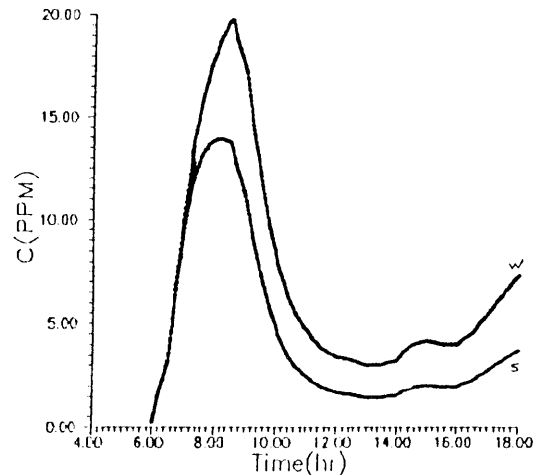
دمای پتانسیل (شکل‌های ۴ و ۵)، که از گمانه زنی جو<sup>(۲۱)</sup> به دست آمده است، بسادگی دریافت. همچنین، همانندی آهنگ رشد لایه آمیخته در تهران و شهر مینزوتای<sup>(۲۲)</sup> آمریکا (شکل ۸)، که شرایط هواشناختی مشابهی دارند.



شکل ۱۱ - پیش‌بینی غلظت گازهای آلاینده برای یک شهر بزرگ، مانند تهران، در یک روز زمستانی نسبتاً آرام: (a) بدون اثر توپوگرافی شهر، و (b) با اثر توپوگرافی.

مقایسه تغییرات روز هنگام برآورد غلظت آلاینده‌ها در تهران، از ۶ صبح تا ۶ عصر، (شکل ۱۰) با دو نمونه اندازه‌گیری گازهای CO و NO<sub>x</sub>، که در خیابان ویلا در طول یک شبانه روز انجام شده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳)، شباهت قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. به ویژه، اندازه‌گیری NO<sub>x</sub> از دیدگاه ساختار نمودار و زمان رویداد پیشینه‌ها و کمینه‌ها، با نتایج مدل همخوانی بسیار خوبی دارد. چنین همخوانی در اندازه‌گیری زمستانی CO نیز دیده می‌شود. لیکن در تابستان، جدای از اینکه مقدار CO در نخستین ساعاتی بامدادی بسیار بالاست و باید ناشی از یک وارونگی شدید شبانه بوده باشد، تغییرات آن نسبت به نتایج مدل به طور متوسط با تأخیر فازی به تقریب برابر ۲ ساعت همراه است. لازم است یادآوری شود همانطوری که در بالا اشاره شد، این اندازه‌گیری‌ها مربوط به یک نقطه از شهر است. از آنجا که مدل مقدار متوسط غلظت آلودگی را برای فضای شهر برآورد می‌کند، اگر اندازه‌گیری همزمان در نقاط مختلف شهر به عمل می‌آید و میانگین‌گیری می‌شود، مقایسه با نتایج مدل بر پایه‌ای مقبول‌تر امکان می‌یابد.

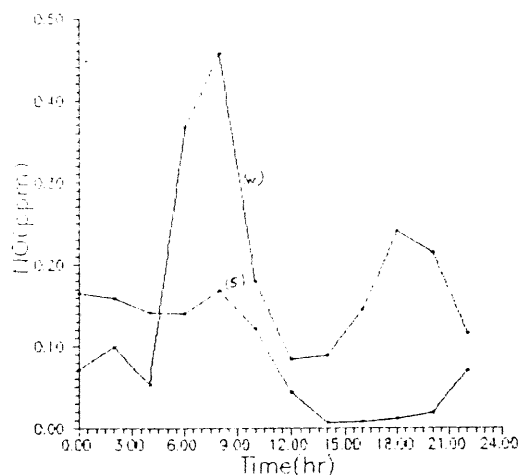
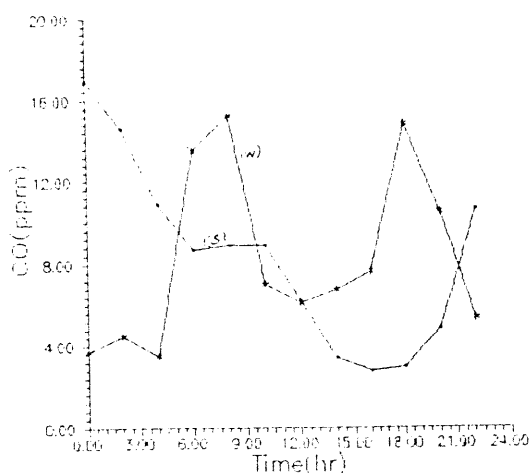
(خوشکام، ۱۳۷۵) اختیار شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که آلودگی در شرایط حاد، هنگامی که فضای شهر تهویه نمی‌شود ( $F_T < 1/3$ )، می‌تواند به دو برابر مقدار آن در شرایطی برسد که تهویه با جاروب شدن به وسیله باد، به خوبی انجام می‌یابد ( $F_T > 1/3$ ).



شکل ۱۰ - پیش‌بینی غلظت گازهای آلاینده برای یک شهر بزرگ، مانند تهران در دو روز نوعی تابستانی (S) و زمستانی (W).

### مقایسه نتایج مدل با مشاهدات

عمق، یا به عبارت دیگر، ضخامت لایه آمیخته از نمایه قائم دما (شکل‌های ۴ و ۵) تخمین زده می‌شود. در بعد از ظهر محلی، آنگاه که به رشد نهایی خود رسیده است، در تابستان و زمستان، به ترتیب، حدود ۱/۸ و ۱/۵ کیلومتر برآورد می‌شود. این مقادیرها از عمق‌های متناظر ۱/۲ و ۰/۸ کیلومتری که از مدل به دست آمده است (شکل ۷) بیشتر است. اختلاف، ناشی از دو عامل است. نخست، لازم است اثر جزیره گرمایی در محاسبه به دقت وارد شود. آنچه در اینجا به کار رفته است تقریبی است، زیرا شارگرمای حاصل از فعالیتهای انسانی به درستی معلوم نیست. دوم اینکه، در مدل رشد لایه آمیخته، از اثر درون آمیختگی در بالای لایه چشمپوشی شده است در حالی که این عمل، بویژه در ساعاتی آغازین روز، می‌تواند خطای تا ۲۰٪ را در نتایج رشد لایه آمیخته موجب شود (رینر و واتسون، ۱۹۹۱). بعلاوه، از آنجا که عمق لایه کمتر از مقدار واقعی آن برآورد شده است، باید برآورد دمای آن بیشتر از مقدار واقعی باشد. این موضوع را می‌توان از مقایسه دمای پتانسیل لایه آمیخته (شکل ۹) و نمایه‌های



شکل ۱۲ - اندازه گیری منواکسیدهای ازت ،  $NO_x$  (مجموع  $NO$  و  $NO_2$ ) در طول یک روز تابستانی (S) و یک روز زمستانی (W) (سازمان حفاظت محیط زیست ، ۱۹۹۴).

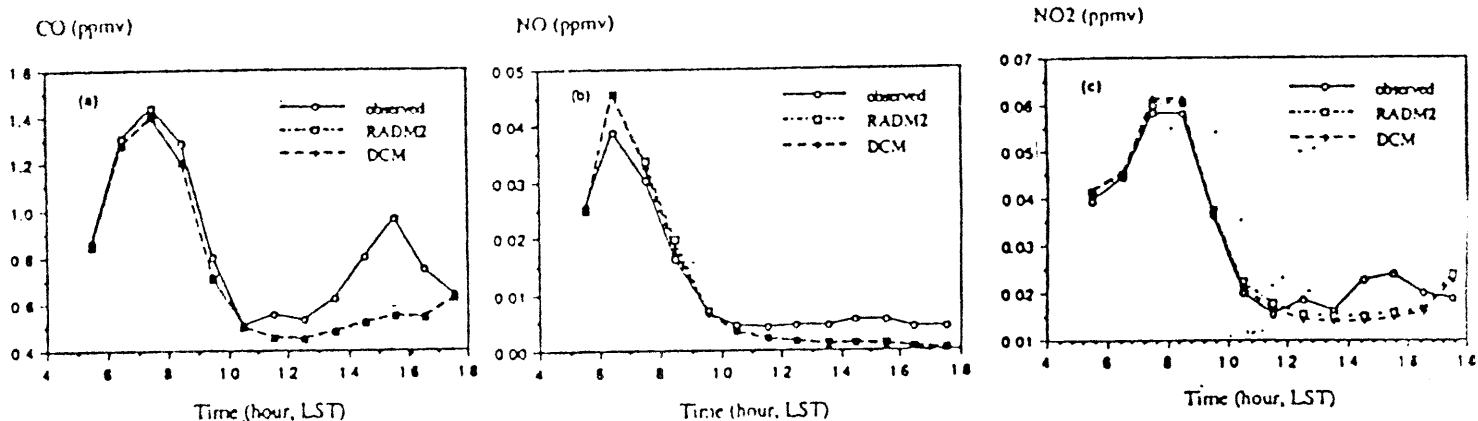
شکل ۱۳ - مانند شکل ۱۲ ، ولی اندازه گیری منواکسید کربن (همان).

### بحث و نتیجه گیری :

مدلی که بر پایه معادله های انرژی گرمایی و انرژی جنبشی تلاطمی معرفی و برای دو روز از تابستان و زمستان در شرایط هواشناختی یکسان به کار بسته شد نشان می دهد که عمق لایه آمیخته ، در فضای شهری ، در تابستان از رشد بیشتری برخوردار است و مؤید نتایجی است که در باین و آریا (۱۹۹۰) در شرایط مشابه برای رشد لایه آمیخته ارائه شده است.

با به کارگیری نتایج به دست آمده از مدل رشد لایه آمیخته در یک مدل انتگرالی پیش بینی غلظت آلودگی هوا، نشان داده شد که بیشینه غلظت آلودگی هوا در یک روز نوعی تابستانی به

نتایج برآورد غلظت آلودگی هوای شهری با نتایج جین و دمرجیان<sup>(۲۳)</sup> (۱۹۹۳) نیز، که در شکل ۱۴ آمده است، همانندی بسیار خوبی دارد. در این شکل، نتایج حاصل از دو مدل مختلف، مشابه آنچه در این کار ارائه شده است، در باره گازهای  $NO$ ،  $CO$  و  $NO_2$  با اندازه گیری در یک روز تابستانی مشابه، در شهر سنت لوئیز<sup>(۲۴)</sup> آمریکا، مقایسه شده است. همانندی تغییرات روزانه غلظت آلودگی، که در شکل ۱۰ نموده شده است، با نمودارهای  $CO$  و  $NO_2$  که جین و دمرجیان به دست آورده اند، به ویژه نمودارهای حاصل از اندازه گیری، شایان توجه است.



شکل ۱۴ - مقایسه مقادیرهای شبیه سازی شده و مشاهده ای غلظت  $CO$  ،  $NO$  و  $NO_2$  در سنت لوئیز ، در ۱۳ ماد اوت ۱۹۷۶ (جین و دمرجیان ، ۱۹۹۳).



است، زیرا، نه تنها  $N^2$  معمولاً عدد خیلی کوچکی است و در ورود سپهر<sup>(۲۷)</sup> از مرتبه  $10^{-4}$  (هلتون<sup>(۲۸)</sup>)، که می‌تواند مثبت، منفی و حتی صفر باشد. در شرایط پایداری ( $N^2 > 0$ )، بسامد شناوری طبق رابطه<sup>(۹)</sup> از نمایه قائم دمای پتانسیل (شکل‌های ۴ و ۵) به دست می‌آید. در این حالت، اگر عدد فرود کوچکتر از  $1/3$  باشد در معادله<sup>(۷)</sup> جمله اول سمت راست، که جمله فرارفتی است حذف می‌شود، یعنی تهویه انجام نمی‌گیرد. از نمودار تابستانی شکل ۱۳ پیداست که نمونه بارز این حالت، به صورت یک پایداری شدید شبانه، پیش از نیم شب رخ داده است. در شرایط ناپایداری ( $N^2 < 0$ ) یا پایداری بی تفاوت ( $N^2 = 0$ ) فرض بر این است که حرکت قائم وجود دارد و هوای شهر تهویه می‌شود. در پایان لازم است اضافه شود که در این محاسبات تنها باد غالب، در نظر گرفته شده است، که بویژه در تهران بادی است ملایم و در سقف لایه آمیخته حدود ۵ متر برتانیه فرض شده است. اثر بادهای کوهستانی که خود نقش مؤثری در جابجایی آلودگی هوا در محیطهای شهری پیچیده شهرهای بزرگ دارند، منظور نشده است.

#### قدردانی:

بخش عمده‌ای از این کار در قالب طرح پژوهشی شماره ۶۵۲/۱/۱۸۷، تحت عنوان مدل انتگرالی پیش‌بینی آلودگی هوا در تهران، با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران، و بخشی دیگر در فرصت تعطیل تابستانی، با بهره‌گیری از امکانات مؤسسه ژئوفیزیک به انجام رسیده است. از اینرو، بویژه از شوراها پژوهشی گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک و دانشگاه تهران تشکر و قدردانی می‌شود. از سازمانهای هواشناسی کشور، حفاظت محیط زیست و ترافیک تهران برای داده‌هایی که در اختیار این پژوهش گذاشته‌اند کمال امتنان هست.

#### یادداشتها:

- 1 - Hunt.
- 2 - Byun & Arya.
- 3 - Rayner & Watson.
- 4 - Air quality standards.
- 5 - Britter.
- 6 - Environmental protection Agency.
- 7 - Case study.
- 8 - Similarity.

تقریباً برابر ۷۰٪ بیشینه آن در روز نوعی زمستانی است (شکل ۱۰)، که با مقایسه با داده‌های واقعی (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) مقبول به نظر می‌رسد. بعلاوه، با نتایج جین و دمرجیان (۱۹۹۳)، بویژه با اندازه‌گیریهای سنت‌لوئیز، (شکل ۱۴) نیز همخوانی دارد. لیکن لازم است اضافه شود، چنانچه از شکل ۱۴ پیداست، در نیمه دوم روز مدل‌های جین و دمرجیان با داده‌های واقعی سازگار نیست، در حالی که همانندی خوب ساختاری نمودار شکل ۱۰ با نمودارهای اندازه‌گیری  $CO$  و  $NO_2$  در شکل ۱۴ مؤید این نکته است که مدل‌هایی که در این کار برای رشد لایه آمیخته و غلظت آلودگی هوا در شهرهای بزرگ ارائه شده است بهتر از مدل‌های جین و دمرجیان با شرایط واقعی فضای شهری همخوانی دارد.

با شار گرمای سطحی ثابتی که در این کار به کار رفته است عمق لایه آمیخته و رشد آن به صورت میانگین برای سطح شهر برآورد می‌شود. اگر فرض شود که در ناحیه‌ای از شهر جزیره گرمایی (جهانگیری و دیگران، ۱۳۷۵) وجود دارد، لایه آمیخته توزیع گنبدی خواهد داشت (باین و آریا، ۱۹۹۰). لیکن، با توجه به اینکه در شهرهای بزرگ شار گرمای سطحی به دلایل گوناگون، مانند پوشش گیاهی، پوشش آبی و مناطق مسکونی، از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر تغییر می‌کند، برای برآورد بهتر عمق لایه آمیخته لازم است تغییرات افقی شار گرمای محسوس سطحی در نظر گرفته شود. در نتیجه، انتظار می‌رود لایه آمیخته شهری توزیع افقی پیدا کند و پیش‌بینی غلظت آلودگی هوا نیز بهبود یابد. البته لازم است اضافه شود که در این حالت معمولاً از مدل‌های انتگرالی چند حجمی استفاده می‌شود (ریگلند<sup>(۲۵)</sup>)، که بیرون از گستره این کار است.

در کاربرد عدد فرود برای وارد کردن اثر توپوگرافی و پایداری جو، در رابطه<sup>(۸)</sup>، عمق فضای دره‌ای شهر،  $h$ ، از روی نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب، برآورد می‌شود؛ میانگین باد بر فراز فضای دره‌ای شهر،  $U$ ، از گمانه‌های هواشناختی به دست می‌آید و یا از داده‌های هواشناختی سطح زمین به کمک معادله توازن باد گرمایی حساب می‌شود. خطا روی این دو کمیت،  $h$  و  $U$ ، در محدوده خطای محاسبه‌های مدل، یا کوچکتر است. لیکن، باید توجه داشت که عدد فرود به بسامد شناوری،  $N$ ، که ریشه دوم پارامتر پایداری ایستایی<sup>(۲۶)</sup> ( $N^2$ ) است، بسیار حساس

- ventilation by cross winds: *J. Fluid Mech.*, 98: 757-767.
- 8 - Bidokhti, A. A., and Britter, R. E. 1986. A multilayer density - stratified shear flow water channel, study of grid turbulence in sheared stratified flows. In Proc. of 3rd. International Conf. on Wind and Water Tunnel Modellings of Atmospheric Flows and Dispersion, Lausanne, Switzerland. 99-106.
- 9 - Britter, R. E. 1993. The evaluation of technical models used for major accident hazard installations: Eur 14774 EN, Commission of the European Communities.
- 10 - Byun, D. W. & Arya, P. 1990. A two - dimensional mesoscale numerical model of an urban mixed - layer, 1. model formulation, surface energy budget, and mixed layer: *Atmos. Env.*, 24A, 4: 829-844.
- 11 - EPA report (450/2 - 78 - 027R). 1986. Guidelines on air quality models: US Env. Protection Agency.
- 12 - Holton, J. R. 1992. An introduction to dynamic meteorology, Academic Press.
- 13 - Hunt, J. C. R. 1980. Environmental fluid mechanics: International Union of Theoretical and Applied Mechanics.
- 14 - Jin, S., and Demerjian, K. 1993. A photochemical box model for urban quality study: *Atmos. Env.*, 12: 2243-225.
- 15 - Olson, D. R. 1977. The control of motor vehicle emissions, in *Air Pollution*, Vol. IV, Ed. Stren, Academic Press.
- 16 - Rageland, K. W. 1973. Multiple box model for dispersion of air pollution from area sources: *Atmos. Env.*, 7: 1017-1032.
- 17 - Rayner, K. N., and Watson, I. D. 1991. Operational prediction of daytime mixed-layer heights for dispersion modelling: *Atmos. Env.* 25A, 1427-142.
- 18 - Turner, J. C. 1979. Buoyancy effects in fluids: Cambridge Univ. Press.
- 19 - Stull, R. B. 1989. An introduction to boundary layer meteorology: Kluwer Acad. Publ., Dordrecht.
- 9 - Bidokhti & Britter.
- 10 - Bell & Thompson.
- 11 - Arya.
- 12 - Stull.
- 13 - Entrainment zone.
- 14 - Turner.
- 15 - Closure models.
- 16 - Background.
- 17 - Runge - Kutta.
- 18 - Radiosonde.
- 19 - Olson.
- 20 - Brunt - Väisällä.
- 21 - Minesotah.
- 22 - Atmospheric sounding.
- 23 - Jin & Demerjian.
- 24 - St. Louis.
- 25 - Rageland.
- 26 - Static stability parameter.
- 27 - Troposphere.
- 28 - Holton.

## منابع:

- ۱ - بیدختی، ع، بنی هاشم، ت، طاطاوسیان، و ا، مشکوتی، ۱۳۷۴. مدلی برای پیشیابی غلظت آلودگی هوا در تهران: ن. فیزیک زمین و فضا، (۱) و (۲): ۴۳-۵۰.
- ۲ - بیدختی، ع، بنی هاشم، ت، طاطاوسیان، و ا، مشکوتی، ۱۳۷۳. مدل انتگرالی پیش بینی غلظت آلودگی هوا در تهران: گزارش نهایی طرح پژوهشی شماره ۱۸۷/۱/۶۵۲، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- ۳ - جهانگیری، ز، بیدختی، ع، و نوریان، ع، ۱۳۷۵. اثر جزیره گرمایی بر روی الگوی باد در سطح شهر: چهارمین کنفرانس دینامیک شارها، تهران.
- ۴ - خوشکام، م، ۱۳۷۵. تهویه دره توسط بادهای عرضی: پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- ۵ - ا، مشکوتی، ۱۳۷۰. بررسی گرادبان قائم دما در لایه سطحی در تهران: پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- 6 - Arya, P. 1988. An Introduction to Micrometeorology: Academic Press, 2nd ed.
- 7 - Bell, R. C. and Thompson, R. O. Y., 1980. Valley