

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم که همیشه در کنارم بوده‌اند

تشکر و قدردانی

از خانواده‌ی عزیزم که با حمایت و پشتیبانی خویش موجبات راحتی و آسایش خاطر بنده را فراهم نمودند صمیمانه تشکر می‌کنم. بر خود لازم می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر سعداله نصیری قیداری و جناب آقای دکتر احمد درودی اعلام نمایم.

فهرست

- ۱- مقدمه..... ۱
- ۲- جو متلاطم و تصویربرداری نجومی..... ۵
 - ۲-۱ مقدمه..... ۵
 - ۲-۲ ضریب شکست جو زمین..... ۶
 - ۲-۳ خواص آماری موج در محیط متلاطم..... ۱۱
 - ۲-۳-۱ انتشار موج از یک لایه متلاطم..... ۱۱
 - ۲-۳-۲ انتشار موج از چند لایه متلاطم..... ۱۵
 - ۲-۴ تصویرنجومی با نوردهی طولانی..... ۱۷
 - ۲-۵ توان تفکیک..... ۲۰
 - ۲-۶ تصویر برداری با نوردهی کوتاه..... ۲۳
 - ۲-۷ نوسان راه نوری بر اثر تلاطم جو..... ۲۶
 - ۲-۷-۱ تاثیر یک لایه تلاطمی در نوسان میدان موج..... ۲۶
 - ۲-۷-۲ تاثیر چند لایه ی تلاطمی بر میدان موج..... ۲۹
 - ۲-۷-۳ تقریب میدان نزدیک..... ۳۱
 - ۲-۸ نوسان فاز..... ۳۲
 - ۲-۹ نوسان زاویه ی فرودی..... ۳۳
 - ۲-۱۰ چشمک زنی ستاره..... ۳۷
 - ۲-۱۱ زاویه ایزوپلانتیک..... ۳۸
 - ۲-۱۲ زمان همدوسی تلاطم..... ۴۱

- ۳- روشهای اپتیکی اندازه گیری پارامترهای تلاطم جو..... ۴۳
- ۳-۱ دیدسنج نجومی..... ۴۳
- ۳-۱-۱ نظریه حرکت دیفرانسیلی تصویر..... ۴۳
- ۳-۱-۲ طراحی دیدسنج..... ۴۹
- ۳-۲ سیدار و جی سیدار..... ۵۲
- ۳-۲-۱ بررسی نظری تابع همبستگی برای طرح شدت جو..... ۵۲
- ۳-۲-۱-۱ یک لایه تلاطمی..... ۵۲
- ۳-۲-۱-۲ چند لایه ی تلاطمی..... ۵۴
- ۳-۲-۲ تخمین تجربی تابع همبستگی فضایی زمانی برای طرح شدت جو..... ۵۶
- ۳-۲-۳ بدست آوردن پارامترهای جو با استفاده از تابع همبستگی فضایی زمانی جو..... ۵۸
- ۳-۲-۴ اصول سیدار کلاسیک..... ۵۸
- ۳-۲-۵ اصول جی سیدار..... ۶۰
- ۳-۳ جی اس ام..... ۶۴
- ۳-۳-۱ دستگاه جی اس ام..... ۷۱
- ۳-۴ حسگر چند روزنه ای چشمک زنی (مس)..... ۷۴
- ۳-۴-۱ نظریه..... ۷۴
- ۳-۴-۲ دستگاه حسگر چشمک زنی چند روزنه ای (مس)..... ۷۷
- ۳-۴-۳ محاسبه قدرت تلاطم در دستگاه مس..... ۷۹
- ۳-۴-۴ دستگاه دیم-مس..... ۷۹
- ۳-۵ شبر..... ۸۱
- ۳-۶ دیدسنج خورشیدی..... ۸۵
- ۳-۷ دستگاه حسگر چشمک زنی قمری (لوسی)..... ۸۷
- ۳-۸ اسلودار..... ۸۹

چکیده

پیشرفت علم نجوم امروزه بیشتر مرهون افزایش قدرت تفکیک تصاویر نجومی و مشاهده‌ی عمیق تر عمق آسمان است. افزایش قدرت تفکیک تصاویر نجومی با ساختن ابزارهای رصدی بهتر و تلسکوپ های بزرگتر امکان پذیر است. متأسفانه در این مسیر علاوه بر دشواری های مهندسی با مشکل دیگری بنام جو زمین روبرو هستیم. آسانترین و قابل انعطافترین راه برای حل این مشکل ساخت رصدخانه در محل هایی است که جو آنها کمترین تاثیر را بر تصویر تلسکوپ بگذارد. تمرکز اصلی این پایان نامه بر مطالعه پارامتر دید اپتیکی در مکانیابی رصدخانه های اپتیکی بزرگ و مطالعه تاثیر تلاطم جو بر تصویربرداری نجومی است. در این پایان نامه قابلیت اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین جو با آزمون هارتمن توسط یک دیدسنج چهارروزنه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین جو می توان زمان همدوسی جو را محاسبه کرد. ما با شبیه سازی رایانه ای و آزمایش نشان دادیم که دیدسنج چهارروزنه قابلیت اندازه گیری با دقت ابیراهی های ناکانونی و آستیگماتیسم را دارد در حالیکه نتایج بدست آمده برای ابیراهی های گیسو از دقت خوبی برخوردار نیستند. جابجایی لکه ها در اثر ابیراهی های مرتبه بالاتر اصلیتترین عامل خطا در اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین جو با استفاده از دیدسنج چهارروزنه هستند. خوشبختانه این اثر در اندازه گیری ابیراهی های ناکانونی و آستیگماتیسم بر خلاف ابیراهی های گیسو قابل صرف نظر کردن است. همچنین در این پایان نامه یک روش برای آزمون کیفیت سطوح غیرکروی ارائه شده است. اساس این روش اندازه گیری جبهه موج نور منعکس شده از سطح آزمون غیرکروی با استفاده از حل معادله انتقال شدت است. بر خلاف روشهای متداول آزمون سطوح غیرکروی که صرفاً در ناحیه کوچکی اطراف محور اپتیکی قابل اجرا هستند، با استفاده از حل معادله انتقال شدت می توان جبهه موج بازتابی ناحیه بزرگتری از سطح غیر کروی را اندازه گیری کرد. دقت حل معادله انتقال شدت به انتخاب فاصله مناسب بین تصاویر توزیع شدت استفاده شده و دامنه تغییرات فاز سطح غیرکروی بستگی دارد. ما با استفاده از شبیه سازی رایانه ای روشی برای تعیین فاصله مناسب تصاویر توزیع شدت برای دامنه های فاز مختلف برای سطوح غیرکروی با شعاع و ثابت غیرکروی معلوم ارائه کردیم.

۳-۸-۱ دستگاه اسلودار..... ۹۱

۳-۸-۲ داده برداری و تحلیل داده ها در دستگاه اسلودار..... ۹۵

۴- اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین جو با استفاده از دیدسنج چهارروزنه..... ۹۷

۴-۱ مقدمه..... ۹۷

۴-۲ آزمون اپتیکی با هارتمن ۴ روزنه..... ۹۸

۴-۳ شبیه سازی..... ۱۰۱

۴-۳-۱ شبیه سازی تصاویر چهارلکه در صفحه کانونی تلسکوپ..... ۱۰۱

۴-۳-۲ اندازه گیری ابیراهی های مرتبه پایین با دیدسنج چهارروزنه..... ۱۰۵

۴-۴ دستگاه دیدسنج چهار روزنه..... ۱۱۵

۴-۵ نتیجه گیری..... ۱۱۹

۵- اندازه گیری زاویه ی ایزوپلانتیک در زنجان..... ۱۲۱

۵-۱ مقدمه..... ۱۲۱

۵-۲ زاویه ایزوپلانتیک و ضریب چشمک زنی..... ۱۲۲

۵-۳ اندازه گیری زاویه ایزوپلانتیک در زنجان..... ۱۲۳

۵-۳-۱ وسایل اندازه گیری..... ۱۲۳

۵-۳-۲ داده برداری تجربی..... ۱۲۳

۵-۴ تحلیل داده ها..... ۱۲۵

۶- کاربرد معادله انتقال شدت در آزمون سطوح غیر کروی..... ۱۲۷

۶-۱ مقدمه..... ۱۲۷

- ۶-۲ معادله انتقال شدت.....۱۲۸
- ۶-۲-۱ نظریه.....۱۲۸
- ۶-۲-۲ روش حل معادله انتقال شدت.....۱۲۹
- ۶-۳ کاربرد معادله انتقال شدت برای آزمون سطوح غیر کروی.....۱۳۳
- ۶-۳-۱ چیدمان آزمون سطوح غیرکروی با معادله انتقال شدت.....۱۳۳
- ۶-۳-۲ شبیه سازی رایانه ای.....۱۳۴
- ۶-۳-۳ نتایج شبیه سازی.....۱۳۷
- ۶-۳-۴ تنظیم صحیح محل سطح غیر کروی در چیدمان.....۱۴۱
- ۶-۳-۵ بررسی تاثیر نوفه بر حل معادله انتقال شدت.....۱۴۱
- ۶-۳-۶ آزمایش.....۱۴۳

مراجع.....۱۴۶

فصل اول

مقدمه

در سال ۱۳۷۹ با توجه به رشد منجمان ایرانی از نظر تعداد و مهارت، هیات دولت ساخت یک رصدخانه اپتیکی با تلسکوپی در مقیاس ۳ متر را تصویب کرد. بعد از تصویب هیات دولت از طرف انجمن نجوم ایران کارگروهی به مدیریت دکتر سعداله نصیری برای مکانیابی رصدخانه ملی ایران تعیین شد. مکانیابی رصدخانه‌های اپتیکی بزرگ مستلزم مطالعه و بررسی دقیق پارامترهای هواشناسی، ژئوفیزیکی، نجومی و امکانات و شرایط محلی با استفاده از تجهیزات مکانیابی است. در ابتدا شرایط هواشناسی و ژئوفیزیکی مناطق مختلف ایران توسط دکتر سعداله نصیری و همکارانشان به دقت مورد بررسی قرار گرفت. در این مدت با تلاشهای مستمر دکتر سعداله نصیری و همکارانشان، مناطق مختلف کشور از دیدگاه هواشناسی و محلی مورد بررسی قرار گرفت. در گام نخست پوشش ابری مکانهای مختلف ایران مورد مطالعه قرار گرفت و از میان آنها ۳۱ منطقه که از شبهای صاف بیشتری نسبت به سایر مناطق برخوردار بودند برای این موضوع نامزد شدند [۱]. در گام بعدی سرعت و جهت وزش باد بعنوان مهمترین عامل ایجاد کننده تلاطم جو مورد بررسی قرار گرفت و از میان این ۳۱ گزینه، چهار منطقه قم، کاشان، کرمان و خراسان جنوبی که دارای باد آرام بیشتری نسبت به سایر مکانها بودند انتخاب شدند [۲-۴]. در ادامه کار ضروری بود که یک مطالعه آماری از وضعیت دید مناطق مذکور که به عنوان مهمترین پارامتر مکانیابی در انتخاب محل نهایی تعیین کننده است، انجام گیرد. برای این منظور در تیر ماه ۱۳۸۳ کارگاه مکانیابی رصدخانه ملی ایران در دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان زیر نظر دکتر سعداله نصیری و دکتر احمد درودی برگزار شد و در نهایت امتحان عملی و کتبی به عمل آمد و از میان شرکت کنندگان چهار گروه دو نفره برای بررسی دید هر کدام از

مناطق چهارگانه انتخاب شدند. سپس آموزشهای لازم به این گروهها ارائه شد. از اوایل شهریور ماه ۱۳۸۳ دکتر سعداله نصیری و دکتر احمد درودی طی چندین سفر به اتفاق گروههای مکانیابی هر استان از محلهای مختلف در چهار منطقه کرمان، کاشان، قم و خراسان جنوبی بازدید کرده و ضمن بررسی وضعیت توپوگرافی و شرایط اقلیمی محلهای مختلف، به طور میانگین دو شب در محل با دستگاه دیدسنج [۵] داده برداری شد که در نهایت مکان مناسبی را در هر یک از مناطق مذکور برای داده برداری درازمدت انتخاب نمودند. در منطقه کرمان سردر، در منطقه کاشان کلاه برفی، در منطقه قم فردو و در منطقه خراسان جنوبی مزارکاهی انتخاب شدند. سپس هر گروه را با تجهیزات کامل دستگاه دیدسنج در این مکانها مستقر کردند و این این گروهها شروع به داده برداری کردند که این داده برداری تا حدود ۳ سال ادامه پیدا کرد با استفاده از تحلیل داده های مناطق مذکور دو منطقه کاشان و قم نامزدهای اصلی ساخت رصدخانه ملی ایران معرفی شدند [۸-۶]. در نهایت در سال ۱۳۸۷ داده برداری ۶ ماهه در این دو منطقه بصورت همزمان انجام گرفت و کوه گرگش کاشان بعنوان محل ساخت رصدخانه ملی ایران معرفی شد. همچنین بموازات اندازه گیری پارامتر دید، آلودگی نوری مناطق ذکر شده نیز توسط دکتر نصیری و همکارانشان اندازه گیری شد [۹، ۱۰]. اما بدون شک مهمترین پارامتر در تعیین محل ساخت یک رصدخانه پارامتر دید است که این پارامتر نسبت مستقیم با تلاطم جو دارد. تلاطم جو مهمترین عامل کاهش حد تفکیک زاویه ای تلسکوپ های اپتیکی بزرگ است. قطر تصویر ستاره در صفحه کانونی تلسکوپ یا همان دیسک دید، بطور تقریبی بین $\frac{0}{3}$ ثانیه تا ۱۰ ثانیه قوسی است. این تفاوت ناشی از شرایط آب و هوایی منطقه است. دیسک دید برای یک تلسکوپ بزرگ در یک ناحیه معمولی از لحاظ شرایط جوی بر روی سطح زمین حدود ۲ ثانیه است که این معادل با تفکیک زاویه ای یک تلسکوپ کوچک با قطر دهانه ی ۶ سانتی متر است. تصویر یک ستاره که توسط یک تلسکوپ با بزرگنمایی بالا و شرایط اپتیکی کامل مشاهده می شود، از تصویر پیش بینی شده با نظریه پراش بسیار متفاوت است و با زمان تغییر می کند. در حقیقت وضوح تصویر ستاره به قطر دهانه تلسکوپ بستگی دارد، اگر قطر دهانه تلسکوپ کوچک باشد پدیده مهمی که مشاهده می کنیم حرکت تصادفی تصویر ستاره در صفحه کانونی تلسکوپ است، ولی اگر قطر دهانه تلسکوپ بزرگ باشد از یک ستاره، یک تصویر مبهم و پهن بر روی صفحه کانونی تلسکوپ تشکیل می شود که به تصویر لک و پیس مشهور است.

تا اوایل دهه ۷۰ این مههم بودن تصویر ستاره در فاصله کانونی تلسکوپهای بزرگ بصورت جدی مورد بررسی قرار نگرفته بود و یا بعبارت بهتر انتشار موج در یک محیط متلاطم بصورت علمی فرمول بندی نشده بود. در سال ۱۹۶۱ تاتارسکی [۱۱] کتاب معروف و مههم خود را با عنوان "انتشار موج در محیط متلاطم" منتشر کرد، که انتشار این کتاب نقطه شروع بررسی پدیده‌ی پیچیده‌ی انتشار موج در جو بود. امروزه با پیشرفت فوق‌العاده در صنایع الکترونیکی و اپتیکی و ساخت CCD های پر سرعت، این بررسی شتاب زیادی پیدا کرده است.

نکته جالبی که در تصویربرداری نجومی وجود دارد این است که کیفیت تصویربرداری تلسکوپ‌های بزرگ به شدت به محل نصب تلسکوپ بستگی دارد از این رو مکانیابی برای ساخت یک رصدخانه اپتیکی بزرگ اهمیت بسیار زیادی دارد. به همین دلیل منجمین زیادی تمرکز و سعی خود را بیشتر در این زمینه متمرکز کرده اند. در اتحادیه بین‌المللی نجوم هم یک گروه کاری برای مکانیابی وجود دارد که هر ساله سمینارها و گردهمایی‌های مختلفی را در این زمینه برگزار می‌کند. هدف اصلی از برگزاری این سمینارها در حقیقت جواب دادن به سوالات اساسی در زمینه‌ی کیفیت تصویر حاصل از یک تلسکوپ بزرگ است. مثلاً آیا با استفاده از تصویر حاصل از یک تلسکوپ کوچک می‌توان کیفیت تصویر ثبت شده با یک تلسکوپ بزرگ را پیش بینی کرد؟ یا آیا می‌توان ابهام تصویر گرفته شده با یک تلسکوپ بزرگ را به پارامتر تلاطم جو نسبت داد؟

مطمئناً برای پاسخ به سوالات بالا و یا سوالاتی از این دست حتماً باید ابتدا برای تلاطم جو یک مدل در نظر بگیریم و با استفاده از آن مدل، انتشار موج را در محیط متلاطم بررسی کنیم. در فصل دوم این پایان‌نامه انتشار موج در محیط متلاطم و تاثیر تلاطم جو بر تصویربرداری نجومی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم روشهای اپتیکی اندازه‌گیری پارامترهای تلاطم جو معرفی شده و به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم اندازه‌گیری ابیراهی‌های جو با استفاده از دستگاه دیدسنج چهارروزنه ارائه شده است. در این فصل برای تحلیل داده‌های دیدسنج یک روش جدید معرفی شده است. در این روش برای تحلیل داده‌های دیدسنج علاوه بر پارامتر فرید اندازه‌گیری ابیراهی‌های مرتبه پایین جو (ابیراهی ناکانونی و ابیراهی‌های آستیگماتیسم) نیز امکان پذیر است. با اندازه‌گیری ابیراهی‌های مرتبه پایین جو می‌توان زمان همدوسی جو را محاسبه کرد. در فصل پنجم کارها و نتایج اندازه‌گیری زاویه ایزوپلانیتیک ارائه گردیده است. سرانجام در فصل ششم روشی جدید برای آزمون سطوح غیرکروی با استفاده از حل معادله انتقال شدت ارائه شده است. هدف اصلی از

ارائه این روش معرفی یک روش اپتیکی آسان و قابل اجرا با امکانات موجود در ایران است. این روش در عین حال از دقت لازم برای آزمون سطوح اپتیکی غیر کروی بزرگ مثل آینه‌های تلسکوپ برخوردار است.

فصل دوم

جو متلاطم و تصویربرداری نجومی

۲-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا انتشار موج در محیط متلاطم بررسی می گردد، بعد از آن با استفاده از نظریه انتشار موج در محیط متلاطم، تاثیر جو زمین بر تصویربرداری نجومی مورد بررسی قرار می گیرد.

در یک سیال وقتی که عدد رینولدز $R = \frac{V_0 L_0}{\nu_0}$ که V_0 سرعت مشخصه سیال، L_0 طول مشخصه و ν_0 هم وشکسانی سینماتیکی سیال است، از عدد رینولدز بحرانی آن که به ساختار هندسی سیال و پارامترهای بی بعد آن بستگی دارد، بزرگتر باشد سیال رفتار تلاطمی از خود نشان می دهد. جو زمین تقریباً همیشه مثل یک سیال متلاطم رفتار می کند. وشکسانی سینماتیک هوا از مرتبه $\nu_0 = 15 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ است. با فرض $V_0 = 1 m/s$ و $L_0 = 15 m$ بعنوان سرعت و بعد مشخصه میانگین برای جو، عدد رینولدز برای جو $R = 10^6$ بدست می آید که نشانگر یک سیال شدیداً متلاطم است.

در سال ۱۹۴۱ کولموگروف [۱۲] مدل معروف خود را برای سیال متلاطم ارائه کرد. بر اساس این مدل مقدار کل انرژی جنبشی پیچک ها با مقیاس بزرگ در هنگام تبدیل این پیچک ها به پیچک های با مقیاس کوچک و کوچکتر ثابت مانده و بین پیچک های کوچکتر تقسیم می شود. طبق این مدل این تقسیم بصورت همسانگرد صورت می گیرد. اگر ما عدد رینولدز را برای پیچک هایی با مقیاس بزرگ بصورت VL/ν در نظر بگیریم در اثر کوچک تر شدن پیچک ها عدد رینولدز هم کوچکتر خواهد شد. این کوچکتر شدن عدد رینولدز باعث می شود که بالاخره سیال از حالت تلاطمی خارج شود که در این صورت انرژی جنبشی پیچک ها بخاطر نیروی اصطکاک وشکسانی به گرما تبدیل و در محیط

پخش می‌شود. در حالت پایا آهنگ پخش انرژی و شکسانی ε_0 به محیط با آهنگ تولید انرژی جنبشی در هنگام تشکیل پیچک‌های بزرگ برابر است. پس با استدلال بالا نتیجه می‌گیریم که V ، سرعت پیچک‌هایی با طول L فقط به طول و آهنگ تولید و اتلاف انرژی بستگی دارد. با یک تحلیل ابعادی می‌توانیم به رابطه زیر برسیم [۱۱]

$$V \propto \varepsilon_0^{1/3} L^{1/3}. \quad (2-1)$$

در آنالیز طیفی انرژی جنبشی بر حسب بردار موج \vec{k} نوشته می‌شود، که $E(k)dk$ انرژی بین k و $k + dk$ است و با $V^2(k)$ متناسب است بنابراین با استفاده از (۲-۱) برای انرژی سیال داریم

$$E(k)dk \propto k^{-2/3}. \quad (2-2)$$

بنا به قانون کولموگروف این رابطه برای زیربازه لختی درست است که در آن $l_0^{-1} \ll k \ll L_0^{-1}$ و L_0 بعد بیرونی تلاطم (بعدی که در اثر ناپایداری دمایی بزرگترین پیچک ایجاد می‌شود) و l_0 بعد درونی (بعدی که در آن در اثر و شکسانی انرژی تلاطم تلف می‌شود) است. در تروپوسفر، l_0 از حدود چند میلی‌متر در نزدیکی سطح زمین تا ۱ سانتی‌متر در نزدیکی تروپوپاز تغییر می‌کند. اندازه L_0 که آنرا ضخامت لایه تلاطمی هم می‌توان نامید از مرتبه چند متر در سطح زمین تا ۱۰۰ متر در ارتفاعات بالا متغیر است.

۲-۲ ضریب شکست جو زمین

تغییرات دما و رطوبت در جو زمین، توابعی از ارتفاع از سطح زمین هستند، اما تلاطمی بودن جو زمین باعث ایجاد ناهمگنی‌هایی در تغییرات دما و رطوبت می‌شود. توان طیفی نوسانات دما و توان طیفی نوسانات رطوبت با روابط زیر تعریف می‌شوند

$$\varphi_T(k) \propto k^{-5/3}, \varphi_c(k) \propto k^{-5/3}. \quad (2-3)$$

توان طیفی سه بعدی $\varphi(\vec{k}) = \varphi(k_x, k_y, k_z)$ و توان طیفی یک بعدی برای محیط همسانگرد با یک رابطه انتگرالی به یکدیگر مربوط اند

$$\varphi(k) = 4\pi k^2 \varphi(\vec{k}) \quad (2-4)$$

با استفاده از این رابطه توان های طیفی سه بعدی نوسانات دما و نوسانات رطوبت به صورت زیر نوشته می شوند

$$\varphi_T(\vec{k}) \propto k^{-1/3}, \varphi_c(\vec{k}) \propto k^{-1/3}. \quad (2-5)$$

هموردایی نوسانات دمایی ($\Theta = T - \langle T \rangle$) بصورت زیر تعریف می شود

$$B_T(\rho) = \langle \Theta(r)\Theta(r + \rho) \rangle, \quad (2-6)$$

که با استفاده از قضیه ونیر - خنچین می توان آنرا بصورت تبدیل فوریه سه بعدی $\varphi_T(k)$ نوشت

$$B_T(\rho) = \int \varphi_T(k) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{\rho}) d\vec{k}. \quad (2-7)$$

با استفاده از معادله (2-4) بخاطر تکینگی در $k = 0$ ، انتگرال بالا را نمی توان محاسبه کرد. تاتارسکی و دیگران برای روبرو نشدن با این مشکل، از مفهوم مناسبتری که همان تابع ساختار است استفاده کردند

$$D_T(\rho) = \langle |\Theta(r + \rho) - \Theta(r)|^2 \rangle. \quad (2-8)$$

تابع ساختار با هموردایی رابطه دارد

$$D_T(\rho) = 2[B_T(0) - B_T(\rho)] \quad (2-9)$$

که اگر $|\rho|$ متناهی باشد مقدار آن نیز متناهی خواهد بود. با استفاده از آنالیز ابعادی در زیر بازه لختی، یک رابطه برای $D_T(\rho)$ بر حسب $|\rho| = \rho$ ، ε_0 (آهنگ تولید انرژی تلاطم) و η_0 (آهنگ تولید نوسان دما) بدست می آید [۱۳]

$$D_T(\rho) \propto \eta_0 \varepsilon_0^{-1/3} \rho^{2/3}. \quad (2-10)$$

معمولا معادله (۲-۱۰) بصورت زیر نوشته می شود

$$D_T(\rho) = C_T^2 \rho^{2/3}, \quad (2-11)$$

که در آن، C_T^2 ثابت ساختار نوسانات دما است. با تعریف بالا تاتارسکی [۱۱] نشان داد که

$$\begin{aligned} \varphi_T(k) &= \frac{\Gamma(8/3) \sin(\pi/3)}{4\pi^2} C_T^2 k^{-11/3} \\ &= 0.033 C_T^2 k^{-11/3}. \end{aligned} \quad (2-12)$$

همچنین وی رابطه مشابهی را هم برای نوسانات رطوبت $c = C - \langle C \rangle$ بدست آورد. ضریب شکست جو زمین، N ، تابعی از دما T و غلظت بخار آب C است. بنابراین نوسانات ضریب شکست $n = N - \langle N \rangle$ را هم می توان بشکل زیر نوشت

$$n = \frac{\partial N}{\partial T} \Theta + \frac{\partial N}{\partial C} C = A\Theta + BC, \quad (2-13)$$

که واریانس آن بشکل زیر نوشته می شود

$$\langle n^2 \rangle = A^2 \langle \Theta^2 \rangle + 2AB \langle \Theta C \rangle + B^2 \langle C^2 \rangle. \quad (2-14)$$

در انتشار موج در جو زمین جمله آخر عبارت بالا به علت کوچکی همیشه قابل صرف نظر کردن است. برخی نشان داده اند که جمله دوم عبارت (2-14) در واریانس تغییر ضریب شکست در لایه های مرزی دریایی می تواند مهم باشد ولی با این وجود در تصویربرداری نجومی این جمله قابل صرف نظر کردن است [15-14]. با استفاده از رابطه گلدستون ضریب A بصورت زیر نوشته می شود

$$A = 80 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2}. \quad (2-15)$$

در رابطه بالا P فشار هوا، بر حسب میلی بار و دمای هوا T بر حسب کلوین بیان شده است. از آنجاییکه $n = A\Theta$ ، تابع ساختار ضریب شکست را هم می توانیم با استفاده از قانون اوبخوف بصورت زیر بنویسیم [11]

$$D_N(\rho) = C_N^2 \rho^{2/3}, \quad (2-16)$$

که در آن C_N تابع ساختار ضریب شکست است و با تابع ساختار دما رابطه زیر را دارد

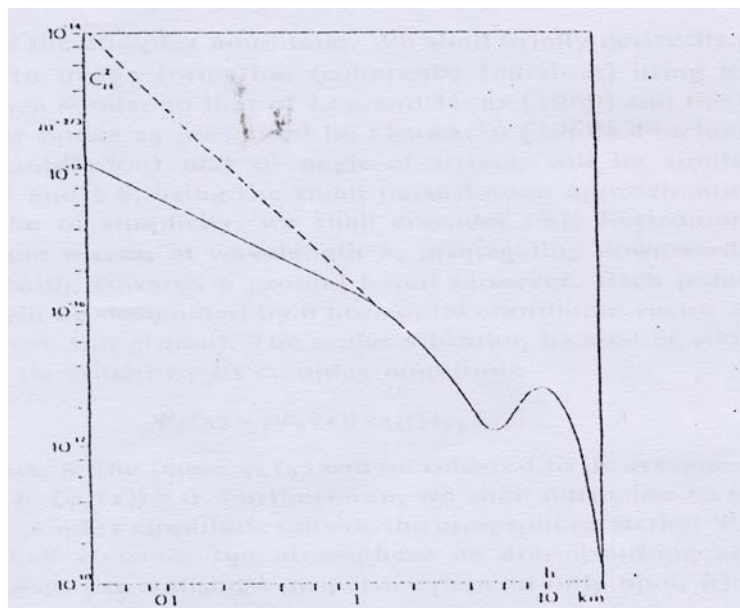
$$C_N = AC_T. \quad (2-17)$$

بطور مشابه توان طیفی نوسانات ضریب شکست هم بصورت زیر نوشته می شود

$$\varphi_N(k) = 0.033 C_N^2 k^{-11/3}, \quad (2-18)$$

که در آن C_N^2 تابعی از ارتفاع و زمان است. اگر C_N^2 را برای ارتفاعات مختلف داشته باشیم در حقیقت قدرت تلاطم را در ارتفاعات مختلف داریم. بعبارت بهتر، C_N^2 نحوه توزیع تلاطم را در ارتفاع های مختلف نشان می دهد.

در اپتیک نجومی تلاطم جو را به چهار منطقه تقسیم می کنند: تلاطم داخل گنبد رصدخانه، تلاطم لایه سطحی، تلاطم لایه زمینی که تا ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین است و تلاطم لایه بالا که تقریباً تا ۱۰ کیلومتری از سطح زمین است. تلاطم ایجادشده در داخل گنبد تلسکوپ دو علت دارد یکی وجود تغییرات دما در داخل گنبد است و دیگری اختلاف سرعت باد بیرون گنبد با هوای ایستای داخل گنبد. اولین مشکل را با در نظر گرفتن تدابیری براحتی می توان حل کرد. اما بر مشکل دوم که تاثیر مهمی در تصویربرداری نجومی دارد، نمی توان براحتی فائق آمد. طبیعی است که در طول روز بخاطر تابش خورشید و گرم شدن تجهیزات اندازه گیری، تصویربرداری نجومی (با رصد خورشید) مشکلتر از تصویربرداری در شب است. نمودار ۱-۲، C_N^2 را بر حسب ارتفاع نشان می دهد.



شکل ۱-۲. قدرت تلاطم میانگین بر حسب ارتفاع از سطح زمین. خط پر داده تجربی و خط نقطه چین قدرت تلاطم پیش بینی شده توسط مدل هافناگل است.

۲-۳ خواص آماری موج در محیط متلاطم

از آنجائیکه تلاطم جو عامل محدود کننده ای در تصویربرداری نجومی است، منجمین علاقه ویژه ای به بررسی انتشار موج اپتیکی در محیط متلاطم دارند. فرض می کنیم موج منتشر شده از ستاره هنگام ورود به جو زمین به خاطر مسافت طولانی طی شده، موج تخت است. برای بررسی مساله انتشار موج در جو از مختصات (\bar{x}, h) استفاده می کنیم که \bar{x} بردار دو بعدی در جهت افق و h ارتفاع از سطح زمین است. دامنه مختلط بردار موج بصورت زیر نوشته می شود

$$\Psi_h(x) = |\Psi_h(x)| \exp[i\phi_h(x)], \quad (2-19)$$

که $\phi_h(x)$ فاز جبهه موج است. برای سادگی بردار دامنه موج را هنگام ورود به جو بشکل $\Psi_\infty(x) = 1$ در نظر می گیریم. فرض دیگری که برای بررسی انتشار موج در محیط متلاطم داریم این است که در جو اثر جذب وجود ندارد و خواص آماری جو تنها به ارتفاع h بستگی دارد.

۲-۳-۱ انتشار موج از یک لایه متلاطم

فرض می کنیم، جو زمین در همه جا بجز یک لایه تلاطمی افقی بین ارتفاع h و $h + \delta h$ همگن است. با فرض بالا هنگام ورود موج به لایه تلاطمی، دامنه مختلط موج بصورت زیر است

$$\Psi_{h+\delta h}(\bar{x}) = 1. \quad (2-20)$$

دامنه مختلط موج در هنگام خروج از لایه تلاطمی بشکل زیر درمی آید

$$\Psi_h(\bar{x}) = \exp[i\phi(\bar{x})], \quad (2-21)$$

که $\phi(\bar{x})$ تغییر فاز ایجاد شده در اثر نوسانات ضریب شکست $n(\bar{x}, h)$ در داخل لایه بصورت زیر است

$$\phi(\bar{x}) = k \int_h^{h+\delta h} dz n(\bar{x}, z), \quad (2-22)$$

در فرمول بالا $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج است. با تعریف تابع همدوسی موج در خروجی لایه تلاطمی داریم

$$B_h(\bar{\xi}) = \langle \Psi_h(\bar{x}) \Psi_h^*(\bar{x} + \bar{\xi}) \rangle. \quad (2-23)$$

با استفاده از (2-21)، عبارت بالا بصورت زیر نوشته می شود

$$B_h(\bar{\xi}) = \langle \exp i[\phi(x) - \phi(x + \xi)] \rangle. \quad (2-24)$$

از آنجائیکه $B_h(\xi)$ تابع ساختار (تبدیل فوریه تابع چگالی احتمال) در فرکانس واحد است پس

$$B_h(\bar{\xi}) = \exp -\frac{1}{2} \langle |\phi(\bar{x}) - \phi(\bar{x} + \bar{\xi})|^2 \rangle. \quad (2-25)$$

با معرفی تابع ساختار دو بعدی فاز ($D_\phi(\xi)$) عبارت بالا را می توان بشکل زیر نوشت

$$B_h(\bar{\xi}) = \exp -\frac{1}{2} D_\phi(\bar{\xi}). \quad (2-26)$$

حال رابطه بین $D_\phi(\xi)$ و آمار نوسانات ضریب شکست را بدست می آوریم. فرض کنید $B_\phi(\xi)$ هموردایی $\phi(\bar{x})$ است

$$B_\phi(\bar{\xi}) = \langle \phi(\bar{x}) \phi(\bar{x} + \bar{\xi}) \rangle. \quad (2-27)$$