

پیاده‌سازی سه مجموعه روابط پارامتری انتقال بار الکتریکی در مدل یک‌بعدی ابر

نغیسه پگاه‌فر^۱ و مریم قرایلو^{۲*}

^۱ استادیار، پژوهشکده علوم جوی، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۱۰/۱۶، پذیرش نهایی: ۹۳/۷/۱)

چکیده

از آنجا که نتایج شبیه‌سازی میدان الکتریکی درون ابر به مقدار زیادی به روابط مورد استفاده در پارامترسازی انتقال بار الکتریکی حساس است، در این پژوهش سه مجموعه روابط پارامتری پیشنهاد شده تا کاهشی در ۱۹۷۸ و ۱۹۸۴ (TAK)، جایارانه و همکاران در ۱۹۸۳، گاردینر و همکاران در ۱۹۸۵ و زیگلر و همکاران در ۱۹۹۱ (JGZ) و سندرز و همکاران در ۱۹۹۱ (SAN) کُد نویسی و در مدل یک‌بعدی ابر قائم پیاده‌سازی شد.

نتایج حاصل از بررسی متوسط بار الکتریکی شبیه‌سازی شده با کاربست هر سه مجموعه روابط پارامتری نشان داد که الگوی دوقطبی بار شبیه‌سازی شده برای TAK و JGZ به صورت دوقطبی مثبت و برای SAN به صورت دوقطبی منفی است. همچنین میدان الکتریکی حاصل از اجرای طرحواره TAK بین دقیقه‌های ۲۵ تا ۵۶، برای طرحواره JGZ بین دقیقه‌های ۱۹ تا ۳۴ و برای طرحواره SAN بین دقیقه‌های ۲۷ تا ۵۷ شکل گرفته است. مقایسه زمان و ارتفاع‌های وقوع بیشینه میدان الکتریکی مثبت و منفی شبیه‌سازی شده روشن ساخت که برای مجموعه روابط پارامتری TAK و SAN این مقادیر نزدیک به هم است، در حالی که برای JGZ سه دقیقه اختلاف زمانی و ۱۲/۵ کیلومتر اختلاف ارتفاع مشاهده شد. در ادامه با مقایسه بین شدت میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده و میدان الکتریکی آستانه، مشخص شد که از بین سه مجموعه روابط پارامتری، TAK بیشترین و JGZ کمترین رویداد آذرخش را شبیه‌سازی کرده است.

واژه‌های کلیدی: مدل یک‌بعدی ابر، طرحواره‌های انتقال بار الکتریکی درون ابر، آذرخش، میدان الکتریکی درون ابر، TAK، JGZ،

SAN

Implementation of three sets of electric charge transfer parameterization in a one-dimensional cloud model

Pegahfar, N.¹ and Gharaylou, M.²

¹Assistant Professor, Atmospheric Sciences Research Center, Iranian National Institute for Oceanography and Atmospheric Science, Tehran, Iran

²Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 06 Jan 2014, Accepted: 23 Sep 2014)

Summary

Results of numerical simulation of intra-cloud electrification depend on a mechanism that determines the sign and magnitude of charge transferred to hydrometeors (including graupels and ice crystals), through their collision (Mansell et al., 2005). Some of the microphysical processes play an important role in the above mechanism. In order to estimate the amount and sign of the transmitted charge per collision for numerical purpose, the results of laboratory researches are commonly used. Two kinds of inductive and non-inductive (used in the current paper) mechanisms could be applied. The research studies conducted for the non-inductive one can be determined based on the liquid water content (LWC), temperature (T), ice accretion rate and the particle size spectrum (Takahashi, 1978; Jayaratne et al., 1983; Gardiner et al., 1985; Saunders et al., 1991; Ziegler et al., 1991;

Saunders and Peck, 1998; Pereyra and Avila, 2002).

According to the importance of this issue, in this research three sets of relations resulted from laboratory studies have been used. These sets were proposed by Takahashi (TAK, 1978 and 1984), Jayaratne / Gardiner / Ziegler (JGZ, Jayaratne and colleagues 1983; Gardiner et al. 1985; Ziegler et al. 1991) and Sanders et al. (SAN, Sanders et al. 1991). These parameterizations relate the mean charge transferred per collision to liquid water content and temperature. Following these studies, the prepared schemes of three sets have been implemented in an explicit time-dependent one-dimensional cloud model (ETM), based on Chen and Sun (2002). In the 1-D cloud model entrainment-detrainment and eddy diffusion processes have been considered. Also microphysical processes have been parameterized using Lin et al. (1983) and Rutledge and Hobbs (1984) schemes. The convection is initiated using potential temperature perturbation, defined by Chen and Sun (2004). The input data for the simulation of vertical cloud is from an idealized sounding including pressure, temperature and water vapor mixing ratio. This cloud model simulates vertical velocity (w), equivalent ice potential temperature (θ_{ei}), water vapor mixing ratio (q_v), cloud water mixing ratio (q_c), ice mixing ratio (q_i), rain water mixing ratio (q_r), snow mixing ratio (q_s) and graupel mixing ratio (q_g). The cloud model was set up with 1 second time step, 70-minutes simulation duration and 250 m spatial resolution in the vertical direction up to a height of 15 km. The initial radius for the cloud column was considered as 3000 m.

The results of simulated mean charge transferred per collision using three sets of parameterizations (TAK, JGZ and SAN) show that their dipole pattern outputs are not the same. Simulations based on TAK and JGZ relations produced positive dipole (positive charge distribution lies over negative charge one), while simulation using SAN parameterization produced negative dipole pattern (the negative charge distribution on the top of the positive charge one). The simulation results show that the electric field was produced between 25-56, 19-34 and 27-57 minutes using TAK, JGZ and SAN parametric relations, respectively. It is noteworthy that the maximum values of positive and negative intra-cloud electric fields were obtained when applying TAK relations in the charge-transfer simulations. While, simulations using JGZ and SAN parameterizations led to the minimum values for positive and negative intra-cloud electric fields.

The time and height of positive and negative electric field occurrences based on three sets of applied parameterizations were also compared. The results of comparisons demonstrated that the values acquired from TAK and SAN parameterizations were close. However, the values for simulation using JGZ indicated three minutes time discrepancy and 12.5 km height difference.

Finally, the simulated intra-cloud electric fields using three TAK, JGZ and SAN parameterization sets were compared with the threshold electric field, defined by Marshall et al. (1995), to extract the number of lightning occurrences. Our findings show that the maximum and minimum values of lightning events were seen in simulations using TAK and JGZ parametric relations, respectively. The number of lightning occurrences was 40, 12 and 30 for simulations using TAK, JGZ and SAN parameterizations respectively.

Keywords: One dimensional cloud model, Intra-cloud charge transfer schemes, Lightning, The intra-cloud electric field, TAK, JGZ, SAN

۱ مقدمه

بزرگ‌تر ابر بر اثر جاذبه زمین سقوط می‌کنند درحالی‌که ذرات کوچک‌تر با جریان‌های بالارو جابه‌جا و به قسمت‌های بالایی ابر برده می‌شوند. اگر این ذرات به ترتیب

به‌طور کلی مفهومی که تا به حال برای توزیع بارهای الکتریکی در داخل ابرها پذیرفته شده، جدایش فیزیکی بارهای الکتریکی داخل ابر است. به این ترتیب که ذرات

آبراشباع رشد می‌کنند، انتقال بار در طی برخوردهای بین ذرات غیر منجمد در حال رشد، با آهنگ متفاوت رخ می‌دهد (سندرز و همکاران، ۲۰۰۶).

مدل‌سازی عددی باردارشدن توفان تندری به سازوکار مورد استفاده در پارامترسازی بار کل حاصل از برخورد آب شهاب‌ها (بلور یخ و گویچه برف) وابسته است (مانسل و همکاران، ۲۰۰۵). برخی از فرایندهای خردفیزیکی در برهم‌کنش آب شهاب‌ها و در نتیجه در مقدار بار الکتریکی انتقال یافته در برخورد و پس‌زنی آنها نقش مهمی ایفا می‌کنند. از جمله علت‌های محتمل شکل‌گیری توزیع بار الکتریکی در داخل ابر می‌تواند اصطکاک، برخورد، انجماد، ذوب یا اثر ترموالکتریک باشد. برای پارامترسازی این فرایندها به منظور برآورد علامت و مقدار بار انتقال یافته در اثر برخورد به هر گونه آب شهاب، از نتایج کارهای آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در این زمینه می‌توان به تحقیق‌های صورت گرفته بر مبنای سازوکارهای غیرالقایی در تعیین بار الکتریکی وابسته به محتوی آب مایع ابر، دما، آهنگ برافزایش یخ و طیف اندازه ذرات اشاره کرد (تاکاهاشی، ۱۹۷۸؛ جایاراتنه و همکاران، ۱۹۸۳؛ گاردینر و همکاران، ۱۹۸۵؛ سندرز و همکاران، ۱۹۹۱؛ زیگلر و همکاران، ۱۹۹۱؛ سندرز و پک، ۱۹۹۸؛ پیریرا و آویلا، ۲۰۰۲). انتخاب هر کدام از مولفه‌های یاد شده در پارامترسازی مقدار و علامت بار الکتریکی نقش اساسی ایفا می‌کند. از این رو انتظار می‌رود که نتیجه کاربست هر دسته روابط پارامتری از دیگر روابط متمایز باشد. از این رو سعی شد تا در این مقاله نتایج حاصل از کاربست سه مجموعه روابط پارامتری انتقال بار الکتریکی پیشنهاد شده تاکاهاشی (TAK، ۱۹۷۸ و ۱۹۸۴)، جایاراتنه-گاردینر-زیگلر (JGZ)، جایاراتنه و همکاران (۱۹۸۳؛ گاردینر و همکاران، ۱۹۸۵؛ زیگلر و همکاران، ۱۹۹۱) و سندرز و همکاران (SAN، ۱۹۹۱) بررسی و عرضه شود.

در این راستا، در این پژوهش بعد از توصیف داده‌های گمانه‌زنی ایده‌آل استفاده شده در بخش ۲، توضیح

بارهای منفی و مثبت را حمل‌کنند در نتیجه یک الگوی دو قطبی مثبت در داخل ابر به وجود می‌آید. از این رو، فرایندهای الکتریکی یک ابر به سه مرحله ایجاد و جدایش بارهای الکتریکی در مقیاس ذرات ابر و جدایش بارهای الکتریکی در مقیاس ابر به واسطه جریان‌های بالارو و پایین‌رو درون آن تقسیم می‌شود.

آغاز مطرح شدن سازوکار باردارشدن الکتریکی غیر القایی ذرات (که در آن میدان الکتریکی در این سازوکار نقشی ندارد) به کار آزمایشگاهی رینولدز و همکاران (۱۹۵۷) بر می‌گردد. آنها بار منتقل شده به گویچه برف در حال رشد را وقتی که بلورهای یخی از آن پس زده می‌شدند و بار مساوی و مخالف را از آن جدا می‌کردند، اندازه‌گیری کردند. به نحوی که باردار شدن منفی گویچه برف می‌تواند علت منطقه بار منفی در توفان‌های تندری باشد. تاکاهاشی (۱۹۷۸) و در بررسی دقیق‌تری جایاراتنه و همکاران (۱۹۸۳) نشان دادند که علامت بار گویچه‌های برف در حال رشد می‌تواند با پس‌زدن بلورهای یخی، مثبت یا منفی شود و این بستگی به دما و محتوای آب مایع ابر (LWC) دارد. تاکاهاشی (۱۹۷۸) مشاهده کرد که گویچه‌های برف برای هر مقدار محتوای آب مایع ابر در دماهای زیاد بار مثبت و در دماهای کمتر با مقدار متوسطی از محتوای آب مایع ابر بار منفی به دست می‌آورند. نتایج متفاوتی از کارهای آزمایشگاهی جایاراتنه و همکاران (۱۹۸۳)، سندرز و همکاران (۱۹۹۱)، بروکس و همکاران (۱۹۹۴)، سندرز و همکاران (۲۰۰۶) و امرسیک و سندرز (۲۰۱۰) حاصل شد. آنها عامل محتوای آب مایع ابر موثر (EW) را به منظور در نظر گرفتن کارایی برخورد و پس‌زنی معرفی کردند. لازم به ذکر است که چیدمان آزمایشگاهی آنها متفاوت از کار تاکاهاشی (۱۹۷۸) بود به طوری که بلورهای یخ امکان رشد تا حجم برابر قطرک‌های ابر را داشتند. در نتیجه تفاوت‌های زیادی در علامت بار گویچه‌های برف حاصل شد. بنابراین توزیع بار منفی (مثبت) در دماهای زیاد و EW کم (زیاد) به دست می‌آید. باتوجه به اینکه ذرات یخ در شرایط

استفاده شده است (پارک و دروگ میسر، ۱۹۹۷؛ قریلو و همکاران ۲۰۰۹ و ۱۳۹۳).

۳-۲ طرحواره‌های انتقال بار الکتریکی درون ابر
یکی از پایه‌های اساسی برای مدل‌سازی عددی ابر، پارامترسازی سازوکار باردار شدن آب شهاب‌هاست. یکی از این سازوکارها، سازوکار باردار شدن غیر القایی (non-inductive charging) نام دارد، که در اثر برخورد بین بلور یخ و گویچه برف ایجاد می‌شود. این سازوکار موضوع تحقیق بسیاری از بررسی‌های آزمایشگاهی شده است. به‌منظور کاربست این سازوکار در مدل‌های عددی، برخی پارامترسازی‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی پیشنهاد شده است. در این تحقیق عملکرد سه مجموعه روابط پارامترسازی برای شبیه‌سازی باردار شدن غیر القایی آب شهاب‌ها بررسی می‌شود. این سه مجموعه عبارت‌اند از: TAK، JGZ و SAN.

۱-۳-۲ روابط پارامتری TAK

تاکاهاشی (۱۹۷۸، ۱۹۸۴) میانگین بار انتقال یافته به گویچه برف در اثر برخورد با بلور یخ ($\delta\mu$) را به صورت تابعی از مقدار محتوی آب مایع ابر (LWC) و دما (T) پیشنهاد کرد (شکل ۱-الف). روابط ریاضی استفاده شده او عبارت‌اند از:

$$\delta\mu = f(LWC, T) \times \alpha, \quad \alpha = 5 \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^2 \frac{|v_1 - v_2|}{v_0} \quad (1)$$

که α ضریب تصحیح در شرایط آزمایشگاهی است و بین ۰ تا ۱۰ تغییر می‌کند. D_0 برابر ۱۰۰ میکرون و v_0 برابر ۸ متر بر ثانیه است. مقدار LWC ، برحسب گرم بر متر مکعب در هر تراز با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$LWC = \rho [q_c + q_r + q_i + q_s + q_g] \quad (2)$$

در رابطه (۲) ρ چگالی هوا است. در این پژوهش قطر گویچه برف (D_1) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$D_1 = v_1^{1/2} * \left(\frac{3C_D \rho}{4g \rho_g} \right)^{1/2} \quad (3)$$

که در آن، v_1 سرعت حد گویچه برف، ρ_g چگالی آن و

مختصری از مدل یک‌بعدی ابر، طرحواره‌های انتقال بار الکتریکی و شرایط آغازگری آذرخش در بخش ۳ بیان می‌شود. نتایج حاصل از متوسط انتقال بار و میدان الکتریکی درون ابر شبیه‌سازی شده برای گمانه‌زنی ایده‌آل با استفاده از هر سه مجموعه روابط پارامتری در بخش ۴ و در انتها جمع‌بندی نتایج در بخش ۵ عرضه می‌شود.

۲ توصیف مدل

۱-۲ مدل یک‌بعدی ابر

مدل ابر یک‌بعدی قائم (مدل صریح وابسته به زمان، Explicit Time-dependent Model (ETM) بر مبنای چن و سان (۲۰۰۲) نوشته شده است (قریلو، ۱۳۸۹). در این مدل، فرایندهای درون‌آمیختگی-برون‌آمیختگی و پخش پیچکی در نظر گرفته شده است. همچنین پارامترسازی خردفیزیک مورد استفاده در این مدل نیز براساس طرحواره خردفیزیک لین و همکاران (۱۹۸۳) و راتلج و هوس (۱۹۸۴) با برخی تغییرات (چن و سان، ۲۰۰۲) منظور شده است. همرفت نیز در این مدل با استفاده از یک پریشیدگی دمای پتانسیلی آغازگری می‌شود (چن و سان، ۲۰۰۴). خروجی‌های این مدل شامل سرعت قائم (w)، دمای پتانسیلی معادل یخ (θ_{ei})، نسبت‌های آمیختگی بخار آب (q_v)، آب ابر (q_c)، یخ ابر (q_i)، باران (q_r)، برف (q_s) و گویچه برف (q_g) است.

۲-۲ پیکر بندی مدل یک‌بعدی ابر و داده‌ها

در این تحقیق شبیه‌سازی ایده‌آل در راستای قائم و از سطح زمین تا ارتفاع ۱۵ کیلومتر با تفکیک ۲۵۰ متر (۶۱ تراز) صورت گرفت. گام زمانی برابر با ۱ ثانیه و طول زمان انتگرال‌گیری برابر با ۷۰ دقیقه است. در این اجرا مقدار شعاع ستون ابر ۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش داده‌های ورودی شامل دما، رطوبت نسبی و فشار محیط است که از یک گمانه‌زنی ایده‌آل استخراج شده است. از این نمایه همچنین در برخی پژوهش‌های دیگر نیز

یخ را به شکل تابعی از مقدار موثر محتوی آب مایع ابر (EW) و دما (T) نشان می‌دهند ($EW = 0.8 \times LWC$). این روابط در جدول ۱ نشان داده شده است.

معادله انتقال بار کل به گویچه برف در اثر برهم‌کنش با بلور یخ از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

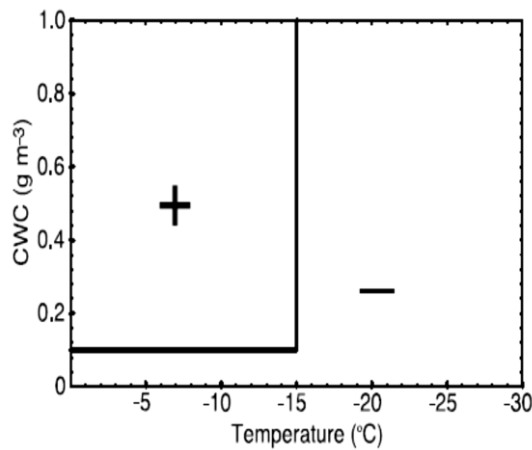
$$\Delta Q = F d^m v^n q \quad (5)$$

در این رابطه، d اندازه قطر گویچه برف (متر)، v سرعت نسبی گویچه برف به بلور یخ (متر بر ثانیه) است. مقادیر ثابت m ، n و F در جدول ۲ آمده است.

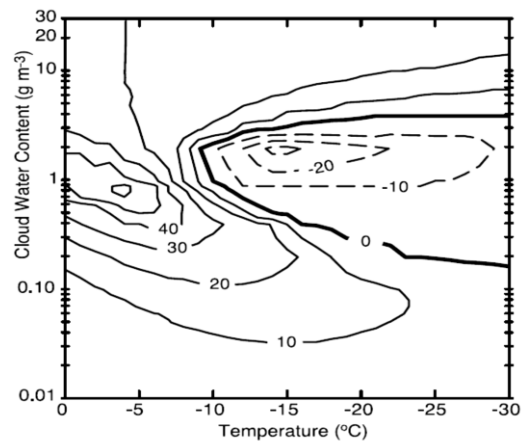
C_D ضریب کشال است که برابر 0.6 در نظر گرفته شده است. v_2 سرعت حد بلور یخ است که در این تحقیق از رابطه همیز فیلد و داتر (۱۹۹۰) محاسبه شد:

$$v_2 = 3.29 (\rho q_i)^{0.16} \quad (4)$$

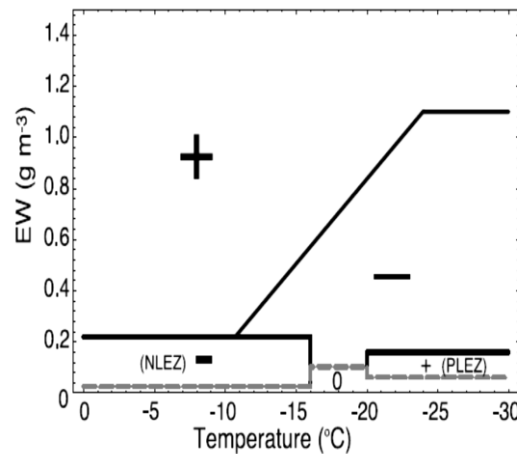
سنوا و میدزوا (۲۰۰۹) روابطی برای استفاده از نتایج آزمایشگاهی تاکاهاشی (۱۹۷۸، ۱۹۸۴) برای کاربرست در مدل‌سازی عددی عرضه کردند که در این تحقیق نیز از آنها استفاده شد. این روابط مقدار و علامت بار انتقال یافته در برخورد گویچه برف و بلور



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱. بار انتقال یافته به گویچه برف در اثر برخورد با ذرات یخ به شکل تابعی از دما و محتوی آب مایع ابر براساس روابط عرضه شده (الف) تاکاهاشی (۱۹۷۸) و (ب) گاردینر و همکاران (۱۹۸۵)، زیگلر و همکاران (۱۹۹۱) و جایاراتنه و همکاران (۱۹۸۳) و (ج) سندرز و همکاران (۱۹۹۱).

جدول ۱. شرایط مشخص شده برحسب دما و محتوی آب مایع موثر در محاسبه مقدار بار انتقال یافته به گویچه برف برای بارهای مثبت و منفی (برگرفته از سنوا و میدزوا، ۲۰۰۹).

دما (°C)	محتوی آب مایع موثر (g/m ³)	انتقال بار به گویچه برف (fC)
$T > -10$	$EW \leq 1/6$	$q = 146.981EW - 116.37EW^2 + 29.762EW^3 - 0.03T^3 \times EW - 2.581T - 0.209T^3 \times EW^3 + 0.356T^3 \times EW^2 + 0.15T^2 + 2.918T \times EW^3 - 4.215T \times EW - 8.5059$
$T > -10$	$EW > 1/6$	$q = 4.17952T - 0.00452T^2 \times EW^2 + 0.91617EW^2 - 1.33266T \times EW - 7.46539EW + 0.10968T \times EW^2 + 0.00057T^2 \times EW^3 - 0.03504EW^3 + 50.84454$
$T < -10$	$EW \leq 0/4$	$q = -3.3515T + 95.957T \times EW^2 + 511.8311T + 17.4482T^2 \times EW^3 - 0.0007T^3 + 20.5702T \times EW + 0.1656T^2 \times EW + 0.4954T^3 \times EW^3 - 0.0975T^3 \times EW^2 + 67.4565T \times EW^3 - 0.1066T^2 - 24.571$
$T < -10$	$0/4 < EW \leq 3/2$	$q = -1.5676T \times EW + 0.2484T \times EW^3 + 0.0112T^3 + 19.1993T + 0.8051T^2 + 5.97EW^3 - 83.3911EW + 15.3636EW^2 + 167.9278$
$T < -10$	$EW > 3/2$	$q = 4.212661T - 0.83119T \times EW + 0.067005T \times EW^2 + 0.004245T^2 \times EW + 40.96417$

جدول ۲. مقادیر ثابت‌های پیشنهاد شده برگرفته از سنوا و میدزوا (۲۰۰۹).

علامت بار	F	n	m	اندازه بلور برحسب میکرون
+	$6/1 \times 10^{12}$	۲/۵	۳/۷۶	کوچکتر از ۱۵۵
+	$5/0 \times 10^5$	۲/۵	۱/۹	بین ۱۵۵ و ۴۵۲
+	۶/۵	۲/۵	۰/۴۴	بزرگتر از ۴۵۲
-	$4/3 \times 10^7$	۲/۸	۲/۵۴	کوچکتر از ۲۵۳
-	۲/۰	۲/۸	۰/۵	بزرگتر از ۲۵۳

برهم کنش‌های بین بلورهای یخ و گویچه برف منجر به بردارشدن گویچه برف با بار مثبت می‌شود. همچنین تابع $f(\tau)$ طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود (گاردینر و همکاران ۱۹۸۵؛ زیگلر و همکاران ۱۹۹۱).

$$f(\tau) = -1.7 \times 10^{-5} \tau^3 - 0.003 \tau^2 - 0.05 \tau + 0.13 \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، $\tau = (-21/T_r)(T - 273.16)$ ، مقیاس دما است که زیگلر و همکاران (۱۹۹۱) به منظور متغیر در نظر گرفتن T_r از آن استفاده کردند. آنها در مدل‌سازی یک توفان تندی کوچک که در شهر نیومکزیکو رویداده بود دریافتند که با در نظر گرفتن $T_r = -21^\circ\text{C}$ در توزیع بار، بار منفی در بالای بار مثبت قرار می‌گیرد (دوقطبی منفی). در حالی که بطور معمول در اندازه‌گیری‌های مشاهداتی دوقطبی مثبت (بار

۲-۳-۲ روابط پارامتری JGZ

رابطه ریاضی مقدار بار انتقال یافته به گویچه برف در پارامترسازی JGZ به صورت رابطه (۶) است:

$$q = 7.3 D_1^4 (v_2 - v_1)^3 \delta L f(\tau) \quad (۶)$$

که در آن، δL به صورت تابع محتوی آب مایع ابر برحسب دمای بازگشتی و نسبت آمیختگی آب ابر چنین تعریف شده است:

$$\delta L = \begin{cases} CWC - CWC_{crit} & T > T_r \\ CWC & T < T_r \text{ and } q_c \geq 10^{-3} \text{ g/kg} \\ 0 & q_c < 10^{-3} \text{ g/kg} \end{cases} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، CWC محتوی آب ابر و $CWC_{crit} = 0/1 \text{ gm}^{-3}$ است. دمای بازگشتی دمایی است که در بالاتر از این دما

مایع ابر (EW) و دما (T) است ($EW=1.0 \times LWC$). این روابط در جدول ۳ آمده است.

بار انتقال یافته به گویچه برف از رابطه (۵) و با ثابت‌های فهرست شده در جدول ۴ به دست می‌آید. در پارامترسازی سندرز و همکاران (۱۹۹۱) با توجه به اینکه بزرگی سرعت حد گویچه برف از مقدار سرعت حد بلور یخ بسیار بیشتر است، سرعت نسبی گویچه برف به بلور یخ با سرعت گویچه برف تقریب زده می‌شود.

۲-۴ آغازگری آذرخش

پارامترسازی آذرخش بعد از باردار شدن گویچه‌های برف صورت می‌گیرد. در پارامترسازی آذرخش از مقادیر مشاهداتی میدان الکتریکی به منظور تعریف آستانه میدان الکتریکی (مارشال و همکاران، ۱۹۹۵) مورد نیاز برای شروع آذرخش استفاده می‌شود. در هر نقطه شبکه‌ای که مقدار بار الکتریکی از مقدار آستانه معرفی شده بیشتر شود آذرخش اتفاق می‌افتد.

مثبت بالای بار منفی) در توفان‌ها مشاهده شده است (مانسل و همکاران، ۲۰۰۵). فرض $T_f = -10^\circ\text{C}$ منجر به تولید دو قطبی مثبت در شبیه‌سازی توزیع بار می‌شود. این امر نشان می‌دهد که منطقه اصلی حاوی بارهای الکتریکی در لایه‌ای از -10 تا -20°C قرار دارد. البته زیگلر و مک گورمن (۱۹۹۴) با استفاده از مدل زیگلر و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادند که در توفان ابرتندری با در نظر گرفتن $T_f = -15^\circ\text{C}$ ساختار بار شبیه‌سازی شده به صورت دو قطبی مثبت است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر نیز همین مقدار لحاظ شده است.

۲-۳-۳ روابط پارامتری SAN

پارامترسازی مورد استفاده در محاسبه انتقال بار برای تولید بارهای مثبت و منفی براساس نتایج سندرز و همکاران (۱۹۹۱) در شکل ۱-ج نشان داده شده است. روابط پیشنهادی آنها به شکل تابعی از مقدار موثر محتوی آب

جدول ۳. شرایط مشخص شده برحسب دما و محتوی آب مایع موثر در محاسبه مقدار بار انتقال یافته به گویچه برف برای بارهای مثبت و منفی (برگرفته از سندرز و همکاران، ۱۹۹۱). مقدار بحرانی محتوی آب مایع ابر موثر با CEW نشان داده شده است.

وضعیت بار	دما ($^\circ\text{C}$)	محتوی آب مایع موثر (g/m^3)	انتقال بار به گویچه برف (fC)
بار منفی	$T > -15/99$	$0.026 < EW < 0.1369$	$q = (419.4 \times EW) + 7.9$
	$T > -15/99$	$0.14 < EW < 0.221$	$q = (419.4 \times EW) - 92.6$
	$-19/99 < T < -15/99$	$EW < CEW$	$q = 3.02 - (31.76 \times EW) + (26.53 \times EW^2)$
بار مثبت	$T < -19/99$	$0.06 < EW < 0.12$	$q = (2041.8 \times EW) - 128.7$
	$T < -19/99$	$0.12 < EW < 0.16$	$q = (-2900.2 \times EW) + 462.9$
	$-19/99 < T < -15/99$	$EW < CEW$	$q = (20.22 \times EW) - (1.36 \times (-T)) + 10.05$

جدول ۴. مقادیر ثابت‌های پیشنهاد شده سندرز و همکاران (۱۹۹۱).

اندازه بلور برحسب میکرون	m	n	F	علامت بار
کوچک‌تر از ۱۶۰	۳/۸	۲/۵	$4/9 \times 10^{13}$	+
بین ۱۵۰ و ۴۵۰	۱/۹	۲/۵	$4/0 \times 10^6$	+
بزرگ‌تر از ۴۵۰	۰/۴۴	۲/۵	۵۲/۸	+
کوچک‌تر از ۲۵۰	۲/۵	۲/۸	$5/2 \times 10^8$	-
بزرگ‌تر از ۲۵۰	۰/۵	۲/۸	۲۴	-

۳ تحلیل نتایج

در این بخش نتایج حاصل از کاربست سه دسته روابط پارامتری TAK، JGZ و SAN در شبیه‌سازی متوسط بار انتقال یافته به گویچه برف و میدان الکتریکی درون ابر عرضه می‌شود. با مقایسه سری زمانی میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده با مقادیر آستانه پیشنهاد شده مارشال و همکاران (۱۹۹۵) می‌توان زمان و شدت آذرخش‌های رخ داده در هر شبیه‌سازی را مشخص کرد. لازم به ذکر است که آذرخش زمانی رخ می‌دهد که قدر مطلق شدت میدان الکتریکی از مقدار آستانه بیشتر باشد.

۳-۱ بار انتقال یافته شبیه‌سازی شده توسط TAK، SAN و JGZ

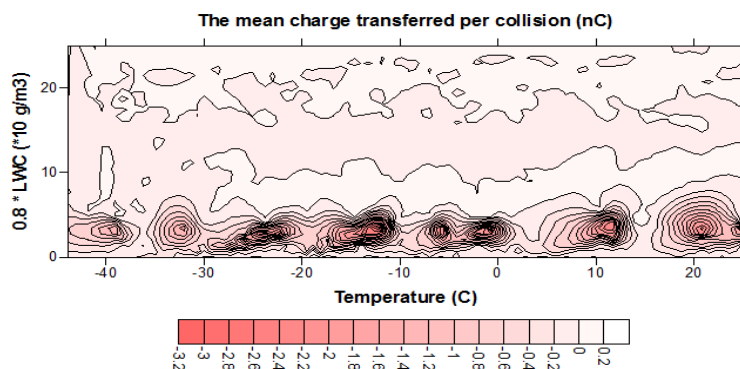
نتیجه متوسط بار انتقال یافته در اثر برخورد گویچه برف و بلور یخ حاصل از کاربست سه مجموعه روابط پارامتری (TAK، JGZ و SAN) برای شبیه‌سازی ایده آل ابر کومه‌ای به ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است.

شکل ۲ متوسط بار انتقال یافته را براساس روابط تاکاهاشی (۱۹۷۸، ۱۹۸۴) نشان می‌دهد. در این شکل توزیع بار منفی در مقادیر کم محتوی آب مایع ابر و بدون وابستگی دمایی مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که توزیع محتوی آب مایع ابر در این مورد تحقیقی تا ۳ گرم بر مترمکعب است. همچنین گستره دمایی شامل دماهای

مثبت و منفی است. قابل توجه است که تاکاهاشی (۱۹۷۸)، (۱۹۸۴) مقادیر بیشتر محتوی آب مایع ابر و فقط در گستره دمایی منفی را نتیجه گرفتند (شکل ۱-الف). شکل ۲ به وضوح نشان می‌دهد که توزیع بارهای منفی در مقادیر کم LWC و توزیع بارهای مثبت در مقادیر زیادی LWC مشاهده می‌شود. بیشینه بار مثبت و منفی شبیه‌سازی شده با کاربست مجموعه روابط پارامتری TAK به ترتیب $۰/۰۰۶$ و nC $۳/۲-$ است (جدول ۵).

در شکل ۳ متوسط بار انتقال یافته حاصل از کاربست روابط پارامتری JGZ نشان داده شده است. در این شکل نیز تراکم بارهای مثبت در مقادیر زیاد LWC و تراکم بارهای منفی در مقادیر کم LWC مشاهده می‌شود. این دسته روابط پارامتری مقدار بار را از $۰/۰۰۲-$ تا nC $۲/۰۴$ شبیه‌سازی کرد (جدول ۵).

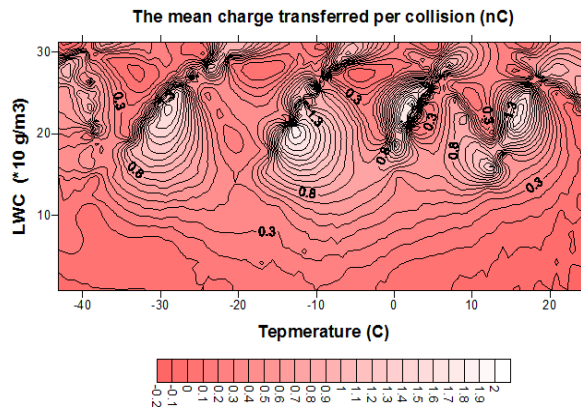
شکل ۴ متوسط بار انتقال یافته را برحسب دما و محتوی آب مایع ابر و با کاربست مجموعه روابط پارامتری SAN نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش محتوی آب مایع ابر، علامت بار تولید شده از مثبت به منفی تغییر می‌کند. در مقادیر کم محتوی آب مایع ابر توزیع بار انتقال یافته در دماهای منفی با نتایج سنדרز و همکاران (۱۹۹۱) همخوانی دارد. لازم به ذکر است که گستره مقادیر محتوی آب مایع ابر در مورد مطالعاتی این تحقیق تا $۱/۵$ گرم بر مترمکعب و توزیع دمایی شامل دماهای مثبت نیز هست.



شکل ۲. بار کل تولید شده (nC) در ابر کومه‌ای در شبیه‌سازی ایده آل به صورت تابعی از دما (°C) و محتوی آب مایع موثر درون ابر (g/m^3) با استفاده از روابط پارامتری تاکاهاشی (۱۹۷۸ و ۱۹۸۴). فاصله پربندی nC $۰/۲$ ، بیشینه مقدار بار مثبت nC $۰/۰۰۶$ و بیشینه مقدار بار منفی nC $۳/۲-$ است.

مثبت، درحالی‌که بزرگ‌ترین بار منفی با کاربری روابط پارامتری TAK تولید شده است. لازم به ذکر است که روابط پارامتری SAN توزیع متقارن‌تری برای بزرگی بارهای مثبت و منفی به دست می‌دهد. درحالی‌که با کاربری دو دسته روابط پارامتری TAK و JGZ بزرگی بار شبیه‌سازی شده به ترتیب متمایل به بارهای منفی و مثبت است.

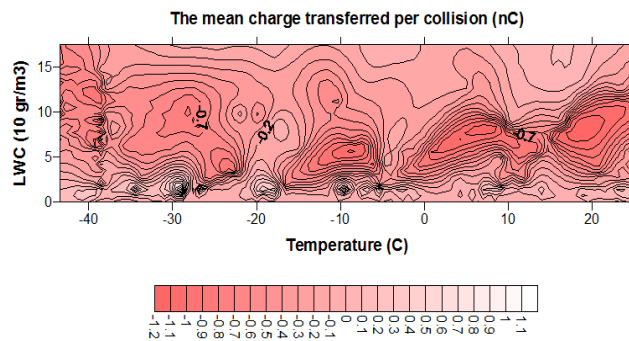
مقایسه شکل‌های ۲-۴ نشان می‌دهد که الگوی توزیع بار مثبت و منفی در مجموعه روابط TAK و JGZ با SAN متفاوت است. در دو مجموعه روابط پارامتری اول دوقطبی مثبت و در مورد سوم دوقطبی منفی تشکیل می‌شود. جدول ۵ نیز نشان می‌دهد که بزرگی بار مثبت و منفی شبیه‌سازی شده در هر دسته روابط پارامتری متفاوت است. کاربری روابط پارامتری JGZ بزرگ‌ترین بارهای



شکل ۳. بار کل تولید شده (nC) در ابر کومه‌ای در شبیه‌سازی ایده‌آل به صورت تابعی از دما (°C) و محتوی آب مایع درون ابر (g/m³) با استفاده از روابط جایزاتنه و همکاران (۱۹۸۳)، گاردینر و همکاران (۱۹۸۵) و زیگلر و همکاران (۱۹۹۱). فاصله پرنبدی ۰/۱ nC، بیشینه مقدار بار مثبت ۲/۰۴ nC و بیشینه مقدار بار منفی ۰/۰۲- nC است.

جدول ۵. بیشینه مقدار شبیه‌سازی شده بار مثبت و منفی حاصل از کاربری مجموعه روابط پارامتری TAK, JGZ, SAN و

شماره	دسته روابط پارامتری	بیشینه مقدار بار مثبت شبیه‌سازی شده (nC)	بیشینه مقدار بار منفی شبیه‌سازی شده (nC)
۱	TAK	۰/۰۰۶	-۳/۲
۲	JGZ	۲/۰۴	-۰/۰۰۲
۳	SAN	۱/۱۹	-۱/۱۵



شکل ۴. بار کل تولید شده (nC) در ابر کومه‌ای در شبیه‌سازی ایده‌آل به صورت تابعی از دما (°C) و محتوی آب مایع درون ابر (g/m³) با استفاده از روابط پارامتری سندرز و همکاران (۱۹۹۱). فاصله پرنبدی ۰/۱ nC، بیشینه مقدار بار مثبت ۱/۱۹ nC و بیشینه مقدار بار منفی ۱/۱۵- nC است.

۲-۳ میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده توسط TAK، SAN و JGZ

به منظور محاسبه میدان الکتریکی (\vec{E})، بار انتقالی شبیه‌سازی شده حاصل از کاربرد هر سه مجموعه روابط TAK، JGZ و SAN استفاده شد. سپس براساس پتانسیل الکتریکی (φ) و با استفاده از رابطه $\vec{E} = -\nabla\varphi$ میدان به دست آمد. لازم به ذکر است که φ با حل معادله پواسون ($\nabla^2\varphi = -\frac{\Delta Q}{\epsilon_0}$) و با استفاده از روش عددی تکرار جاکوبی به دست آمد که در آن مقدار ثابت دی‌الکتریک هوا و برابر با $10^{-12} \times 8.854$ فاراد بر متر است.

برای تعیین زمان، ارتفاع و شدت آذرخش میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده با مقدار آستانه پیشنهاد شده مارشال و همکاران (۱۹۹۵) برای میدان الکتریکی که با رابطه (۹) محاسبه می‌شود، مقایسه شد.

$$E(z) = \pm 167\rho(z), \quad \rho(z) = 1.208 \exp\left(-\frac{z}{8.4}\right) \quad (9)$$

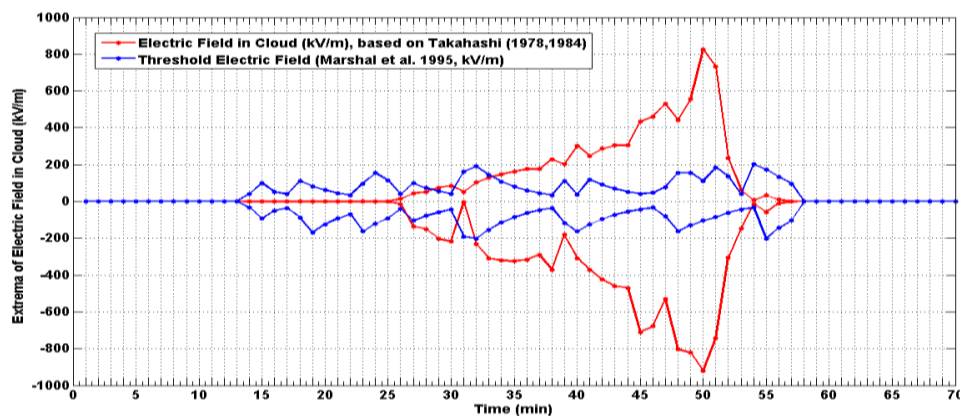
در رابطه (۹)، z ، ارتفاع برحسب کیلومتر و ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

نتایج حاصل از مقایسه دو میدان شبیه‌سازی شده و آستانه در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. قابل توجه است که میدان آستانه در ارتفاعی که میدان الکتریکی

شبیه‌سازی شده روی داده، محاسبه شده است. از این رو در شکل‌های ۵ تا ۷ برای میدان‌های مثبت و منفی نا متقارنی دیده می‌شود. زمان نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میدان الکتریکی در TAK بین دقیقه‌های ۲۵ تا ۵۶ (شکل ۵)، در JGZ بین دقیقه‌های ۱۹ تا ۳۴ (شکل ۶) و در SAN بین دقیقه‌های ۲۷ تا ۵۷ (شکل ۷) شکل گرفته است.

تعداد رویدادهای آذرخش و زمان وقوع آنها با کاربرد هر سه دسته روابط پارامتری در جدول ۶ فهرست شده است. از بین سه مجموعه روابط پارامتری، TAK بیشترین و JGZ کمترین رویداد آذرخش را شبیه‌سازی کرده است.

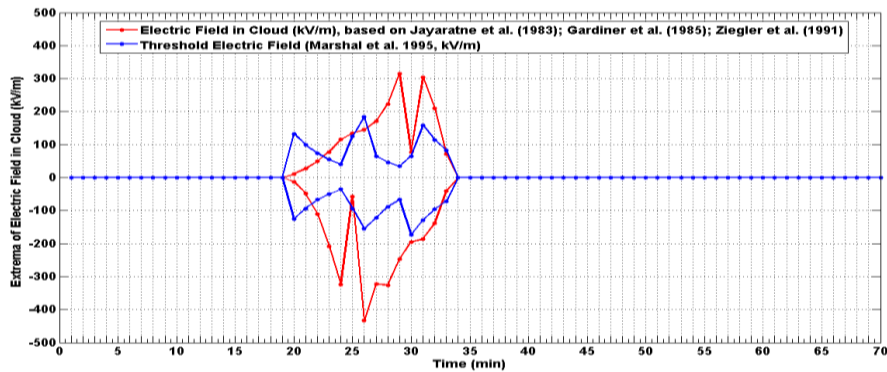
همچنین شدت، زمان و ارتفاع وقوع میدان الکتریکی مثبت و منفی شبیه‌سازی شده برای هر دسته روابط پارامتری در جدول ۷ داده شده است. بزرگ‌ترین مقدار میدان الکتریکی مثبت و منفی با کاربرد روابط پارامتری TAK و کمترین مقدار نیز به ترتیب از JGZ و SAN به دست آمد. مقایسه زمان و ارتفاع‌های وقوع بیشینه میدان الکتریکی مثبت و منفی شبیه‌سازی شده حاصل از هر سه طرحواره نشان داد که برای TAK و SAN این مقادیر نزدیک به هم است، در حالی که برای JGZ سه دقیقه اختلاف زمانی و ۱۲/۵ کیلومتر تفاوت ارتفاع مشاهده می‌شود.



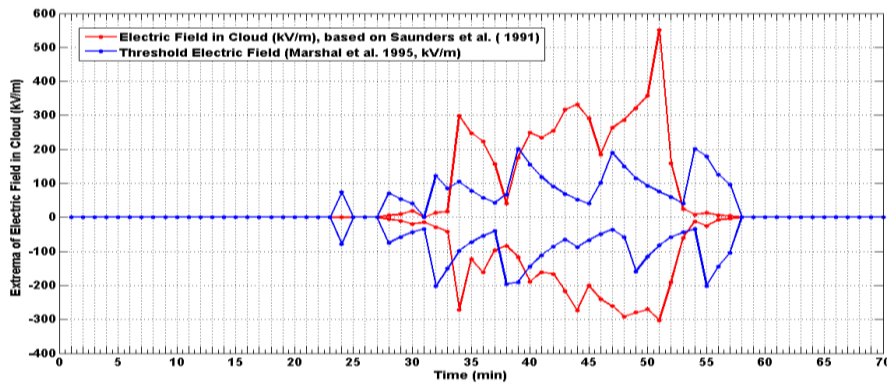
شکل ۵. سری زمانی میدان الکتریکی بار درون ابر در طی ۷۰ دقیقه شبیه‌سازی. خط‌های سرخ‌رنگ مقادیر بیشینه (میدان الکتریکی مثبت) و کمینه (میدان الکتریکی منفی) شبیه‌سازی شده براساس پارامتری تاکاهاشی (۱۹۷۸، ۱۹۸۴) و خط‌های آبی‌رنگ مقادیر آستانه لازم برای شکل‌گیری آذرخش معرفی شده مارشال و همکاران (۱۹۹۵) را نشان می‌دهد.

جدول ۶. زمان و تعداد رویداد آذرخش در هر سه طرحواره.

شماره	روابط پارامترسازی میدان بار الکتریکی	زمان رخداد آذرخش	تعداد رویداد آذرخش
۱	TAK	۰.۳۸، ۰.۳۷، ۰.۳۶، ۰.۳۵، ۰.۳۴، ۰.۳۱، ۰.۳۰، ۰.۲۹، ۰.۲۶، ۰.۲۵، ۰.۲۴، ۰.۲۳، ۰.۲۲، ۰.۲۱، ۰.۲۰، ۰.۱۹، ۰.۱۸، ۰.۱۷، ۰.۱۶، ۰.۱۵، ۰.۱۴، ۰.۳۹، ۰.۴۰، ۰.۴۱، ۰.۴۲، ۰.۴۳، ۰.۴۴، ۰.۴۵، ۰.۴۶، ۰.۴۸، ۰.۴۹، ۰.۵۰، ۰.۵۱، ۰.۵۲، ۰.۵۳، ۰.۵۴، ۰.۵۵، ۰.۵۶ و ۰.۵۷	۴۰
۲	JGZ	۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲ و ۳۳	۱۲
۳	SAN	۰.۲۴، ۰.۲۸، ۰.۲۹، ۰.۳۰، ۰.۳۱، ۰.۳۲، ۰.۳۳، ۰.۳۴، ۰.۳۵، ۰.۳۶، ۰.۳۷، ۰.۳۸، ۰.۳۹، ۰.۴۰، ۰.۴۱، ۰.۴۲، ۰.۴۳، ۰.۴۴، ۰.۴۵، ۰.۴۶، ۰.۴۷، ۰.۴۸، ۰.۴۹، ۰.۵۰، ۰.۵۱، ۰.۵۲، ۰.۵۴، ۰.۵۵، ۰.۵۶ و ۰.۵۷	۳۰



شکل ۶. مانند شکل ۵ فقط خط‌های سرخ‌رنگ مقادیر بیشینه (میدان الکتریکی مثبت) و کمینه (میدان الکتریکی منفی) شبیه‌سازی شده براساس روابط پارامتری جایاراتنه و همکاران (۱۹۸۳)، گاردینر و همکاران (۱۹۸۵) و زیگلر و همکاران (۱۹۹۱) را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مانند شکل ۵ فقط خط‌های سرخ‌رنگ مقادیر بیشینه (میدان الکتریکی مثبت) و کمینه (میدان الکتریکی منفی) شبیه‌سازی شده براساس روابط پارامتری سندرز و همکاران (۱۹۹۱) را نشان می‌دهد.

جدول ۷. شدت، زمان و ارتفاع وقوع میدان الکتریکی مثبت و منفی شبیه‌سازی شده برای هر دسته روابط پارامتری.

شماره	روابط پارامتر سازی میدان بار الکتریکی	بیشینه میدان الکتریکی مثبت شبیه‌سازی شده (kV/m)	ارتفاع وقوع بیشینه میدان الکتریکی مثبت (km)	زمان وقوع بیشینه میدان الکتریکی مثبت (دقیقه)	بیشینه میدان الکتریکی منفی شبیه‌سازی شده (kV/m)	ارتفاع وقوع بیشینه میدان الکتریکی منفی (km)	زمان وقوع بیشینه میدان الکتریکی منفی (دقیقه)
۱	TAK	+۸۲۵/۳۷	۵/۲۵	۵۰	-۹۲۱/۳۸	۵/۷۵	۵۰
۲	JGZ	+۳۱۵/۱۲	۱۵	۲۶	-۴۳۲/۴	۲/۵	۲۹
۳	SAN	+۵۵۰/۷۴	۸/۵	۵۱	-۳۰۳/۱۶	۷/۷۵	۵۱

۴ نتیجه گیری

در این تحقیق، ابتدا طرحواره‌های انتقال بار با کاربست سه مجموعه روابط پارامتری JGZ، TAK و SAN کُدنویسی و در مدل یک‌بعدی ابر پیاده‌سازی شد. متوسط بار الکتریکی انتقال یافته ناشی از برخورد گویچه برف با بلور یخ و همچنین میدان الکتریکی درون ابر حاصل از آن با استفاده از هر سه طرحواره انتقال بار برای یک نمونه گمانه‌زنی ایده‌آل شبیه‌سازی شد.

نتایج نشان داد که الگوی دوقطبی بار شبیه‌سازی شده با استفاده از طرحواره‌های انتقال بار TAK و JGZ به صورت دوقطبی مثبت و برای SAN به صورت دوقطبی منفی شکل می‌گیرد. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها روشن ساخت که زمان شروع، خاتمه و دوره زمانی شکل‌گیری میدان الکتریکی در هر طرحواره منحصر به فرد است. در این میان، میدان الکتریکی درون ابر شبیه‌سازی شده با استفاده از TAK بین دقیقه‌های ۲۵ تا ۵۶، JGZ بین دقیقه‌های ۱۹ تا ۳۴ و SAN بین دقیقه‌های ۲۷ تا ۵۷ شکل گرفته است. در ادامه، زمان و ارتفاع‌های وقوع بیشینه میدان الکتریکی مثبت و منفی شبیه‌سازی شده حاصل از هر سه طرحواره مقایسه شد. نتایج نشان داد که این مقادیر برای TAK و SAN نزدیک به هم است، در حالی که برای JGZ سه دقیقه اختلاف زمانی و ۱۲/۵ کیلومتر تفاوت ارتفاع به دست آمد. در نهایت تعداد رویدادهای آذرخش شبیه‌سازی شده با استفاده از هر سه طرحواره از راه مقایسه بین شدت میدان الکتریکی شبیه‌سازی شده درون ابر و میدان الکتریکی آستانه (مارشال و همکاران، ۱۹۹۵) به دست آمد. از بین سه مجموعه روابط پارامتری، TAK بیشترین و JGZ کمترین رویداد آذرخش را شبیه‌سازی کرده است.

مراجع

- قرایلو، م.، پگاه‌فر، ن. و بیدختی، ع. ع.، ۱۳۹۳، مدل‌سازی انتقال بار الکتریکی درون ابر (صاعقه) و پیاده‌سازی آن در یک مدل پیش‌یابی یک‌بعدی ابر قائم، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۰(۱)، ۱۳۷-۱۴۸.
- Brooks, I. M. and Saunders, C. P. R., 1994, An experimental investigation of the inductive mechanism of thunderstorm electrification, *J. Geophys. Res.: Atmospheres* (1984–2012), **99**(D5), 10627-10632.
- Chen, S. H. and Sun, W. Y., 2002, A one-dimensional time dependent cloud model, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 99-118.
- Chen, S. H. and Sun, W. Y., 2004, An explicit one-dimensional time-dependent tilting cloud model, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 2797-2816.
- Emersic, C. and Saunders, C.P.R., 2010, Further laboratory investigations into the relative diffusional growth rate theory of thunderstorm electrification, *Atmos. Res.*, **98**, 327-340, doi: 10.1016/j.atmosres.2010.07.011.
- Gardiner, B., Lamb, D., Pitter, R. L., Hallett, J. and Saunders, C. P. R., 1985, Measurements of initial potential gradient and particle charges in a Montana summer thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6079-6086.
- Gharaylou, M., Zawar-Reza, P. and Farahani, M. M., 2009, A one-dimensional explicit time-dependent cloud model (ETM): description and validation with a three-dimensional cloud resolving model, *Atmos. Res.*, **92**(4), 394-401.
- Heysfield, A. J. and Donner, L. J., 1990, A scheme for parameterizing ice-cloud water content in general circulation models, *J. Atmos. Sci.*, **47**(15), 1865-1877.
- Jayarathne, E., Saunders, C. P. R. and Hallett, J., 1983, Laboratory studies of the charging of soft hail during ice crystal interactions, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **109**, 609-630.
- Lin, Y. L., Farley, R. D. and Orville, H. D., 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model, *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Mansell, E. R., MacGorman, D. R., Ziegler, C. L. and Straka, J. M., 2005, Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, **110**, doi: 10.1029/2004JD005287.
- Marshall, T. C., McCarthy, M. P. and Rust, W. D., 1995, Electric field magnitudes and lightning initiation in thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, **100**, 7097-7103.
- Park, S. K. and Droegemeier, K. K., 1997, Validity of the tangent linear approximation in a moist

قرایلو، م.، ۱۳۸۹، پارامتره‌سازی همرفت کومه‌ای با استفاده از یک مدل ابر یک‌بعدی کج وابسته به زمان و پیاده‌سازی آن در یک مدل میان‌مقیاس، موسسه

- Avila, E. E. and Castellano, N. E., 2006, Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2653-2673.
- Takahashi, T., 1978, Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Takahashi, T., 1984, Thunderstorm electrification – A numerical study, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 777-1794.
- Tsenova, B. D., Mitzeva, R. P., 2009, New parameterization of non-inductive charge transfer based on previous laboratory experiments, *Atmos. Res.*, **91**(1), 79-86.
- Ziegler, C. L., MacGorman, D. R., Dye, J. E., and Ray, P. S., 1991, A model evaluation of non-inductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, **96**(D7), 12833-12855.
- Ziegler, C. L. and MacGorman, D. R., 1994, Observed lightning morphology relative to modeled space charge and electric field distributions in a tornadic storm, *J. Atmos. Sci.*, **51**, 833-851.
- convective cloud model, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3320-3340.
- Pereyra, R. G., Avila, E. E., 2002, Charge transfer measurements during single ice crystal collisions with a target growing by rimming, *J. Geophys. Res.*, **107**(D23), AAC-23.
- Reynolds, S. E., Brook, M. and Gourley, M. F., 1957, Thunderstorm charge separation, *J. Meteorol.*, **14**(5), 426-436.
- Rutledge, S. A. and Hobbs, P. V., 1984, The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. Part XII: a diagnostic modeling study of precipitation development in narrow, cold-frontal rainbands, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2949-2972.
- Saunders, C. P. R., Keith, W. D. and Mitzeva, R. P., 1991, The effect of liquid water on thunderstorm charging, *J. Geophys. Res.*, **96**, 11007-11017.
- Saunders, C. P. R. and Peck, S. L., 1998, Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions, *J. Geophys. Res.*, **103**, 13949-13956.
- Saunders, C. P. R., Bax-Norman, H., Emersic, C.,