

بررسی تغییرات میدان Sq سال ۱۹۹۷ در قطاع امریکای شمالی با استفاده از تحلیل هماهنگ‌های کروی

اسداله جوع عطا بیرمی*

استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

(دریافت: ۹۱/۲/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

در این تحقیق تغییرات روزهای آرام خورشیدی امریکای شمالی در سال ۱۹۹۷ در حکم سال آرام مغناطیسی با استفاده از تحلیل هماهنگ‌های کروی بررسی شده است. پنج روز از آرام‌ترین روزهای هر ماه با شاخص مغناطیسی $Kp \leq 2_+$ و $Ap \leq 10$ به منزله روزهای آرام هر ماه انتخاب شده‌اند. تغییر منظمی در طرح تغییرات روزانه با عرض ژئومغناطیسی دیده می‌شود. تغییرات X در عرض‌های بالا تا عرض‌های میانه، طرح مشابهی دارد و از عرض‌های میانه به سمت عرض‌های پایین‌تر تغییر فاز می‌دهد. ولی مؤلفه‌های Z, Y طرح یکسانی را در عرض‌های مختلف نشان می‌دهند. نقش مؤلفه Z تغییرات آرام، زاویه سمت‌رأسی خورشیدی و فاکتور چپمن به دست آمده است. تحلیل فوریه موید غالب بودن مؤلفه‌های طیفی ۲۴، ۱۲، ۸ و ۶ ساعته است. مؤلفه‌های داخلی و خارجی Z در جهت مخالف یکدیگر هستند که علت آن در جهت مخالف بودن جریان‌های داخلی و خارجی است ولی مؤلفه‌های داخلی و خارجی X و Y تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند. دامنه تغییرات مؤلفه‌های داخلی از مؤلفه‌های خارجی نیز کمتر به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل هماهنگ‌های کروی، روزهای آرام مغناطیسی، شاخص مغناطیسی، فاکتور چپمن

Investigation of North American sector Sq -field in year 1997 using spherical harmonic analysis

Joata Bayrami, A.

Assistant Professor, Geophysics Department, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

(Received: 01 May 2012, Accepted: 14 May 2013)

Summary

The daily record of geomagnetic variations at any world location typically shows a multitude of irregular changes in the field that represent the superposition of many spectral components whose amplitudes generally increase with increasing period. It has been a long established fact that variations in ground magnetic records are caused by the dynamo action in the upper atmosphere. These daily variations in the geomagnetic fields at the earth's surface during geomagnetically quiet conditions are known to be associated with the dynamo currents which are driven by winds and thermal tidal motions in the E-region of the ionosphere.

Unique current sources in the upper atmosphere and magnetosphere have been identified as origins of many of these spectral field variations. On occasion there are days when the magnetic records smoothly change with primarily 24-, 12-, 8-, and 6-hour period spectral components dominating the field composition and few of the irregularly

appearing, shorter or longer period changes are present. On these days, the oscillations of three orthogonal field components produce records that are predictably similar to others recorded many days earlier or later and follow a pattern of gradual change through the seasons of the year. Such records describe the quiet daily geomagnetic variations. When the small but persistent effects ascribed to the lunar-tidal current system have been removed, the changes are called Sq for solar quiet fields, referring to their local-time changes when solar-terrestrial disturbances are absent.

Solar activity, identified with the sunspot number, controls the percentage of magnetically quiet days in a year as an inverse relationship. The quietest geomagnetic levels usually occur on, or a year after, the minimum in sunspot number. Because of the 10.6-year cycle in solar activity, a similar cycle of geomagnetically quiet years occurs.

The quasilogarithmic Kp is a convenient three-hour index for selecting the quiet conditions; its linear counterpart is the Ap index. Some authors prefer to select quiet days by a limiting value of the day's Ap (e.g., $Ap = 10$). Others take a fixed number (e.g., five) of the quietest days (judged by the day's Ap) for a given month, whatever the values may be.

The 19 North American observatories are selected in this study. There are 60 days in 1997 in which the global geomagnetic disturbance index, Kp , have all 8 daily values less than 2+. These days are taken as preliminary "quiet day" recordings. All observatories have 60-min sample records. The original recordings of field are in Universal Time (UT) as orthogonal north, east, and into-the-earth components of field as X , Y , and Z . The data for each component are Fourier analyzed for each quiet day.

A systematic change in pattern of the daily variation with change in latitude is clearly evident. The large amplitude of X occurs at all observatories near the geomagnetic dip equator because of existence of the equatorial electrojet. The relation between the Chapman factor $(\cos\chi)^{0.5}$ and Sq (Z) is investigated and concluded that the Sq (Z), corresponds in onset and subsidence with Chapman-factor change.

It has been concluded that the maximum amplitudes of magnetic potential occur near the midlatitudes which are the locations of the external current foci. The internal Z is in the opposite direction to that of the external Z . The external and internal currents must be oppositely directed to obtain the similar pattern of X and Y but opposite pattern of Z . It seems that all three internal variation amplitudes are less than the corresponding external amplitudes.

Keywords: Chapman factor, Magnetic index, Quiet daily geomagnetic variations, Spherical harmonic analysis

۱ مقدمه

آشکار می‌سازند. در این روزها، نوسان‌های سه مؤلفه متعامد میدان، ثبت‌هایی را ایجاد می‌کنند که مشابه ثبت‌های بسیاری از روزهای پیشین است. چنین ثبت‌هایی را «تغییرات آرام روزانه Quiet Daily Geomagnetic Field» (Variations) و با حذف اثرات نیروهای کشندی ماه، تغییرات آرام روزانه‌ی خورشیدی Sq (Variations) می‌نامند. در حقیقت نمایش Sq در یک رصدخانه، مقادیر میانگین میدان در روزهای آرام است

ثبت‌های روزانه تغییرات ژئومغناطیسی در هر نقطه از دنیا، مجموعه‌ای از تغییرات نامنظم از میدان را نشان می‌دهند که در حقیقت جمع مؤلفه‌های طیفی متنوعی هستند که معمولاً دامنه آنها با افزایش دوره، افزایش می‌یابد. چشمه‌های جریان در جو فوقانی و مغناطیس سپهر به منزله منشأ بسیاری از این تغییرات طیفی میدان شناخته شده‌اند. روزهایی وجود دارد که در آنها ثبت‌های مغناطیسی، تغییرات همواری از مؤلفه‌های طیفی با دوره‌های ۲۴، ۱۲، ۸ و ۶ ساعته توأم با نامنظمی‌های کوچکی را

(کمپیل، ۱۹۸۹).

مؤلفه عمودی Z به روشنی مؤلفه‌های افقی X و Y نیست ولی روند عمومی آن داشتن یک کمینه با بزرگ‌ترین دامنه در نزدیکی ظهر عرض‌های میانی نیمکره شمالی و بیشینه مشابه در نیمکره جنوبی است. باید متذکر شد که Z مثبت در ارتباط با میدان فرسو و Z منفی در ارتباط با میدان فراسو است. چون در نیمکره جنوبی Z منفی است از این رو در هر دو نیمکره، Z یک کمینه در ظهر دارد. در نیمه شب همه مؤلفه‌ها در همه عرض‌ها، هموار هستند و طرح کلی تغییرات روزانه یک تقارن تقریبی را حول استوا و نصف‌النهار ظهر نشان می‌دهد (پارکینسون، ۱۹۸۳).

۳ انتخاب داده‌ها

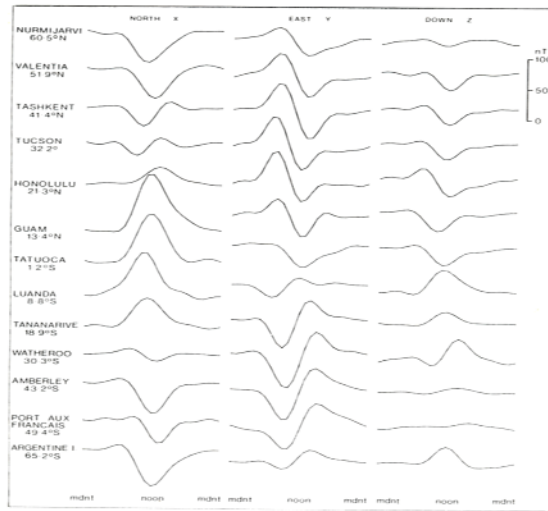
شکل ۲ تعداد لکه‌های خورشیدی در سال‌های گوناگون را نشان می‌دهد. با توجه به شکل معلوم است که در سال ۱۹۹۷ تعداد لکه‌های خورشیدی نسبت به سال‌های دیگر کمتر است. یعنی سالی با فعالیت‌های مغناطیسی کم است که انتخاب داده‌های این سال به منزله سال آرام را توجیه پذیر می‌کند.

شاخص‌های مغناطیسی Kp و Ap در حکم معیار انتخاب روز آرام برگزیده شده‌اند. پنج روز از آرام‌ترین روزهای هر ماه که شاخص $Kp \leq 2+$ و $Ap \leq 10$ باشد در حکم روزهای آرام هر ماه انتخاب شده‌اند. از میان رصدخانه‌های مغناطیسی موجود در امریکای شمالی، آنهایی که داده‌های سال ۱۹۹۷ را به صورت کامل داشته‌اند، انتخاب شده‌اند که اسامی، کُد شناسایی، مختصات جغرافیایی و مختصات مغناطیسی آنها در جدول ۱ و موقعیت آنها روی زمین در شکل ۳ آمده است. رصدخانه هرمانوس برای مقایسه تغییرات میدان sq در نیمکره‌های شمالی و جنوبی آورده شده است. رصدخانه هوانکایو نیز تقریباً در استوای مغناطیسی قرار دارد و در حکم معیاری از الکتروجت استوایی (equatorial electrojet) است.

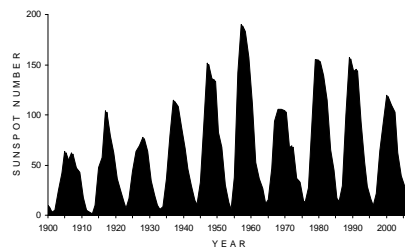
تعداد روزهای آرام مغناطیسی در سال به فعالیت خورشیدی وابسته است به این صورت که تعداد روزهای آرام در سال با کاهش مقدار میانگین سالانه تعداد لکه‌های خورشیدی افزایش می‌یابد. بیشترین فعالیت ژئومغناطیسی معمولاً تابع بیشینه تعداد لکه‌های خورشیدی از دو تا سه سال است؛ آرام‌ترین سطح فعالیت‌های ژئومغناطیسی نیز در زمان کمترین تعداد لکه‌های خورشیدی یا یک سال بعد از آن است. درصد سالانه شاخص‌های Kp پایین‌تر از یک سطح، بیانگر فراوانی روزهای آرام در سال‌های با کمینه لکه‌های خورشیدی است (کمپیل ۱۹۸۹).

۲ شکل عمومی تغییرات روزانه

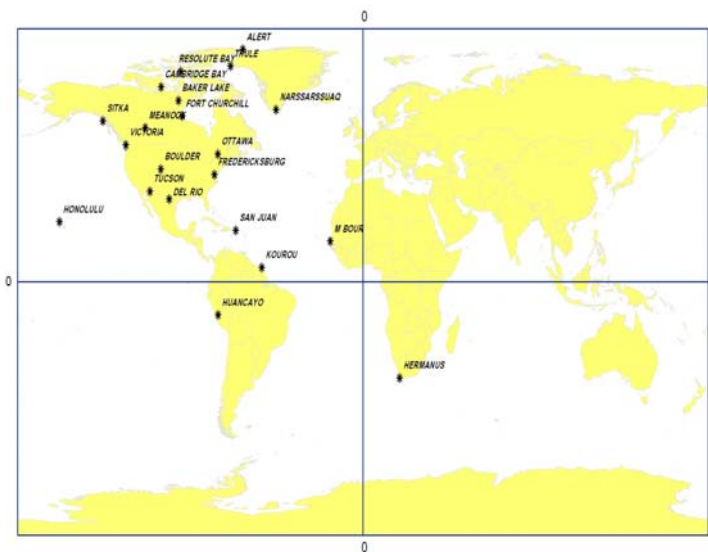
اگر مغناطیس‌نگارهای یک روز آرام در دو رصدخانه در یک عرض جغرافیایی ولی با طول‌های جغرافیایی متفاوت مورد مقایسه قرار گیرند، شباهت بسیار زیادی بین آن دو دیده می‌شود ولی فاز آنها به اندازه اختلاف زمانی برحسب زاویه تفاوت دارد. بنابراین در اولین تقریب می‌توان گفت که تغییرات آرام روزانه، تابعی از عرض جغرافیایی و زمان محلی است. شکل ۱ میانگین تغییرات آرام روزانه در رصدخانه‌های با عرض‌های متفاوت را نشان می‌دهد. شکل عمومی تغییرات آرام روزانه از منحنی‌های رسم شده کاملاً معلوم است. مؤلفه شمال سو X در عرض‌های پایین یک بیشینه در نزدیکی نیمروز دارد و در طول شب تقریباً ثابت است. با افزایش عرض در هر دو نیمکره، بیشینه روزانه کاهش می‌یابد تا اینکه در حدود 35° به صورت یک موج دوگانه در می‌آید. مؤلفه شرق سو Y در نزدیکی استوا تغییرات کمی دارد. در نیمکره شمالی، مؤلفه شرق سو Y با یک بیشینه صبحگاهی (یعنی میدان شرق سو) و یک کمینه عصرگاهی که در عرض‌های بیشتر، دامنه آنها افزایش می‌یابد، مشخص می‌شود. در نیمکره جنوبی، فاز معکوس می‌شود یعنی یک کمینه صبحگاهی و یک بیشینه عصرگاهی دارد. منحنی‌های



شکل ۱. منحنی تغییرات روزانه به صورت تابعی از زمان محلی برای رصدخانه‌های با عرض‌های جغرافیایی متفاوت. مؤلفه شمال سو X در هر دو نیمکره جهت یکسانی دارد ولی مؤلفه‌های Z و Y در دو نیمکره، در جهت مخالف هستند. مقیاس تغییرات در سمت شکل مشخص است (پارکینسون، ۱۹۸۳).



شکل ۲. تعداد لکه‌های خورشیدی در سال‌های گوناگون. سال ۱۹۹۷ یکی از سال‌هایی است که فعالیت‌های خورشیدی در آن بسیار کم بوده و به منزله سال آرام شناخته شده است.



شکل ۳. موقعیت جغرافیایی رصدخانه‌های مغناطیسی آمریکای شمالی فعال در سال ۱۹۹۷.

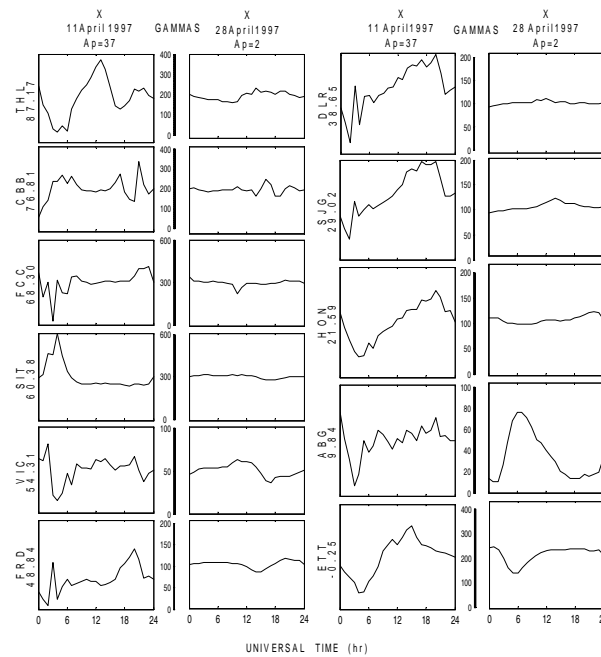
جدول ۱. رصدخانه‌های مغناطیسی امریکای شمالی فعال در سال ۱۹۹۷ و مختصات جغرافیایی و مغناطیسی آنها.

کُد	نام رصدخانه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عرض مغناطیسی	طول مغناطیسی
THL	THULE	76.53	-68.89	87.17	13.00
ALE	ALERT	82.5	-62.5	86.51	160.10
RES	RESOLUTE BAY	74.7	-94.9	83.11	299.60
CBB	CAMBRIDGE BAY	69.2	-105	76.81	301.1
BLC	BAKER LAKE	64.33	-96.03	73.51	320.90
NAQ	NARSSARSSUAQ	61.1	-45.2	70.15	39.3
FCC	FORT CHURCHILL	58.77	-94.1	68.3	327.6
MEA	MEANOOK	54.62	-113.33	61.81	305.4
SIT	SITKA	57.05	-135.33	60.38	279.40
OTT	OTTAWA	45.4	-75.55	56.06	355.1
VIC	VICTORIA	48.52	-123.42	54.31	296.9
FRD	FREDERICKSBURG	38.21	-77.37	48.84	353.1
BOU	BOULDER	40.14	-105.24	48.73	320.1
TUC	TUCSON	32.25	-110.83	40.24	315.6
DLR	DEL RIO	29.49	-100.92	38.65	327.00
SJG	SAN JUAN	18.38	-66.12	29.02	6
HON	HONOLULU	21.32	-158.06	21.59	269.40
MBO	M BOUR	14.39	-16.96	20.37	57.50
HUA	HUANCAYO	-12.05	-75.34	-1.55	355.80

۴ ویژگی‌های کلی روزهای آرام سال ۱۹۹۷

پس از تعیین اندیس‌های مغناطیسی برای روزهای سال ۱۹۹۷ و مشخص کردن روزهای آرام، مؤلفه‌های Z, Y, X (یا Z, D, H) ساعتی پنج روز آرام هرماه مربوط به ۱۹ رصدخانه انتخاب، همه به زمان جهانی تبدیل شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. تعداد روزهای آرام ۶۰ روز انتخاب شده است. چنانچه داده‌های مربوط به یک روز آرام در چند رصدخانه ثبت نشده باشد، آن روز از فهرست روزهای آرام حذف و روزی با کمترین ضریب جایگزین آن می‌شود.

شکل ۴ مؤلفه شمال‌سوی X یک روز آشفته (۱۱ آوریل ۱۹۹۷) با شاخص $Ap = 37$ و یک روز آرام (۲۸ آوریل ۱۹۹۷) با شاخص $Ap = 2$ برای چند رصدخانه مغناطیسی موجود در عرض‌های گوناگون (از استوا تا قطب) را مورد مقایسه قرار داده است. مقیاس تغییرات برحسب گاما و زمان برحسب زمان جهانی در شکل مشخص است. افت و خیزها و نوسان‌های موجود در روزهای آشفته به‌وضوح مشاهده می‌شود، در صورتی‌که روزهای آرام به‌صورت هموار و نرم هستند و نوسان‌های کمتری آشکار می‌سازند.

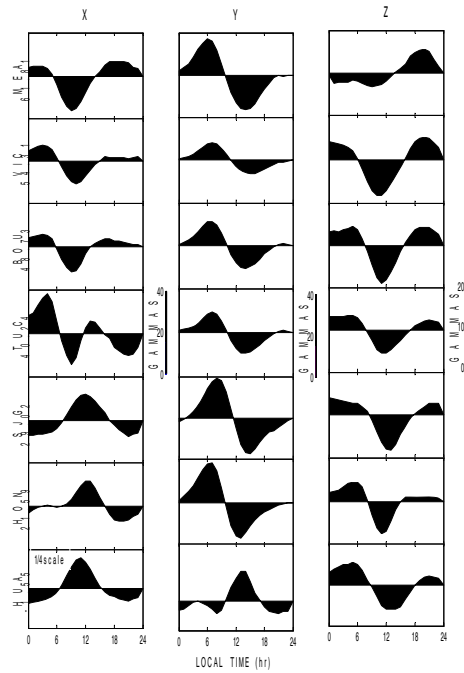


شکل ۴. تغییرات مغناطیسی روزانه مؤلفه X در ۱۱ رصدخانه در امریکای شمالی با موقعیت‌هایی از قطب تا استوا. کُد و عرض مغناطیسی هر ایستگاه در سمت چپ ثبت‌ها نوشته شده است. تغییرات در خلال یک روز آرام ($Ap=2$) و یک روز آشفته ($Ap=37$) برای همه ایستگاه‌ها و مقیاس دامنه‌ها آورده شده است. افت و خیزها و نوسان‌های موجود در روزهای آشفته به‌وضوح مشاهده می‌شود؛ در صورتی‌که روزهای آرام به‌صورت هموار و نرم هستند و نوسان‌های کمتری آشکار می‌سازند.

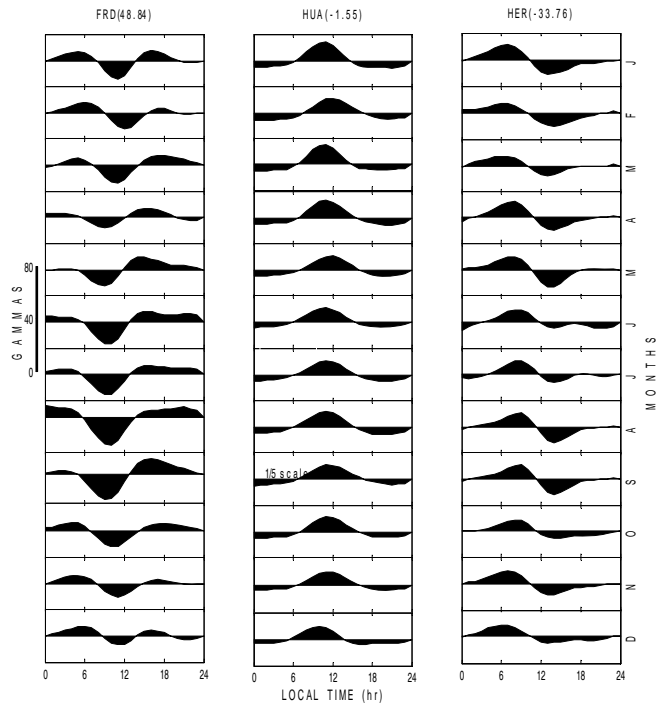
مشابه اما در دو نیمکره مخالف (فردریکزبورگ در نیمکره شمالی و هرمانوس در نیمکره جنوبی) و برای یک رصدخانه در نزدیکی استوای مغناطیسی (هوانکایو) نشان می‌دهند. مؤلفه H در هر دو رصدخانه موجود در نیمکره‌های شمالی و جنوبی به‌جز چند بی‌نظمی کوچک، تغییرات مشابهی را نشان می‌دهد. مؤلفه D در دو رصدخانه تغییراتی با فاز مخالف دارند. مؤلفه Z نیز تغییرات هم‌فازی را نشان می‌دهد ولی به‌نظر می‌رسد که شدت تغییرات در رصدخانه هرمانوس بیشتر باشد. یک افزایش سالانه دامنه در خلال ماه‌های تابستان و یک تغییر فاز از بیشینه (اولی در تابستان، بعدی در زمستان) برای دو ایستگاه با عرض متوسط دیده می‌شود. ایستگاه استوایی دارای افزایش دامنه نیم‌سالانه و اعتدالی است. تغییرات سالانه و نیم‌سالانه، شاخصی از وابستگی سامانه Sq به زاویه سمت‌رأسی خورشید (Solar Zenith Angle) و موقعیت جغرافیایی است.

شکل ۵ تغییرات میدان آرام برای هفت رصدخانه را نشان می‌دهد که میانگین شاخص Kp آنها در آوریل ۱۹۹۷ کمتر یا معادل ۲ ($Kp \leq 2+$) است. تغییر منظم در طرح تغییرات روزانه با عرض ژئومغناطیسی کاملاً روشن است. تغییرات X در عرض‌های بالا تا عرض‌های میانه طرح مشابهی دارد و از عرض‌های میانه به سمت عرض‌های پایین‌تر، تغییر فاز می‌دهد. ولی مؤلفه‌های Z, Y طرح یکسانی را در عرض‌های گوناگون نشان می‌دهند. دامنه بزرگ X (با مقیاس ۱ نشان داده شده است) در هوانکایو (در همه رصدخانه‌های نزدیک استوای ژئومغناطیسی) به علت وجود الکتروجت استوایی است.

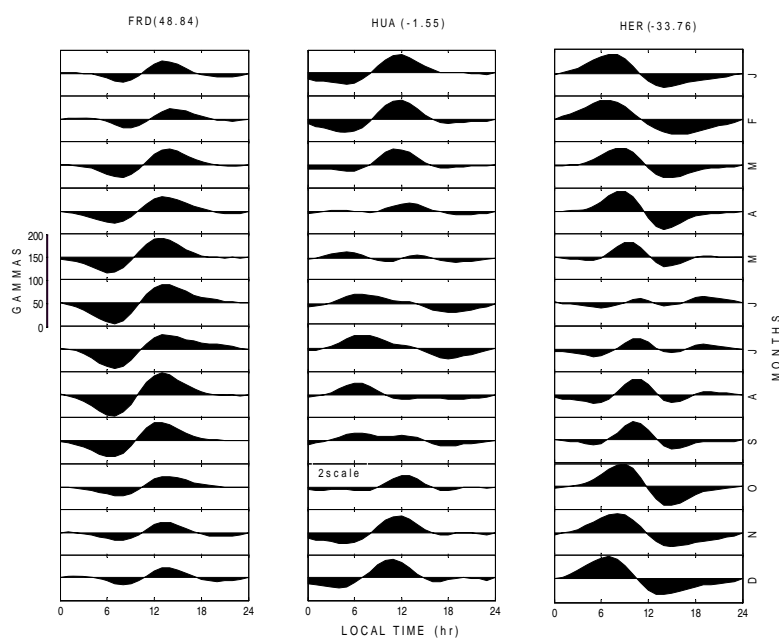
تغییرات روزهای آرام حول یک میانگین روزانه مشخص، تغییرات کمی در دامنه و فاز در خلال ماه‌های سال دارد. شکل‌های ۶-الف تا ۶-پ این تغییر در مؤلفه‌های Z, D, H را برای دو رصدخانه با عرض‌های ژئومغناطیسی



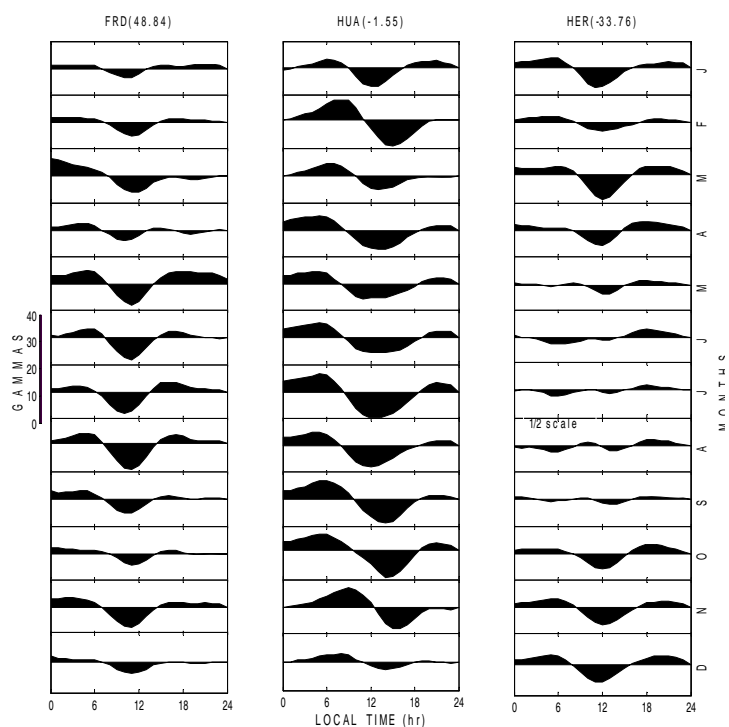
شکل ۵. تغییرات میدان آرام برای ۷ رصدخانه که میانگین شاخص Kp آنها در آوریل ۱۹۹۷ کمتر یا معادل ۲ ($Kp \leq 2+$) است. تغییرات X در عرض‌های بالا تا عرض‌های میانه طرح مشابهی دارد و از عرض‌های میانه به سمت عرض‌های پایین‌تر تغییر فاز می‌دهد ولی مؤلفه‌های Z, Y طرح یکسانی را در عرض‌های گوناگون نشان می‌دهند. X در هوانکیاو با مقیاس ۱ نشان داده شده است.



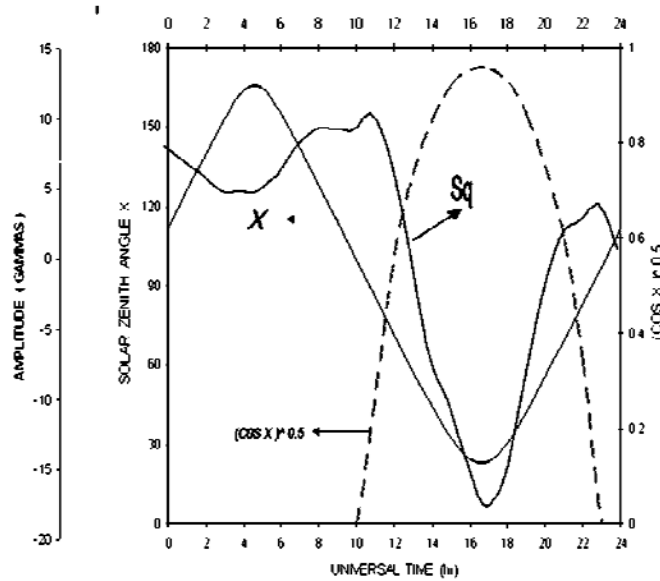
شکل ۶-الف. تغییرات ماه‌به‌ماه در مؤلفه‌ی H میدان روزهای آرام برای دو رصدخانه در عرض‌های تقریباً مشابه ولی در نیمکره‌های مخالف (فردریکسبورگ در نیمکره شمالی و هرمانوس در نیمکره جنوبی) و هوانکیاو (نزدیک استوای مغناطیسی). H در هوانکیاو با مقیاس ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-ب. تغییرات ماه به ماه در مؤلفه D میدان روزهای آرام برای دو رصدخانه در عرض‌های تقریباً مشابه ولی در نیمکره‌های مخالف (فردریکزبورگ در نیمکره شمالی و هرمانوس در نیمکره جنوبی) و هوآنکایو (نزدیک استوای مغناطیسی). به فاز مخالف تغییرات توجه شود. D در هوآنکایو با مقیاس ۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-پ. تغییرات ماه به ماه در مؤلفه Z میدان روزهای آرام برای دو رصدخانه در عرض‌های تقریباً مشابه ولی در نیمکره‌های مخالف (فردریکزبورگ در نیمکره شمالی و هرمانوس در نیمکره جنوبی) و هوآنکایو (نزدیک استوای مغناطیسی). به تغییرات هم فاز در دو نیمکره توجه شود. Z در هرمانوس با مقیاس $\frac{1}{2}$ نشان داده شده است.



شکل ۷. مقایسه تغییرات روزانه مؤلفه Z، زاویه سمت رأسی خورشید χ و فاکتور $\frac{1}{2}(\cos \chi)$ در رصدخانه سانخوان برای میانگین روزهای آرام در ماه مارس ۱۹۹۷. فاکتور $\frac{1}{2}(\cos \chi)$ متناسب با یونش ناحیه E است.

$$C_m = \left(\frac{1}{12}\right) \sum_{i=1}^{24} E_i \cos mT_i$$

$$S_m = \left(\frac{1}{12}\right) \sum_{i=1}^{24} E_i \sin mT_i \quad m=1, \dots, M \quad (1)$$

$$C_0 = \left(\frac{1}{24}\right) \sum_{i=1}^{24} E_i$$

$$S_0 = 0$$

که در آن، $T_i = \frac{2\pi i}{24}$ زمان محلی در مقیاس زاویه‌ای و E_i مقدار یکی از مؤلفه‌های میدان (معمولاً Z, Y, X) در i -امین ساعت (محلی) است. می‌توان رابطه معکوسی به کار برد و E_i را به روش زیر بازسازی کرد:

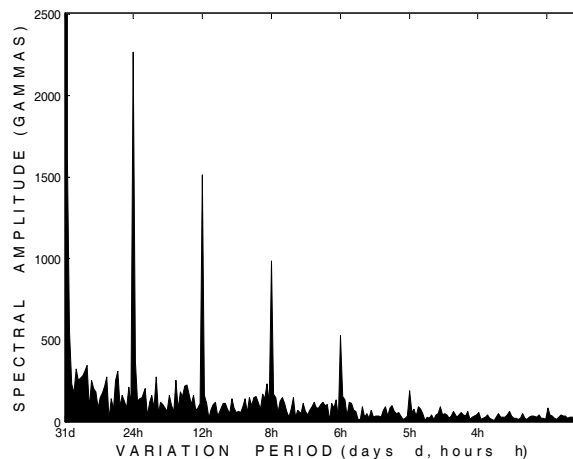
$$E_i = \sum_{m=0}^M (C_m \cos mT_i + S_m \sin mT_i) \quad (2)$$

شکل ۸ ترکیب طیفی یک ثبت آرام از دوره تناوب ۳۰ دقیقه تا ۳۱ روز برای مؤلفه Z ماه مارس ۱۹۹۷ در رصدخانه تاکسون را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های طیفی ۲۴، ۱۲، ۸ و ۶ ساعته غالب هستند و دامنه ضرایب فوریه با افزایش بسامد m به سرعت کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ نقش مؤلفه Z تغییرات آرام برای ماه مارس سال ۱۹۹۷ در رصدخانه سانخوان و زاویه سمت رأسی خورشیدی χ آمده است. در اولین تقریب، فاکتور $\frac{1}{2}(\cos \chi)$ متناسب با یونش ناحیه E است. در این مثال $Sq(Z)$ به شروع و پایان تغییر فاکتور $\frac{1}{2}(\cos \chi)$ بستگی دارد. اگر Sq ناشی از منشأ مغناطیس سپهری باشد، انتقال ناگهانی در طلوع و غروب رخ نخواهد داد. مغناطیس‌سنج‌های واقع در ماهواره‌ها، وجود جریان‌های Sq در هنگام روز در ناحیه E را تأیید می‌کنند.

۵ تحلیل فوریه تغییرات میدان روزانه

اولین گام در تحلیل تغییرات میدان روزانه، تفکیک آنها از سایر تغییرات میدان ژئومغناطیسی است. گام بعدی در تحلیل داده‌ها، استخراج ضرایب فوریه مؤلفه‌های تناوبی با کاربرد روابط زیر است (پارکینسون، ۱۹۸۳):



شکل ۸. ترکیب طیفی مؤلفه Z برای روزهای آرام ماه مارس سال ۱۹۹۷ در رصدخانه تاکسون. دوره تناوب تغییرات از ۳۱ روز تا ۳۰ دقیقه است. به قله‌های موجود در دوره تناوب‌های ۲۴، ۱۲، ۸، و ۶ ساعت و نیز کاهش دامنه با کاهش دوره تناوب دقت کنید.

و مقادیری بین $m+4$ و $m+9$ را می‌توان برای آن اختیار کرد.

برای اطمینان از اینکه همه عبارات‌های معادله (۳) در معادله لاپلاس صدق کند، ضرایب را به صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$A_m = \sum_{n=m}^N (a_n^m r^n + \alpha_n^m r^{-n-1}) P_n^m(\cos \theta) \quad (5)$$

$$B_m = \sum_{n=m}^N (b_n^m r^n + \beta_n^m r^{-n-1}) P_n^m(\cos \theta)$$

a, b, α, β ضرایبی هستند که با استفاده از داده‌ها تعیین می‌شوند و واحد r ، شعاع زمین کروی است. $P_n^m(\cos \theta)$ تابع‌های لژاندر وابسته با درجه n و مرتبه m هستند. برای ارتباط دادن این ضرایب به داده‌ها، باید تابع پتانسیل نرده‌ای U را برحسب مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین نمایش دهیم. پتانسیل U را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد و آنچه قابل اندازه‌گیری است در حقیقت مؤلفه‌های میدان مغناطیسی (X, Y, Z) است. این مؤلفه‌ها از مشتق پتانسیل نسبت به r, ϕ, θ با روابط زیر به دست می‌آیند (کمپبل، ۱۹۸۹).

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \quad Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \phi} \quad Z = \frac{\partial U}{\partial r} \quad (6)$$

چنانچه داده‌های مغناطیسی شامل مقادیر مؤلفه‌های H و

با توجه به شکل ۸ می‌توان دریافت که بسامد های $m=1,2,3,4$ در تغییرات Sq که معادل با دوره تناوب‌های $T=24,12,8,6$ ساعت هستند، بسامدهای غالب‌اند و می‌توان این تغییرات را با کمک این چهار بسامد تجزیه کرد (شکل ۹).

۶ تحلیل Sq با استفاده از هماهنگ‌های کروی

تغییرات Sq مبین یک میدان مغناطیسی فیزیکی هستند و چون هیچ چشمه احتمالی روی سطح زمین ندارند لذا می‌توان آنها را نتیجه یک پتانسیل نرده‌ای دانست که در معادله لاپلاس صدق می‌کند. بنابراین می‌توان پتانسیل را به صورت زیر نوشت (پارکینسون، ۱۹۸۳):

$$U(r, \theta, \phi) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=m}^N A_m \cos mT + B_m \sin mT \quad (3)$$

که در آن، A_m, B_m تابع‌هایی از r, θ (متمم عرض ژئومغناطیسی) و T زمان محلی است که با رابطه زیر با زمان جهانی t مربوط می‌شود:

$$T = t + \phi \quad (4)$$

همان گونه که پیش‌تر گفته شد $M=4$ است و کران جمع (N) نیز به تعداد و توزیع رصدخانه‌ها بستگی دارد

ضرایب مؤلفه‌های X (یا Y) و Z ، ضرایب r^n و r^{-n-1} در معادله (۵) تعیین می‌شوند. b, a مربوط به منشأ خارجی و β, α بیانگر منشأ داخلی میدان Sq است. از این رو با به دست آوردن ضرایب فوق می‌توان نسبت منشأ داخلی و منشأ خارجی میدان را تعیین کرد.

با استفاده از روابط فوق، ضرایب گاوس مربوط به منشأ داخلی به صورت (کمپیل و همکاران، ۱۹۹۸):

$$\alpha_n^m = \left(\frac{1}{2n+1} \right) \left(\frac{nX_c^m}{dP_n^m(\cos\theta)/d\theta} - \frac{Z_c^m}{P_n^m(\cos\theta)} \right) \quad (12)$$

$$\beta_n^m = \left(\frac{1}{2n+1} \right) \left(\frac{nX_s^m}{dP_n^m(\cos\theta)/d\theta} - \frac{Z_s^m}{P_n^m(\cos\theta)} \right)$$

و ضرایب گاوس مربوط به منشأ خارجی به صورت؛

$$a_n^m = \left(\frac{1}{2n+1} \right) \left(\frac{(n+1)X_c^m}{dP_n^m(\cos\theta)/d\theta} + \frac{Z_c^m}{P_n^m(\cos\theta)} \right) \quad (13)$$

$$b_n^m = \left(\frac{1}{2n+1} \right) \left(\frac{(n+1)X_s^m}{dP_n^m(\cos\theta)/d\theta} + \frac{Z_s^m}{P_n^m(\cos\theta)} \right)$$

به دست می‌آیند. X_c^m, X_s^m به ترتیب ضرایب فوریه سینوسی و کسینوسی مؤلفه شمال سوی X و Z_c^m, Z_s^m نیز مربوط به مؤلفه عمودی Z میدان Sq هستند.

شکل ۱۰ تابع پتانسیل U در عرض‌های گوناگون برای ماه ژانویه سال ۱۹۹۷ در امریکای شمالی را نشان می‌دهد. مقادیر پتانسیل بر شعاع زمین تقسیم شده است تا مقیاس برحسب گاما به دست آید. طول جغرافیایی به زمان محلی تبدیل شده است. در نزدیکی عرض‌های استوایی تغییرات کم و بیشینه دامنه‌های U در نزدیکی عرض‌های میانی دیده می‌شود.

D باشد، می‌توان با استفاده از روابط بین عناصر میدان مغناطیسی به معادلات زیر رسید:

$$\delta X = \delta H \cos D - H \delta D \sin D \quad (7)$$

$$\delta Y = \delta H \sin D + H \delta D \cos D$$

از معادلات (۳) و (۶) می‌توان برای مؤلفه‌های شمال سوی X میدان Sq نوشت:

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \sum_m \left(\frac{\partial A_m}{\partial \theta} \right) \cos mT + \left(\frac{\partial B_m}{\partial \theta} \right) \sin mT \quad (8)$$

در $r=1$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial A_m}{\partial \theta} = \sum_n (a_n^m + \alpha_n^m) \left(\frac{d}{d\theta} \right) P_n^m(\cos\theta) \quad (9)$$

$$\frac{\partial B_m}{\partial \theta} = \sum_n (b_n^m + \beta_n^m) \left(\frac{d}{d\theta} \right) P_n^m(\cos\theta)$$

را می‌توان با مساوی قرار دادن با ضرایب فوریه مؤلفه X در یک رصدخانه معین به دست آورد. با کاربرد داده‌های حاصل از رصدخانه‌های موجود در عرض‌های گوناگون، می‌توان مقادیر $(a_n^m + \alpha_n^m)$ و $(b_n^m + \beta_n^m)$ را که مربع اختلاف بین (۸) و ضرایب فوریه مؤلفه X را حداقل می‌کند به دست آورد. همین تحلیل را می‌توان برای مؤلفه شرق سو Y نیز به کار برد و مقادیر تقریباً مشابهی را به دست آورد.

مؤلفه عمودی Z را نیز می‌توان با استفاده از روابط (۳) و (۶) به صورت زیر نوشت:

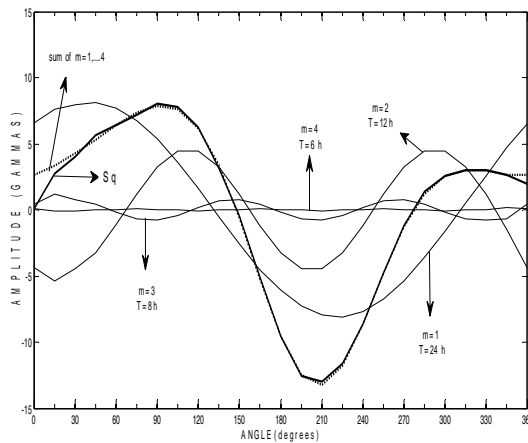
$$Z = \frac{\partial U}{\partial r} = \sum_m \left(\frac{\partial A_m}{\partial r} \right) \cos mT + \left(\frac{\partial B_m}{\partial r} \right) \sin mT \quad (10)$$

که در $r=1$ خواهیم داشت:

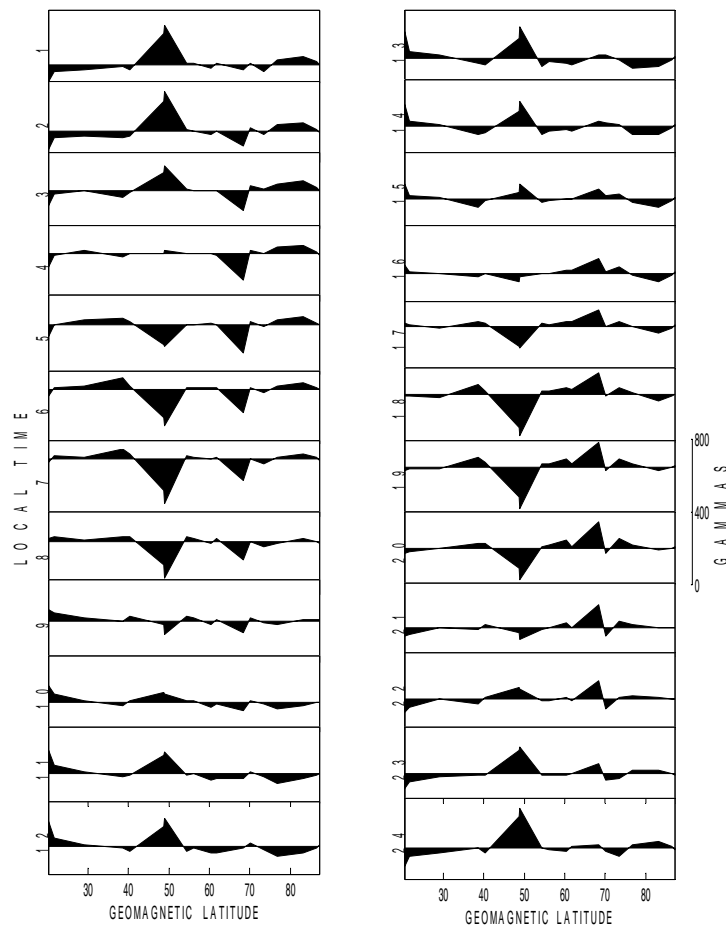
$$\frac{\partial A_m}{\partial r} = \sum_n [na_n^m - (n+1)\alpha_n^m] P_n^m(\cos\theta) \quad (11)$$

$$\frac{\partial B_m}{\partial r} = \sum_n [nb_n^m - (n+1)\beta_n^m] P_n^m(\cos\theta)$$

تحلیل ضرایب فوریه مؤلفه Z منجر به یافتن ضرایب $P_n^m(\cos\theta)$ در معادله (۱۱) می‌شود. بنابراین با تحلیل



شکل ۹. تحلیل فوریه تغییرات میدان Sq برای یک روز (۰ تا ۲۴ ساعت) که برحسب زاویه ساعتی ϕ و دامنه با مقیاس گاما نشان داده شده است. مؤلفه‌های فوریه با $m = 1, 2, 3, 4$ برای دوره تناوب‌های $T = 24, 12, 8, 6$ به صورت موج‌های سینوسی نشان داده شده‌اند. شکل نشان می‌دهد که با هماهنگی‌های چهارگانه فوریه به خوبی می‌توان تغییرات میدان Sq را بازسازی کرد.



شکل ۱۰. تغییرات تابع پتانسیل نرده‌ای U (برشعاع زمین تقسیم شده است) با زمان محلی در آمریکای شمالی در خلال ماه ژانویه سال ۱۹۹۷. به تغییرات کم در عرض‌های استوایی و دامنه‌های بزرگ در عرض‌های میانی دقت شود.

$$X_s^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} (\beta_n^m) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \quad (۱۵-ب)$$

$$Y_c^m(\theta) = -\frac{m}{\sin\theta} \sum_{n=m}^{\infty} (\beta_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۵-پ)$$

$$Y_s^m(\theta) = \frac{m}{\sin\theta} \sum_{n=m}^{\infty} (\alpha_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۵-ت)$$

$$Z_c^m(\theta) = -\sum_{n=m}^{\infty} (n+1) (\alpha_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۵-ث)$$

$$Z_s^m(\theta) = -\sum_{n=m}^{\infty} (n+1) (b_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۵-ج)$$

که X_c^m, Y_c^m, Z_c^m ضرایب کسینوسی مولفه‌های میدان متعامد خارجی و X_s^m, Y_s^m, Z_s^m مولفه‌های سینوسی هستند. بنابراین در عرض ژئومغناطیسی $(\theta - 90)$ با هر ساعت از روز (ϕ) مولفه‌های متعامد میدان خارجی یا داخلی را می‌توان با استفاده از ضرایب تفکیک شده خارجی یا داخلی یا مجموع آن دو برای میدان کل Sq به روش زیر به دست آورد (کمپیل، ۱۹۹۷):

$$X(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^{\infty} [X_c^m(\theta) \cos m\phi + X_s^m(\theta) \sin m\phi] \quad (۱۶-الف)$$

$$Y(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^{\infty} [Y_c^m(\theta) \cos m\phi + Y_s^m(\theta) \sin m\phi] \quad (۱۶-ب)$$

$$Z(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^{\infty} [Z_c^m(\theta) \cos m\phi + Z_s^m(\theta) \sin m\phi] \quad (۱۶-ت)$$

داده‌های میدان مغناطیسی رصدخانه سانخوان به منظور نمایش توانایی برازش تحلیل هماهنگ‌های کروی انتخاب شده است. در شکل‌های ۱۱-الف تا ۱۱-پ مقادیر مشاهده‌ای (OBS) سه مؤلفه میدان در طول سال آرام ۱۹۹۷ برای رصدخانه سانخوان و نیز برازش فوریه (FOR) و تحلیل هماهنگ‌های کروی (SHA) آنها آمده است. تغییرات فصلی در دامنه و فاز ثبت‌های رصدخانه مشهود است.

۷ نمایش میدان با استفاده از هماهنگ‌های کروی

مؤلفه‌های میدان Sq را می‌توان با استفاده از پتانسیل مغناطیسی نرده‌ای به دست آورد. در مختصات کروی با مشتق‌گیری از تابع پتانسیل مغناطیسی نرده‌ای U نسبت به متمم عرض مغناطیسی θ ، طول مغناطیسی ϕ و جهت شعاعی r به ترتیب مؤلفه شمال سو X، مؤلفه شرق سو Y و مؤلفه عمودی Z میدان حاصل می‌شود. اگر تابع پتانسیل مغناطیسی نرده‌ای U برای چشمه‌های داخلی و خارجی تفکیک شده باشد، تعیین بخش‌های داخلی و خارجی میدان نیز امکان‌پذیر است. با استفاده از ضرایب گوس می‌توان بخش‌های داخلی و خارجی میدان در جهت‌های متعامد X, Y, Z را به صورت یک سری فوریه با عبارت‌های سینوسی و کسینوسی حاصل از ضرایب هماهنگ‌های کروی نوشت. برای میدان‌های خارجی روابط به صورت زیر است (کمپیل، ۱۹۹۷):

$$X_c^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} (a_n^m) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \quad (۱۴-الف)$$

$$X_s^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} (b_n^m) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \quad (۱۴-ب)$$

$$Y_c^m(\theta) = -\frac{m}{\sin\theta} \sum_{n=m}^{\infty} (b_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۴-پ)$$

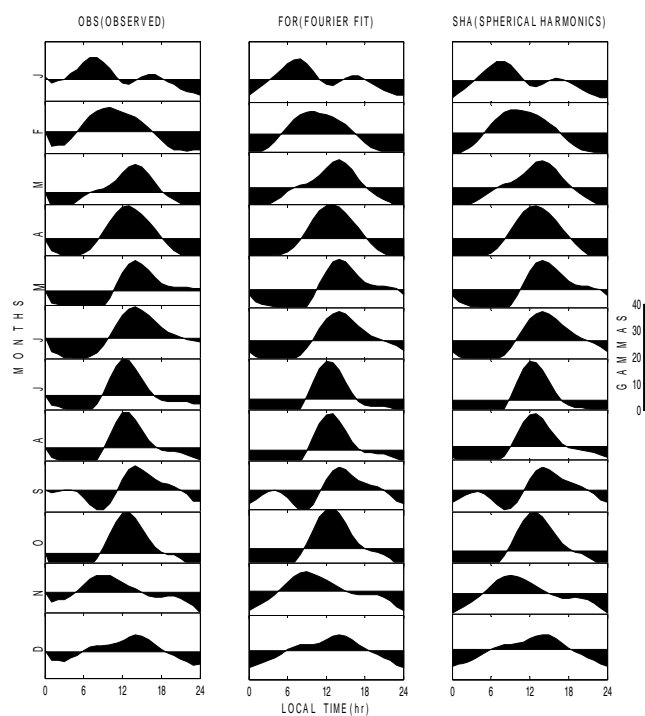
$$Y_s^m(\theta) = \frac{m}{\sin\theta} \sum_{n=m}^{\infty} (a_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۴-ت)$$

$$Z_c^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} n (a_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۴-ث)$$

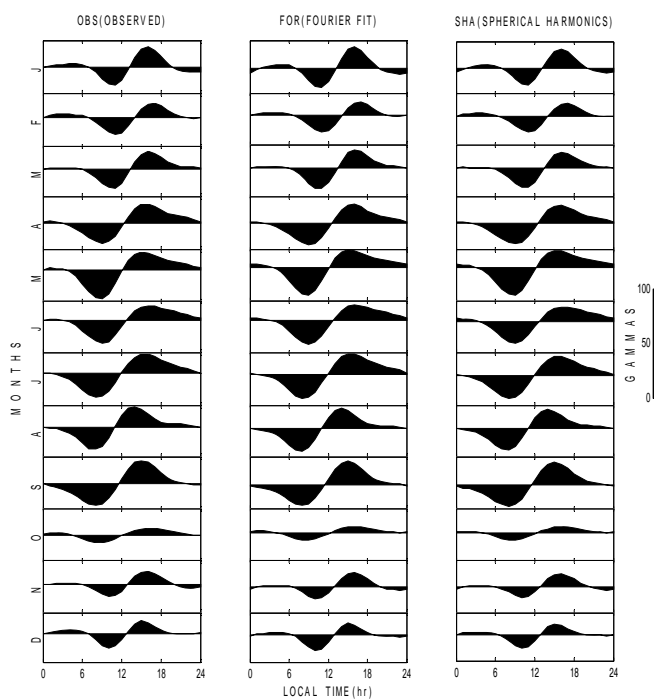
$$Z_s^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} n (b_n^m) P_n^m(\cos\theta) \quad (۱۴-ج)$$

برای میدان‌های داخلی نیز روابط به صورت زیر است (کمپیل، ۱۹۹۷):

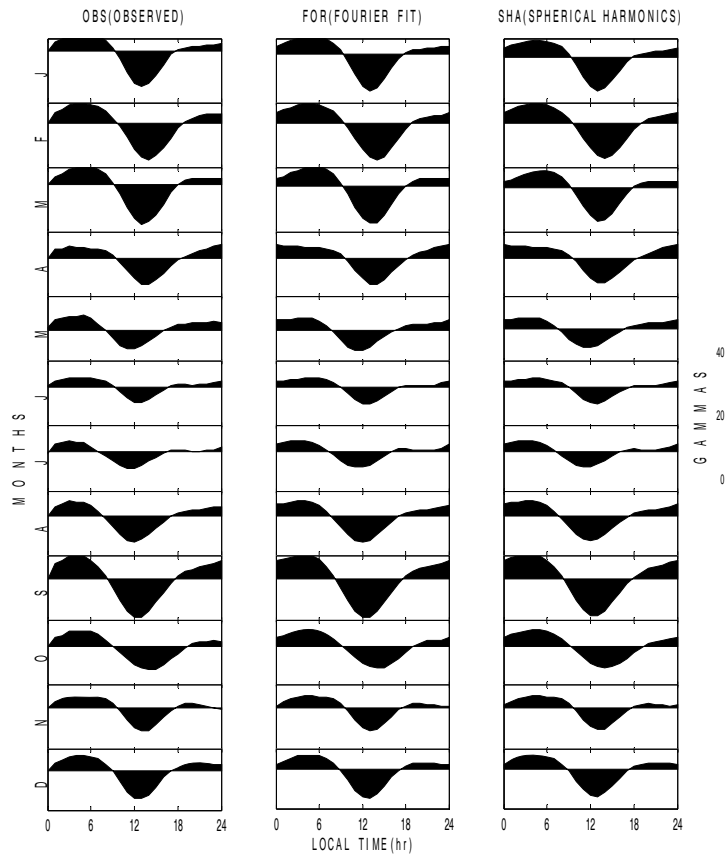
$$X_c^m(\theta) = \sum_{n=m}^{\infty} (\alpha_n^m) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \quad (۱۵-الف)$$



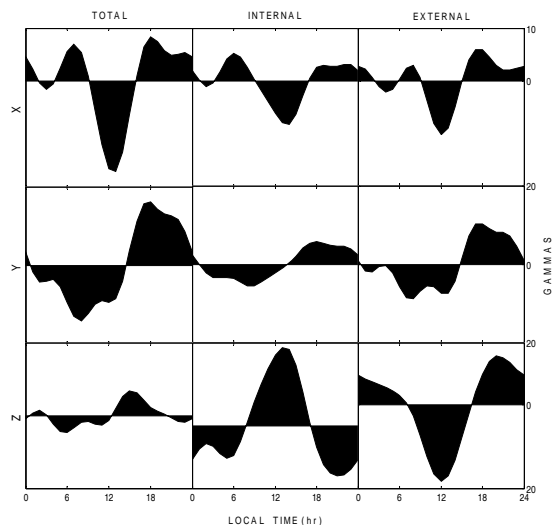
شکل ۱۱-الف. مقایسه مقادیر ساعتی مشاهده‌ای (*OBS*) مؤلفه شمال سو *X* میدان *Sq* و برازش فوریه (*FOR*) و نیز تحلیل هماهنگ‌های کروی (*SHA*) برای ۱۲ ماه سال آرام ۱۹۹۷ در رصدخانه سان‌خوان. به تغییرات فصلی در دامنه و فاز ثبت‌های رصدخانه توجه شود.



شکل ۱۱-ب. مقایسه مقادیر ساعتی مشاهده‌ای (*OBS*) مؤلفه شمال سو *Y* میدان *Sq* و برازش فوریه (*FOR*) و نیز تحلیل هماهنگ‌های کروی (*SHA*) برای ۱۲ ماه سال آرام ۱۹۹۷ در رصدخانه سان‌خوان. به تغییرات فصلی در دامنه و فاز ثبت‌های رصدخانه توجه شود.



شکل ۱۱-پ. مقایسه مقادیر ساعتی مشاهده‌ای (OBS) مؤلفه شمال سو Z میدان Sq و برازش فوریه (FOR) و نیز تحلیل هماهنگ‌های کروی (SHA) برای ۱۲ ماه سال آرام ۱۹۹۷ در رصدخانه سان‌خوان. به تغییرات فصلی در دامنه و فاز ثبت‌های رصدخانه توجه شود.



شکل ۱۲. مؤلفه‌های Z, Y, X میدان‌های خارجی و داخلی میدان Sq برای رصدخانه فورت چرچیل در امریکای شمالی در ۹ مارس سال ۱۹۹۷. مؤلفه‌های داخلی و خارجی Z در جهت مخالف یکدیگر هستند ولی مؤلفه‌های داخلی و خارجی X و Y تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند. دامنه تغییرات مؤلفه‌های داخلی از مؤلفه‌های خارجی نیز کمتر است.

حضور دامنه بزرگ X در رصدخانه‌های نزدیک استوای ژئومغناطیسی، به علت وجود الکتروجت استوایی است. دامنه و فاز تغییرات روزهای آرام در خلال ماه‌های سال، تغییرات کمی دارند.

مؤلفه H در رصدخانه موجود در نیمکره‌های شمالی و جنوبی تغییرات مشابهی دارند. مؤلفه D تغییراتی با فاز مخالف دارد. مؤلفه Z نیز تغییرات هم‌فازی را آشکار می‌سازد. بیشینه دامنه تابع پتانسیل در نزدیکی عرض‌های میانی دیده می‌شود. به علت اختلاف جهت جریان‌های داخلی و خارجی، مؤلفه‌های داخلی و خارجی Z در جهت مخالف یکدیگر هستند. ولی مؤلفه‌های داخلی و خارجی X و Y تغییرات مشابهی را آشکار می‌سازند. دامنه تغییرات مؤلفه‌های داخلی از مؤلفه‌های خارجی کمتر به دست آمده است.

مراجع

- Campbell, W. H., Barton, C. E., Chamalaun, F. H. and Welsh, W., 1998, Quiet-day ionospheric currents and their application to upper mantle conductivity in Australia, *Earth Planets Space*, **50**, 347-360.
- Campbell, W. H., 1997, Introduction to geomagnetic fields, Cambridge University Press, Apr 10, 2003 - Science - 337 pp.
- Campbell, W. H., 1989, An introduction to quiet daily geomagnetic fields, *Pure and Appl. Geophys*, **131**, 315-331.
- Parkinson, W. D., 1983, Introduction to geomagnetism, Scottish Academic press, Edinburgh.

شکل ۱۲ نیز میدان‌های تفکیک شده برای رصدخانه فورت چرچیل را که از روابط ۱۶ در ۹ مارس سال ۱۹۹۷ به دست آمده‌اند، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مؤلفه‌های داخلی و خارجی Z در جهت مخالف یکدیگر هستند که علت آن در جهت مخالف بودن جریان‌های داخلی و خارجی است ولی مؤلفه‌های داخلی و خارجی X و Y تغییرات مشابهی را آشکار می‌سازند. دامنه تغییرات مؤلفه‌های داخلی از مؤلفه‌های خارجی نیز کمتر است. دامنه و اختلاف فاز بین میدان‌های خارجی و داخلی با رسانش الکتریکی درون زمین تعیین می‌شود.

۸ نتیجه‌گیری

دامنه تغییرات روزانه با افزایش دوره تناوب، افزایش می‌یابد. با استفاده از چهار بسامد می‌توان این تغییرات را به درستی با تحلیل فوریه بازسازی کرد. با کاربرد هماهنگ‌های کروی با درجه چهار و مرتبه دوازده با دقت بسیار زیادی این تغییرات مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به تعداد لکه‌های خورشیدی، سال ۱۹۹۷ سالی با فعالیت‌های مغناطیسی خفیف بوده و به منزله سال آرام برگزیده شده است. تغییرات روزانه به طور منظم با عرض ژئومغناطیسی تغییر می‌کنند. تغییرات X در عرض‌های بالا تا عرض‌های میانه، طرح مشابهی دارد و از عرض‌های میانه به سمت عرض‌های پایین‌تر تغییر فاز می‌دهد. ولی مؤلفه‌های Z, Y طرح یکسانی را در عرض‌های گوناگون نشان می‌دهند.