

صلاة الاضلاع

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>  
دانشکده علوم پایه  
گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

بررسی ساختار دانه‌های نیم‌سایه‌ای لکه‌های خورشیدی

استاد راهنما:

دکتر هاشم حامدی وفا

نگارش:

نوشین جمشیدی

تیر ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادرم

به پاس محبت‌های بی‌دریغشان

## چکیده

به منظور مطالعه‌ی ساختار دانه‌ها و رشته‌های نیم‌سایه‌ای لکه‌های خورشیدی، از طیف استوکس کامل ثبت شده توسط قطبش‌سنج طیفی ماهواره‌ی هینوده برای یک لکه‌ی نزدیک مرکز قرص خورشید استفاده کردیم. با حل مساله معکوس معادله‌ی انتقال تابشی، بردار میدان مغناطیسی، دما و سرعت در راستای خط دید را برای چهار رشته‌ی نیم‌سایه‌ای و دانه‌های متصل به آن‌ها به دست آوردیم.

برای هر ناحیه، با استفاده از یک آستانه‌ی دما سایه‌ی تاریک را از رشته‌ی نیم‌سایه‌ای درخشان‌تر جدا کردیم و برای تمام نقاط سایه از وارونی تک مولفه‌ای استفاده کردیم. برای پیدا کردن نمایه‌های غیر عادی که از جمع دونمایه با خصوصیات مغناطیسی متفاوت تشکیل شده‌اند، از دو معیار اندازه‌ی مگنتوگرام استوکس  $V$  در فاصله‌ی  $280 \text{ m\AA}$  از مرکز خط  $630.15 \text{ nm}$   $\text{Fe I}$  و ضریب پُری مولفه‌های مغناطیسی حاصل از وارونی دو مولفه‌ای استفاده کردیم. با توجه به ماسک‌های ساخته شده برای ناحیه‌های مورد بررسی، تنها یک ناحیه ساختار دو مولفه‌ای غالبی را نشان داد.

نتایج وارونی برای هر چهار ناحیه، وجود دو مولفه‌ی "زمینه" (spine) و مولفه‌ی "ساختار نفوذی" (intraspine) در نیم‌سایه را تایید می‌کنند. مولفه‌ی ساختار نفوذی در نیم‌سایه‌ی داخلی و میانی دارای میدان مغناطیسی ضعیف‌تر و افقی‌تر از زمینه و در نیم‌سایه‌ی خارجی دارای میدان مغناطیسی قوی‌تر و عمودی‌تر از زمینه است و جریان‌های پلاسما در این مولفه دیده می‌شوند.

حضور میدان‌های مغناطیسی عمودی در مکان سر رشته‌ها که به سمت انتهای رشته افقی می‌شوند و نیز جریان‌های یک جهته در مولفه‌ی ساختار نفوذی با شبیه‌سازی‌های لوله‌ی شار متحرک که دانه‌های نیم‌سایه‌ای را سطح مقطع لوله‌های شار با شیدسپهر می‌دانند، سازگار هستند.

کم شدن سرعت فوران پلاسما در مکان دانه‌ها در نیم‌سایه‌ی داخلی نسبت به نیم‌سایه‌ی میانی و خارجی و نیز سردتر بودن آن‌ها نسبت به مکان روی رشته‌ها نشان می‌دهد که در نیم‌سایه‌ی داخلی فوران پلاسما در لوله‌های شار تقریباً متوقف می‌شود و رشته‌ها در انتهای عمرشان هستند.

## قدردانی

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم رهنمون‌مان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزی‌مان ساخت.

از تمام زحماتی که استاد محترم راهنمایم جناب آقای دکتر هاشم حامدی وفا در طول این پروژه متحمل شدند، کمال تشکر را دارم. برای ایشان سربلندی، بهروزی و سلامتی از خداوند متعال خواستارم.

از خانواده‌ی عزیزم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بودند و تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودشان مایه دلگرمی من می باشد، سپاسگزارم.

## فهرست مطالب

### فصل ۱

- ۸ ..... لکه‌های خورشیدی
- ۹ ..... ۱-۱ ویژگی‌های کلی لکه‌های خورشیدی
- ۹ ..... ۱-۱-۱ مکان و سیر تکاملی
- ۱۰ ..... ۱-۱-۲ ابعاد و طول عمر
- ۱۱ ..... ۱-۱-۳ درخشندگی و ساختار حرارتی
- ۱۱ ..... ۱-۱-۴ میدان مغناطیسی
- ۱۳ ..... ۱-۱-۵ میدان سرعت
- ۱۴ ..... ۲-۱ ساختار ریز لکه‌های خورشیدی
- ۱۵ ..... ۱-۲-۱ ساختار ریز سایه
- ۱۶ ..... ۲-۲-۱ ساختار ریز نیم‌سایه
- ۱۷ ..... ۳-۱ مدل‌های نیم‌سایه‌ای
- ۱۷ ..... ۱-۳-۱ مدل لوله‌ی شار جاسازی شده
- ۱۸ ..... ۱-۳-۱-۱ شبیه‌سازی لوله‌ی شار متحرک
- ۲۱ ..... ۲-۱-۳-۱ محدودیت مدل لوله‌ی شار جاسازی شده
- ۲۲ ..... ۲-۳-۱ مدل شکاف میدان آزاد یا نیم‌سایه‌ی شکاف‌دار
- ۲۴ ..... ۱-۲-۳-۱ محدودیت مدل شکاف میدان آزاد

### فصل ۲

- ۲۵ ..... هینوده یک تلسکوپ خورشیدی
- ۲۵ ..... ۱-۲ هینوده و ابزارهای رصدی آن
- ۲۶ ..... ۲-۲ اجزای تلسکوپ اپتیکی خورشیدی
- ۲۹ ..... ۱-۲-۲ تصویرگر با صافی گستره‌ی پهن (BFI)
- ۳۱ ..... ۱-۱-۲-۲ مشاهده پذیرهای BFI
- ۳۱ ..... ۲-۲-۲ تصویرگر با صافی گستره‌ی باریک (NFI)

۳۲	..... NFI مشاهده پذیرهای ۱-۲-۲-۲
۳۴	..... قطبش سنج طیفی ۳-۲-۲
۳۵	..... مشاهده پذیرهای قطبش سنج طیفی ۱-۳-۲-۲
۳۵	..... محصولات داده‌ای SOT ۳-۲
فصل ۳	
۳۸	..... مقدمه‌ای بر قطبش‌سنجی طیفی ۳-۲-۲
۳۸	..... اثر زیمان ۱-۳
۴۲	..... پارامترهای استوکس ۲-۳
۴۳	..... اندازه‌گیری پارامترهای استوکس ۱-۲-۳
۴۶	..... نمایه‌های استوکس ۳-۳
فصل ۴	
۴۷	..... کد معکوس‌سازی SIR ۴-۱
۴۸	..... توابع پاسخ ۱-۴
۴۹	..... روش مارکوارت ۲-۴
۵۱	..... مفهوم گره ۳-۴
۵۳	..... فرایند سنتز خطوط طیفی ۴-۴
۵۴	..... فرایند معکوس‌سازی ۵-۴
۵۴	..... تقریب خطا ۱-۵-۴
۵۵	..... پارامترهای کد معکوس‌سازی SIR ۶-۴
۵۵	..... فایل کنترل ۱-۶-۴
۵۹	..... فایل‌های نمایه ۲-۶-۴
۵۹	..... فایل‌های اتمسفر مدل ۳-۶-۴
۶۰	..... فایل‌های خروجی ۴-۶-۴
فصل ۵	
۶۱	..... تحلیل داده‌های رصدی ۵-۱
۶۱	..... داده‌های رصدی و اجرای کد SIR ۵-۱

۶۳	.....	۲-۵ ساخت مگنتوگرام.....
۶۷	.....	۳-۵ آماده سازی داده‌ها برای تحلیل.....
۶۹	.....	۴-۵ جداسازی مولفه‌های حاصل از وارونی.....
۷۰	.....	۵-۵ بررسی نتایج معکوس سازی رشته‌های نیم‌سایه‌ای مورد مطالعه.....
۷۰	.....	۱-۵-۵ ناحیه‌ی اول.....
۷۱	.....	۱-۱-۵-۵ جداسازی بر اساس قید بزرگی میدان مغناطیسی.....
۷۳	.....	۲-۱-۵-۵ جداسازی بر اساس قید زاویه انحراف میدان مغناطیسی.....
۷۵	.....	۳-۱-۵-۵ جداسازی بر اساس قید اندازه‌ی سرعت در راستای خط دید.....
۷۶	.....	۴-۱-۵-۵ جداسازی بر اساس قید اندازه‌ی دما.....
۷۸	.....	۵-۱-۵-۵ انتخاب بهترین قید برای جداسازی مولفه‌های وارونی دو مولفه‌ای.....
۷۸	.....	۲-۵-۵ ناحیه‌ی دوم.....
۸۰	.....	۳-۵-۵ ناحیه‌ی سوم.....
۸۳	.....	۴-۵-۵ ناحیه‌ی چهارم.....
۸۵	.....	۶-۵ مقایسه و نتیجه‌گیری.....

## فصل ۶

۸۸	.....	نتیجه‌گیری.....
۹۰	.....	مراجع.....



## فهرست جدول‌ها

- جدول ۲. ۱: محدودیت‌های پراش برای نوارهای طیفی در مجموعه‌ی اپتیکی جانبی (FPP)..... ۲۸
- جدول ۲. ۲: خصوصیات BFI..... ۳۰
- جدول ۲. ۳: خصوصیات NFI..... ۳۳
- جدول ۲. ۴: ویژگی‌های نقشه برداری قطبش‌سنج طیفی..... ۳۶
- جدول ۲. ۵: انواع داده‌های Hinode/SOT بر حسب سطح..... ۳۶
- جدول ۲. ۶: انواع داده‌های SOT بر حسب نوع رصد..... ۳۷
- جدول ۴. ۱: نمونه‌ای از یک فایل کنترل..... ۵۷
- جدول ۵. ۱: کمیت‌های فیزیکی درخشان‌ترین خانه‌ی دانه‌های نیم‌سایه‌ای..... ۸۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱. ۱: تصاویر ثبت شده در نوار G یک لکه‌ی نسبتاً منظم (تصویر سمت چپ) و یک لکه‌ی پیچیده‌تر (تصویر سمت راست). بخش تاریک مرکزی لکه‌ها، سایه و نواحی روشن‌تر اطراف آن‌ها که به طور شعاعی حول سایه قرار دارند، نیم‌سایه نام دارد. خانه‌های درخشان اطراف لکه‌ها سلول‌های همرفتی گرانیولی هستند. ناحیه‌ی تاریک کوچک خارج از لکه در تصویر سمت راست یک لک (pore) است. [۹].....
- شکل ۲. ۱: نمودار پروانه‌ای (تصویر بالا) و ثبت مساحت نسبی سطح پوشش داده شده توسط لکه‌ها (تصویر پایین). در تصویر بالا محور عمودی عرض جغرافیایی خورشید و محور افقی زمان را نشان می‌دهند. اگر یک لکه یا یک گروه از لکه‌ها در یک بازه‌ی زمانی در یک محدوده‌ی عرض جغرافیایی قرار داشته باشند، این بخش از نمودار هاشور خورده است، که رنگ‌ها نشان دهنده‌ی مساحتی هستند که توسط این لکه‌های خورشیدی پوشش داده شده‌اند. [۱۰].....
- شکل ۳. ۱: طیف دیفرانسیلی اندازه‌ی مساحت برای مجموعه‌ای از داده‌های ویلسون (۲۴۶۱۵ لکه‌ی خورشیدی) (صلیب‌ها). اندازه‌های کوچک غیر قابل اطمینان توسط دایره‌های توپر مشخص شده‌اند. [۱۱].....
- شکل ۴. ۱: خصوصیات مغناطیسی لکه‌ی منظم، بزرگی میدان مغناطیسی (الف)، زاویه انحراف (ب) و زاویه سمتی (ج) میدان مغناطیسی. پیکان‌ها جهت بردار میدان مغناطیسی و طول آن‌ها متناسب با اندازه‌ی میدان مغناطیسی است. خط‌ها مرزهای سایه-نیم‌سایه و نیم‌سایه-خورشید آرام را نشان می‌دهند [۶۷]..... [۱۲].....
- شکل ۵. ۱: ضربدرها مقادیر رصد شده و منحنی‌ها برازش به داده‌ها را نشان می‌دهند.  $B_z$  مولفه‌ی عمودی (تصویر سمت چپ) و  $B_r$  مولفه‌ی شعاعی (تصویر سمت راست) بردار میدان مغناطیسی هستند.  $r$  مولفه‌ی شعاعی است که از مرکز هندسی لکه اندازه‌گیری می‌شود و  $I_p$  شعاع بیرونی نیم‌سایه است [۵۹]..... [۱۳].....
- شکل ۶. ۱: تصویر انتقال دوپلر مرکز یک خط طیفی در یک لکه‌ی منظم. خطوط سفید مرز سایه-نیم‌سایه و (سیاه) در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز و انتقال به سرخ (سفید) در نیم‌سایه‌ی سمت لبه نشان دهنده‌ی جریان اورشده است. [۱۳].....
- شکل ۷. ۱: ساختار ریز یک لکه‌ی خورشیدی برگرفته از مقاله‌ی سوبوتکا [۵۷]..... [۱۴].....
- شکل ۸. ۱: طرح‌واره‌ای از مدل لوله‌ی شار جاسازی شده برای توضیح ساختار ریز میدان مغناطیسی در نیم-سایه‌ی لکه‌های خورشیدی. میدان مغناطیسی شامل دو مولفه است؛ یک مولفه، لوله‌ی شار است که با استوانه‌ی افقی نمایش داده شده و دیگری میدان مغناطیسی عمودی‌تر است که توسط خطوط میدان که حول لوله‌ی شار پیچیده‌اند نشان داده شده است. [۱۸].....
- شکل ۹. ۱: مدل ارائه شده توسط جان و اشمیت در سال ۱۹۹۴ [۲۴]..... [۱۹].....
- شکل ۱۰. ۱: طرح‌واره‌ای از شبیه‌سازی لوله‌ی شار متحرک. وضعیت لوله در زمان‌های ۰، ۱۲۰۰ و ۵۴۰۰ ثانیه نشان داده شده است. سایه و نیم‌سایه توسط پریپاتوپوز، نیم‌سایه و خورشید آرام توسط مگنتوپوز از هم جدا شده‌اند. خط افقی درون نیم‌سایه، تراز شیدسپهر نیم‌سایه را نشان می‌دهد. مقیاس سیاه و سفید، سرعت پلاسما در امتداد لوله را نشان می‌دهد. [۲۱].....

شکل ۱. ۱۱: شکل شکاف (خطوط ضخیم) و خطوط میدان مغناطیسی برای نیم‌سایه‌ی خارجی (تصویر بالا) و نیم‌سایه‌ی داخلی (تصویر پایین). خطوط تیره‌ی افقی، ارتفاعی که در آن فشار گاز در مولفه‌ی مغناطیسی با فشار گاز مولفه‌ی میدان صفر در  $z=0$  برابر می‌شود را نشان می‌دهند. ۲۳

شکل ۲. ۱: طرحی از مجموعه‌ی تلسکوپ اپتیکی SOT (OTA). ۲۷

شکل ۲. ۲: طرح‌واره‌ی اپتیکی ابزارهای OTA و FPP. ۲۸

شکل ۲. ۳: میدان دید BFI روی یک مغناطیس‌سنج از کل قرص خورشید، گرفته شده توسط

SOHO/MDI. ۳۰

شکل ۲. ۴: میدان دید NFI روی مغناطیس‌سنج قرص کامل ثبت شده توسط SOHO/MDI. ۳۴

شکل ۳. ۱: طرح‌واره‌ی از سطوح انرژی برای زیمان سه گانه: یک مولفه‌ی  $\pi$  انتقال نیافته (سبز) و دو مولفه‌ی

$\sigma$  انتقال یافته (قرمز و آبی). ۴۰

شکل ۳. ۲: طرحی از اثر زیمان طولی. ۴۱

شکل ۳. ۳: طرحی از اثر زیمان عرضی. ۴۲

شکل ۳. ۴: طرح‌واره‌ی از یک قطبش‌سنج که دارای یک قطبش‌گر و یک تاخیرانداز است. بردارهای  $u_1$  و  $u_2$

صفحه‌ی میدان الکتریکی تابش ورودی را تعریف می‌کنند. تاخیرانداز توسط محور سریع، محور کند و زاویه‌ی

$\alpha$  مشخص می‌شود. قطبش‌گر توسط محور اپتیکی و زاویه‌ی  $\beta$  مشخص می‌شود. ۴۴

شکل ۴. ۱: طرح‌واره‌ی از چگونگی انتخاب گره‌ها برای دما در یک مدل فرضی. اتمسفر در عمق با تعادل هم

فاصله (گام) در مقیاس لگاریتمی تقسیم بندی شده است. در این مثال خاص اندازه‌ی گام  $\Delta \log \tau = 0.5$

است. اگر کاربر دو گره را مشخص کند، در این مثال، تصحیح‌های محاسبه شده‌ی دما در  $\log \tau = -5$  و

$\log \tau = 2$  پیدا می‌شوند. با سه گره، آشفتگی‌ها در  $\log \tau = -5$  و  $\log \tau = -1.5$  و  $\log \tau = 2$  پیدا می‌شوند.

در این جا نمی‌توان پنج گره انتخاب کرد چون نقاط گسسته‌ی کافی در شبکه (نقاط عمق) وجود ندارد. ۵۲

شکل ۵. ۱: تصویر شدت پیوستار لکه‌ی خورشیدی NOAA ۱۰۹۳۰ که از بازسازی شدت‌های پیوستار رصد

شده در جناح قرمز خط آهن خنثی در طول موج  $630.25 \text{ nm}$  بدست آمده و به شدت پیوستار خورشید آرام

نرمالیزه شده است. ۶۲

شکل ۵. ۲: تصاویر مگنتوگرام ساخته شده از لکه‌ی خورشیدی مورد مطالعه در فاصله‌ی  $280 \text{ m}\text{\AA}$  از مرکز

خط  $630.15 \text{ nm}$  Fe I از استوکس V. مگنتوگرام جناح قرمز (تصویر سمت راست) و جناح آبی (تصویر

سمت چپ) که به شدت پیوستار خورشید آرام یک‌گانه شده‌اند. ۶۳

شکل ۵. ۳: نمونه‌هایی از نمایه‌های استوکس دیده شده در نیم‌سایه‌ی لکه‌ی بالایی. نمایه‌های دارای استوکس

V افزایش یافته با قطبش موافق با لکه (الف) و قطبش مخالف با لکه (ب) در جناح آبی. نمایه‌های دارای

استوکس V افزایش یافته با قطبش مخالف با لکه (ج) و قطبش موافق با لکه (د) در جناح قرمز. ۶۵

شکل ۵. ۴: یک روش ساده برای ساختن نمایه‌های غیر عادی  $V$ . جمع دو نمایه‌ی  $A$  و  $B$  در تصویر سمت چپ، نمایه‌ی سمت راست را می‌سازد. نمایه‌ی  $B$  برابر  $90\%$  نمایه‌ی  $A$  است اما دارای سرعت انتقال یافته است. جمع آن‌ها یک نمایه‌ی دارای چند لب را نتیجه می‌دهد [۱]..... ۶۶

شکل ۵. ۵: نمونه‌هایی از نمایه‌های استوکس رصد شده (خط‌های سیاه) در نیم‌سایه و نمایه‌های ساخته شده توسط کد وارونی SIR (آبی: یک مولفه‌ای - قرمز: دو مولفه‌ای) ..... ۶۸

شکل ۵. ۶: از چپ به راست: تصویر شدت پیوستار ناحیه، ماسک دما (نواحی سیاه رنگ معادل دماهای بیش از  $4500\text{K}$  هستند) برای جدا کردن سایه از رشته‌ی نیم‌سایه‌ای، ماسک مگنتوگرام (در خانه‌های سیاه علامت استوکس  $V$  بیش از  $6$  برابر نویز است)، ماسک ضریب پُری (اختلاف ضریب پُری دو مولفه در خانه‌های سیاه کم‌تر از  $0.6$  است) و ماسک نهایی است. در ماسک نهایی برای خانه‌های سفید رنگ از نتایج وارونی تک مولفه‌ای و برای خانه‌های سیاه از نتایج وارونی دو مولفه‌ای استفاده می‌کنیم..... ۶۹

شکل ۵. ۷: تصویر شدت پیوستار بزرگ شده مربوط به ناحیه‌ی ۱ (تصویر سمت چپ) و ماسک نهایی که نشان دهنده‌ی تفکیکی از نقاط تک مولفه‌ای (خانه‌های سفید) و دو مولفه‌ای (خانه‌های سیاه) است..... ۷۰

شکل ۵. ۸: نتایج حاصل از اعمال قید اندازه‌ی میدان مغناطیسی برای ناحیه‌ی اول. تصویر بالا-چپ: دما در لایه‌ی  $\log \tau = -0.5$ ، تصویر بالا-راست: سرعت در راستای خط دید، تصویر پایین-چپ: اندازه‌ی میدان مغناطیسی و تصویر پایین-راست: زاویه انحراف میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند. در تصاویر مربوط به هر مشخصه، تصویر سمت چپ زمینه (spine) و تصویر سمت راست ساختار نفوذی (intraspine) را نشان می‌دهد. نوار رنگی افقی نشان دهنده‌ی مقادیر و بازه‌ی تغییرات هر کمیت است..... ۷۲

شکل ۵. ۹: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از جداسازی با قید زاویه انحراف میدان مغناطیسی برای ناحیه‌ی ۱..... ۷۴

شکل ۵. ۱۰: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از جداسازی با قید سرعت در راستای خط دید برای ناحیه‌ی ۱..... ۷۶

شکل ۵. ۱۱: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از جداسازی با قید اندازه‌ی دما برای ناحیه‌ی ۱..... ۷۷

شکل ۵. ۱۲: تصویر شدت پیوستار بزرگ شده مربوط به ناحیه‌ی ۲ (تصویر سمت چپ) و ماسک نهایی که نشان دهنده‌ی تفکیکی از نقاط تک مولفه‌ای (خانه‌های سفید) و دو مولفه‌ای (خانه‌های سیاه) است..... ۷۹

شکل ۵. ۱۳: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از وارونی تک مولفه‌ای برای ناحیه‌ی ۲..... ۸۰

شکل ۵. ۱۴: تصویر شدت پیوستار بزرگ شده مربوط به ناحیه‌ی ۳ (تصویر سمت چپ) و ماسک نهایی که نشان دهنده‌ی تفکیکی از نقاط تک مولفه‌ای (خانه‌های سفید) و دو مولفه‌ای (خانه‌های سیاه) است..... ۸۱

شکل ۵. ۱۵: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از وارونی تک مولفه‌ای برای ناحیه‌ی ۳..... ۸۲

شکل ۵. ۱۶: تصویر شدت پیوستار بزرگ شده مربوط به ناحیه‌ی ۴ (تصویر سمت چپ) و ماسک نهایی که نشان دهنده‌ی تفکیکی از نقاط تک مولفه‌ای (خانه‌های سفید) و دو مولفه‌ای (خانه‌های سیاه) است..... ۸۴

شکل ۵. ۱۷: مشخصه‌های اتمسفری حاصل از وارونی تک مولفه‌ای برای ناحیه‌ی ۴..... ۸۴

## فصل ۱

### لکه‌های خورشیدی

لکه‌های خورشیدی ساختارهای مغناطیسی تاریکی هستند که روی سطح خورشید ظاهر می‌شوند. هر لکه‌ی خورشیدی دارای یک هسته‌ی تاریک به نام سایه<sup>۱</sup> است که توسط یک ناحیه‌ی درخشان‌تر به نام نیم‌سایه<sup>۲</sup> احاطه شده است. حضور نیم‌سایه بین لکه‌های خورشیدی<sup>۳</sup> و لکه‌های خورشیدی<sup>۴</sup> که ساختارهای تاریک کوچک‌تری هستند و نیم‌سایه ندارند تمایز ایجاد می‌کند. شکل (۱.۱) تصویر دو لکه‌ی خورشیدی که در نوار  $G$  ( $4305 \text{ \AA}$ ) ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد. تصویر سمت چپ یک لکه‌ی منظم و تصویر سمت راست یک لکه‌ی پیچیده‌تر را نشان می‌دهد. مشاهده‌ی لکه‌های خورشیدی با چشم غیر مسلح در فرهنگ‌های مختلف وجود داشته است [۱۰]. برای اولین بار لکه‌های خورشیدی توسط گالیله در قرن ۱۷ میلادی به وسیله‌ی تلسکوپ دیده شدند. لکه‌های خورشیدی برجسته‌ترین نشانه‌های تمرکز میدان‌های مغناطیسی و اثر متقابل آن‌ها با پلاسمای خورشیدی هستند. نیم‌سایه‌ی لکه‌ها که ساختار ریز بسیاری دارند، موضوع بسیاری از تحقیقات رصدی و نظری هستند. با پیشرفت ابزارهای رصدی مشخص شده است که نیم‌سایه‌ی لکه‌ها دارای ساختار ریز بسیار بیش‌تری نسبت به آن‌چه در دهه‌های قبل تصور می‌شد هستند. بنابراین، نیم-سایه دارای الگوی شدت، ساختارهای مغناطیسی و فرایندهای مرموزی است که ما هنوز در ابتدای شناخت آن‌ها هستیم.

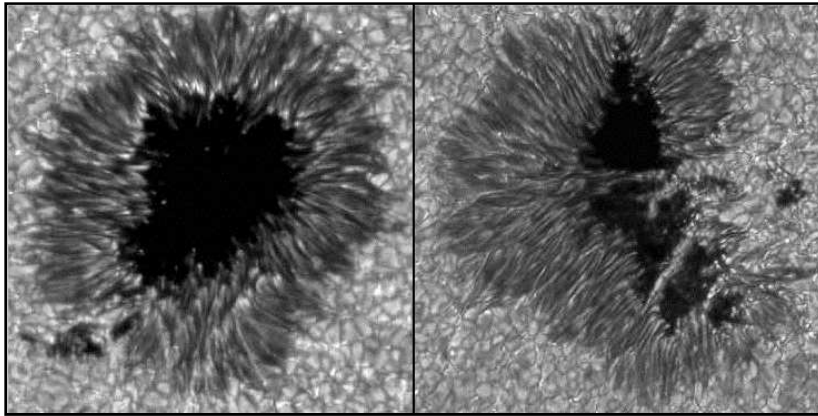
---

۱ . Umbra

۲ . Penumbra

۳ . Sunspot

۴ . Pore



شکل ۱-۱: تصاویر ثبت شده در نوار G یک لکه‌ی نسبتاً منظم (تصویر سمت چپ) و یک لکه‌ی پیچیده‌تر (تصویر سمت راست). بخش تاریک مرکزی لکه‌ها، سایه و نواحی روشن‌تر اطراف آن‌ها که به طور شعاعی حول سایه قرار دارند، نیم‌سایه نام دارد. خانه‌های درخشان اطراف لکه‌ها سلول‌های همرفتی گرانشی هستند. ناحیه‌ی تاریک کوچک خارج از لکه در تصویر سمت راست یک لک (pore) است.

## ۱-۱ ویژگی‌های کلی لکه‌های خورشیدی

### ۱-۱-۱ مکان و سیر تکاملی

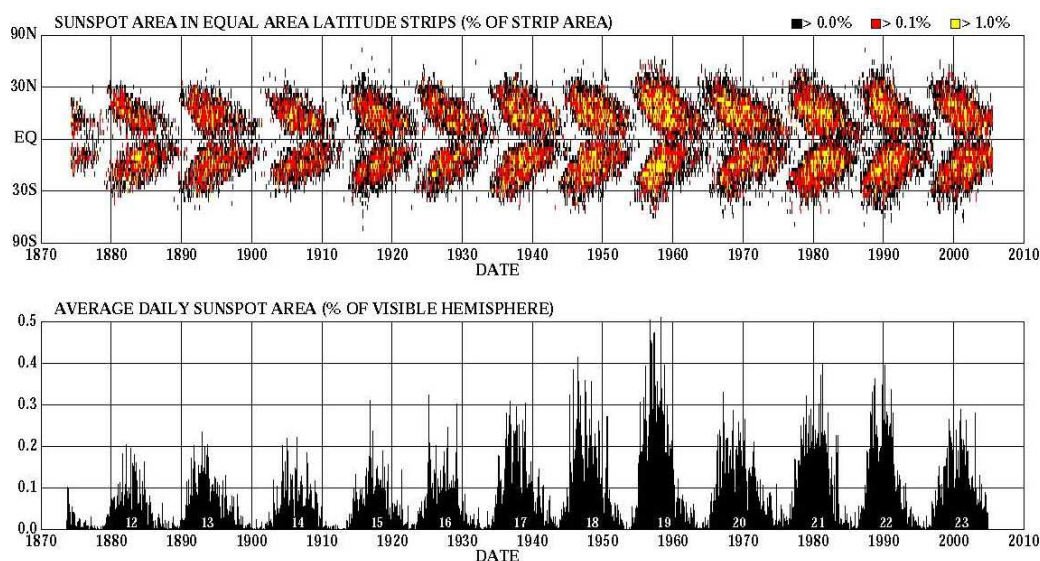
تعداد لکه‌ها با چرخه‌ی فعالیت خورشیدی تغییر می‌کند (که اولین بار توسط هنریک شوابه<sup>۱</sup> در سال ۱۸۴۳ کشف شد) [۵۴]. در کمینه‌ی فعالیت خورشیدی ممکن است هیچ لکه‌ای روی سطح خورشید دیده نشود؛ درحالی‌که در بیشینه‌ی فعالیت آن ممکن است بیش از ۱۰ لکه رصد شود. رصدهای روزانه‌ی لکه‌های خورشیدی با هدف شمارش تعداد لکه‌ها به وسیله‌ی ولف<sup>۲</sup>، که تعداد نسبی لکه‌های خورشیدی را معرفی کرد، شروع شدند [۱۵]. عدد ولف هنوز هم برای اندازه‌گیری میزان پوشش سطح خورشید توسط لکه‌ها استفاده می‌شود.

لکه‌های خورشیدی در نواحی فعال جای می‌گیرند که دارای ساختار مغناطیسی دوقطبی هستند. لکه‌های خورشیدی به کمربند فعالیت که تا  $40^\circ$  در دو طرف خط استوای خورشید کشیده شده است، محدود می‌شوند. عرض جغرافیایی لکه‌ها با چرخه‌ی فعالیت خورشیدی تغییر می‌کند. در ابتدای چرخه، آن‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا ( $40^\circ$  بالای استوا) ظاهر می‌شوند. در انتهای چرخه، لکه‌های جدید در عرض‌های جغرافیایی پایین ظاهر می‌شوند به طوری که آخرین لکه‌های خورشیدی یک چرخه، در نزدیکی خط استوا ظاهر می‌شوند. این وضعیت برای اولین بار توسط کارینگتون<sup>۳</sup> در سال ۱۸۶۳ شناخته شد که می‌توان آن را در نموداری به نام نمودار پروانه‌ای نمایش داد (شکل ۲.۱) [۱۱]. به طور کلی شکل‌گیری لکه‌های خورشیدی به شکل‌گیری ناحیه‌های فعال بستگی دارد. هنگامی که شار مغناطیسی خروجی از سطح خورشید افزایش پیدا می‌کند، لکه‌های منفرد شروع به شکل‌گیری

۱. Henrich Schwabe

۲. Wolf

۳. Carrington



شکل ۱-۲: نمودار پروانه‌ای (تصویر بالا) و ثبت مساحت نسبی سطح پوشش داده شده توسط لکه‌ها (تصویر پایین). در تصویر بالا محور عمودی عرض جغرافیایی خورشید و محور افقی زمان را نشان می‌دهند. اگر یک لکه یا یک گروه از لکه‌ها در یک بازه‌ی زمانی در یک محدوده‌ی عرض جغرافیایی قرار داشته باشند، این بخش از نمودار هاشور خورده است، که رنگ‌ها نشان دهنده‌ی مساحتی هستند که توسط این لکه‌های خورشیدی پوشش داده شده‌اند.

می‌کنند. سپس این لکه‌ها بزرگ می‌شوند و هم‌زمان به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند و به هم می‌پیوندند و یک لکه‌ی بزرگ‌تر را ایجاد می‌کنند. هنگامی که قطر یک لکه بیش‌تر از ۳٫۵ Mm می‌شود، نیم‌سایه می‌تواند شکل بگیرد. نیم‌سایه به صورت قطاع قطاع اطراف سایه تشکیل می‌شود تا به طور کامل آن را احاطه کند [۵۲]. به محض این که لکه به طور کامل شکل گرفت، شروع به واپاشی می‌کند.

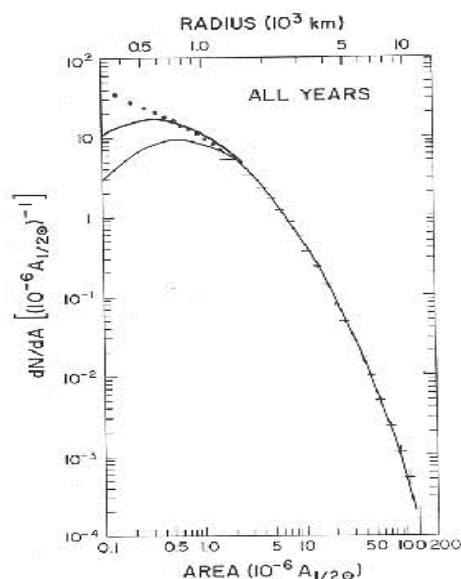
### ۱-۲-۱ ابعاد و طول عمر

ابعاد لکه‌های خورشیدی از قطر ۳۵۰۰ کیلومتر برای کوچک‌ترین لکه‌ها تا ۶۰۰۰۰ کیلومتر برای لکه‌های بزرگ تغییر می‌کند [۱۰]. لکه‌های کوچک‌تر بیش‌تر از لکه‌های بزرگ دیده می‌شوند. شکل (۳.۱) توزیع اندازه‌ی لکه‌ها را نشان می‌دهد [۵].

مقیاس زمانی شکل‌گیری لکه‌ها از چند ساعت تا چندین روز است. لکه‌های خورشیدی می‌توانند از چند ساعت تا چند ماه عمر کنند. طول عمر به طور خطی با بیشینه‌ی اندازه‌ی لکه افزایش می‌یابد. به این قانون، قانون Gnevyshev-Waldmeier می‌گویند:

$$A_0 = WT \quad (1.1)$$

که  $A_0$  بیشینه‌ی اندازه‌ی لکه،  $T$  طول عمر و  $W=10 \cdot \text{MSH/day}$  (MSH: a Millionth Solar Hemisphere) است [۶۷، ۱۷].



شکل ۱. ۳: طیف دیفرانسیلی اندازه‌ی مساحت برای مجموعه‌ای از داده‌های ویلسون<sup>۱</sup> (۲۴۶۱۵ لکه‌ی خورشیدی) (صلیب‌ها). اندازه‌های کوچک غیر قابل اطمینان توسط دایره‌های تو پر مشخص شده‌اند.

### ۳-۱-۱ درخشندگی و ساختار حرارتی

لکه‌های خورشیدی تاریک‌تر از سطح معمول خورشید (خورشید آرام) هستند. تاریک‌ترین بخش لکه (سایه) تقریباً ۲۰٪ و ناحیه‌ی درخشان‌تر (نیم‌سایه) تقریباً ۸۰٪ شار انرژی خورشید آرام را تابش می‌کند.

دمای موثر سایه حدود ۳۹۰۰ کلوین، نیم‌سایه ۵۴۰۰ کلوین و دمای موثر شیدسپهر آرام خورشید ۵۷۸۰ کلوین است. دماهای کم‌تر به دلیل جلوگیری از انتقال انرژی همرفتی توسط میدان‌های مغناطیسی ایجاد می‌شوند. درخشندگی و در نتیجه دمای لکه‌ی خورشیدی، تابعی از موقعیت و مکان در سطح لکه است و در مقیاس‌های بزرگ (سایه و نیم‌سایه) و کوچک (خال‌های سایه‌ای درخشان، رشته‌های تاریک و روشن نیم‌سایه‌ای و دانه‌های نیم‌سایه‌ای) تغییر می‌کند.

### ۴-۱-۱ میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی لکه‌های خورشیدی برای اولین بار توسط هیل<sup>۲</sup> در سال ۱۹۰۸ [۲۰، ۲۱] اندازه‌گیری شد. از آن زمان به بعد، میدان مغناطیسی دلیل اصلی تشکیل لکه‌های خورشیدی در نظر گرفته شده است.

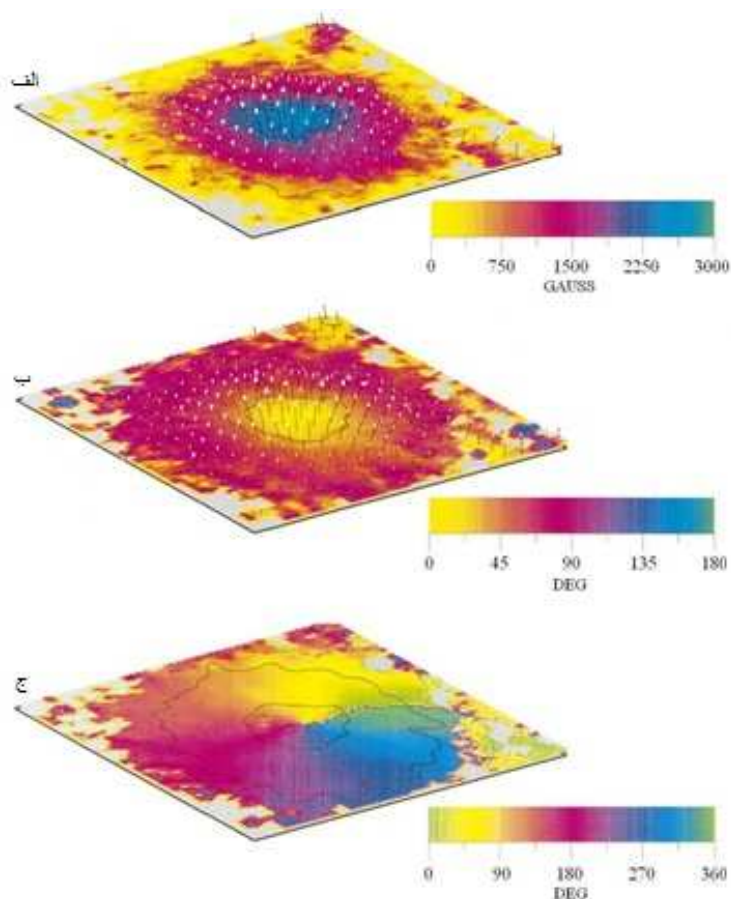
میدان مغناطیسی لکه‌های خورشیدی را می‌توان از شکافتگی زیمان خطوط جذبی در نور مرئی و فروسرخ محاسبه کرد. برای لکه‌های منظم که مرکز سایه متناظر با تاریک‌ترین بخش سایه است،

۱. Wilson

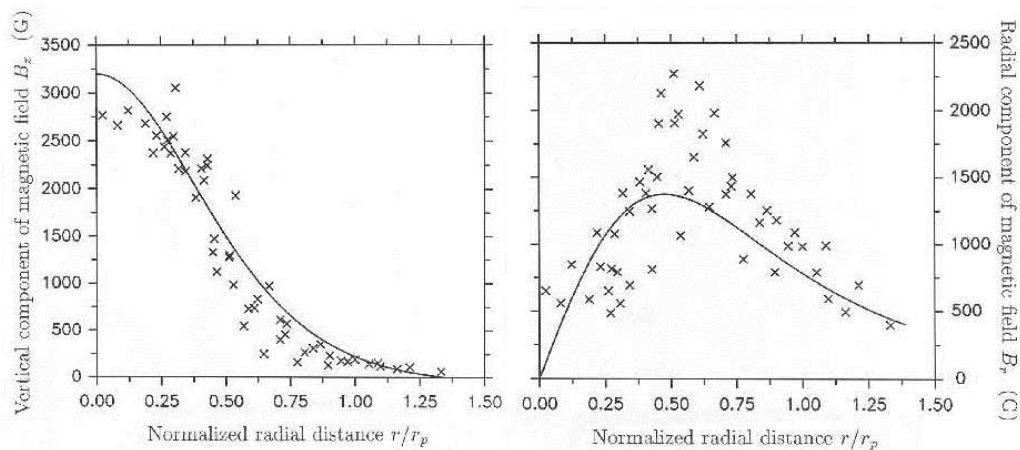
۲. Hale



بزرگی میدان مغناطیسی در نزدیکی مرکز هندسی سایه به بیش از ۳۷۰۰ گاوس می‌رسد. مثالی از میدان مغناطیسی در یک لکه‌ی دایره‌ای در شکل (۴.۱) نشان داده شده است. بزرگی میدان مغناطیسی (شکل ۴.۱ الف) به طور شعاعی از مرکز لکه به سمت خارج آن بدون هیچ جهشی در مرکز سایه-نیم‌سایه کاهش می‌یابد [۷۰]. شکل (۵.۱) تغییرات مولفه‌ی شعاعی و عمودی میدان مغناطیسی را در راستای شعاعی نشان می‌دهد. اندازه‌ی میدان مغناطیسی با ارتفاع کاهش می‌یابد. میدان مغناطیسی در نواحی مرکزی سایه عمودی است و در مرز بیرونی لکه تقریباً افقی می‌شود (شکل ۴.۱ ب). رصدها نشان داده‌اند که میدان مغناطیسی لکه‌های منظم به طور قابل توجهی پیچ خورده‌اند (شکل ۴.۱ ج).



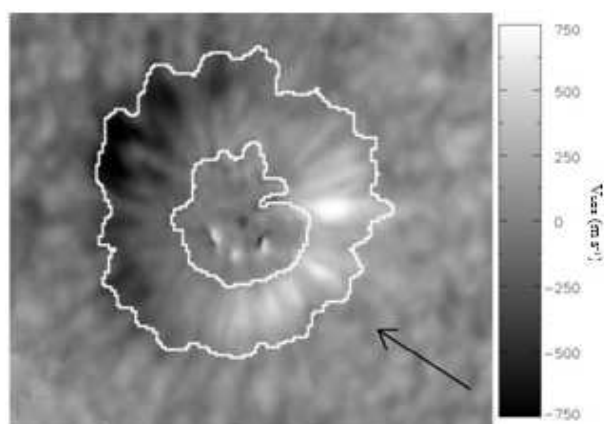
شکل ۴.۱: خصوصیات مغناطیسی لکه‌ی منظم، بزرگی میدان مغناطیسی (الف)، زاویه انحراف (ب) و زاویه سمتی (ج) میدان مغناطیسی. پیکان‌ها جهت بردار میدان مغناطیسی و طول آن‌ها متناسب با اندازه‌ی میدان مغناطیسی است. خط‌های سایه-نیم‌سایه و نیم‌سایه-خورشید آرام را نشان می‌دهند [۷۰].



شکل ۵. ۱: ضربدرها مقادیر رصد شده و منحنی‌ها برازش به داده‌ها را نشان می‌دهند.  $B_z$  مولفه‌ی عمودی (تصویر سمت چپ) و  $B_r$  مولفه‌ی شعاعی (تصویر سمت راست) بردار میدان مغناطیسی هستند.  $r$  مولفه‌ی شعاعی است که از مرکز هندسی لکه اندازه‌گیری می‌شود و  $r_p$  شعاع بیرونی نیم‌سایه است [۶۱].

### ۵-۱-۱ میدان سرعت

ساختار سرعت لکه‌ها تاحدی شبیه به ساختار میدان مغناطیسی آن‌ها است. توضیح ساختار سایه در مقابل ساختار نیم‌سایه که پیچیده‌تر است، خیلی ساده‌تر است. سایه دارای میدان مغناطیسی قوی و پایا است که پلازما در آن یخ زده است. بنابراین در مقیاس‌های بزرگ هیچ حرکت قابل توجهی در سایه دیده نمی‌شود. معمولاً سایه به عنوان مرجع سرعت صفر در نظر گرفته می‌شود. نشانه‌ی رفتار دینامیکی نیم‌سایه، اثر اورشد است [۱۶]. اثر اورشد شامل یک انتقال به آبی خطوط طیفی شیدسپهری در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز و یک انتقال به قرمز در نیم‌سایه‌ی سمت لبه است [۱۸، ۴۷، ۷۱]. اندازه‌ی سرعت از نیم‌سایه‌ی داخلی به سمت مرز بیرونی آن افزایش می‌یابد. مثالی از جریان اورشد در یک لکه‌ی منظم در شکل (۶.۱) نشان داده شده است.

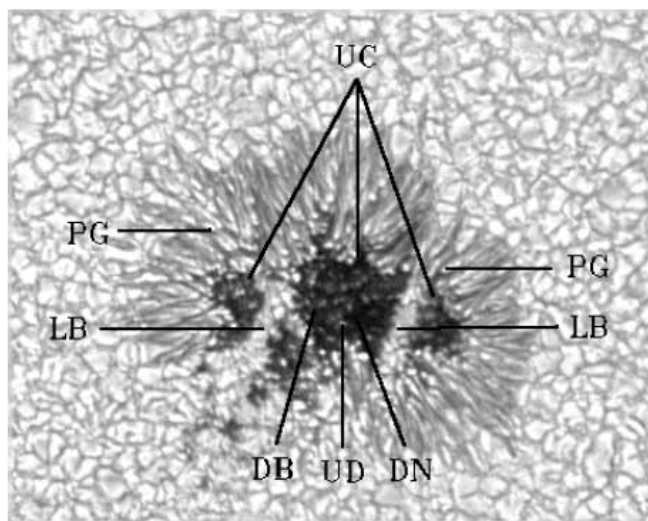


شکل ۶. ۱: تصویر انتقال دوپلر مرکز یک خط طیفی در یک لکه‌ی منظم. خطوط سفید مرز سایه-نیم‌سایه و نیم‌سایه-خورشید آرام را مشخص می‌کنند. فلش به سمت مرکز قرص خورشید اشاره می‌کند. انتقال به آبی (سیاه) در نیم‌سایه‌ی سمت مرکز و انتقال به سرخ (سفید) در نیم‌سایه‌ی سمت لبه نشان دهنده‌ی جریان اورشد است.

## ۲-۱ ساختار ریز لکه‌های خورشیدی

هنگامی که لکه‌های خورشیدی را در توان تفکیک مکانی بهتر از ۱ ثانیه قوس رصد کنیم، ساختارهای ریز بسیاری را در آن‌ها خواهیم دید. همان‌طور که در شکل (۷.۱) مشخص شده است، ساختارهای ریز یک لکه‌ی خورشیدی عبارتند از:

- هسته‌های سایه‌ای (UC)<sup>۱</sup>: سایه‌های منفردی که توسط پل‌های درخشان از هم جدا شده‌اند.
  - دانه‌های نیم‌سایه‌ای (PG)<sup>۲</sup>: ساختارهای درخشان و نقطه‌مانندی که در نیم‌سایه‌ی درونی (بیرونی) جایگزیده‌اند و به سمت سایه (خورشید آرام) حرکت می‌کنند.
  - پل‌های درخشان (LB)<sup>۳</sup>: تنگه‌هایی از پلاسمای درخشان که دو هسته‌ی سایه‌ای را از هم جدا می‌کنند.
  - هسته‌های تاریک (DN)<sup>۴</sup>: تاریک‌ترین بخش سایه که تقریباً بدون ساختار هستند.
  - خال‌های سایه‌ای (UD)<sup>۵</sup>: ساختارهای نقطه‌ای شکل درخشان درون سایه.
  - زمینه‌ی پخشی (DB)<sup>۶</sup>: نواحی تاریک بین خال‌های سایه‌ای.
- علاوه بر ساختارهای نام برده شده، رشته‌های تاریک و روشن نیم‌سایه‌ای که بیش‌تر نیم‌سایه را تشکیل می‌دهند نیز در شکل (۷.۱) کاملاً مشخص هستند.



شکل ۷.۱: ساختار ریز یک لکه‌ی خورشیدی برگرفته از مقاله‌ی سوبوتکا<sup>۷</sup> [۵۹].

- 
۱. Umbral Core
  ۲. Penumbra Grain
  ۳. Light Bridge
  ۴. Dark Nucleus
  ۵. Umbral Dot
  ۶. Diffused Background
  ۷. Sobotka

## ۱-۲-۱ ساختار ریز سایه

برجسته‌ترین ساختار ریز در سایه، ساختارهای درخشانی هستند که به آن‌ها خال‌های سایه‌ای می‌گویند. خال‌های سایه‌ای ساختارهای درخشان کوچکی هستند که در زمینه‌ی تاریک سایه (زمینه‌ی پخشی) قرار گرفته‌اند. تاریک‌ترین بخش زمینه‌ی پخشی که تقریباً هیچ خال درخشانی در آن دیده نمی‌شود را هسته‌ی تاریک می‌نامند.

خال‌های سایه‌ای ۱۰-۳٪ مساحت سایه را پوشش می‌دهند و ۱۰-۲۰٪ در درخشندگی کل سایه سهم هستند [۵۷]. تعداد خال‌های سایه‌ای با افزایش درخشندگی زمینه‌ی سایه افزایش می‌یابد؛ یعنی در نواحی درخشان‌تر سایه تعداد خال‌ها بیشتر است.

هسته‌ی تاریک سایه ۱۰-۲۰٪ مساحت سایه را در بر می‌گیرد و شدت پیوستار این ناحیه ۰٫۳-۰٫۵ شدت پیوستار خورشید آرام است. اندازه‌ی متوسط این ناحیه حدود ۱٫۵ ثانیه قوس است [۵۹]. خال‌های سایه‌ای را بر اساس موقعیت‌شان در داخل سایه به دو گروه خال‌های سایه‌ای مرکزی (CUD)<sup>۱</sup>، که در نواحی داخلی سایه قرار دارند و خال‌های سایه‌ای محیطی (PUD)<sup>۲</sup>، که در نزدیکی مرز سایه-نیم‌سایه قرار دارند و معمولاً درخشان‌تر از خال‌های مرکزی هستند تقسیم‌بندی می‌کنند [۱۹].

خال‌های سایه‌ای محیطی (نزدیک مرز سایه-نیم‌سایه) جریان‌های رو به بالای قوی و میدان‌های مغناطیسی ضعیف‌تر و خمیده‌تری نسبت به خال‌های سایه‌ای مرکزی دارند و در خال‌های سایه‌ای مرکزی هیچ علامت محسوسی از سرعت در راستای خط دید دیده نشده است [۲۵، ۳۹، ۵۶]. خال‌های سایه‌ای محیطی با سرعت‌های افقی حدود  $360 \text{ m/s}$  به سمت مرکز سایه حرکت می‌کنند [۵۶]. ساختار دیگری که در سایه دیده می‌شود، پل‌های درخشان هستند. پل‌های درخشان تنگه‌های درخشانی هستند که سایه را به دو قسمت تقسیم می‌کنند. پل‌های درخشان میدان مغناطیسی ضعیف‌تری نسبت به سایه‌ی اطراف‌شان دارند به طوری که بیش از ۲۰٪ ماده در پل‌های درخشان میدان آزاد هستند [۲۹]. همچنین میدان مغناطیسی در پل‌های درخشان خمیده‌تر از سایه‌ی اطراف آن‌ها است.

پل‌های درخشان را بر اساس ساختارشان به دو نوع نیم‌سایه‌ای (رشته‌ای) و شیدسپهری (گرانولی) تقسیم‌بندی می‌کنند [۵۸]. پل‌های درخشان نیم‌سایه‌ای، ساختار ریز رشته‌ای دارند و بخش‌های سایه‌ای با قطبش‌های مخالف را از هم جدا می‌کنند. پل‌های درخشان شیدسپهری دارای ساختار ریزی شبیه گرانول‌های شیدسپهری هستند. پل‌های درخشان کم نور، شامل تعدادی خال سایه‌ای هستند که به صورت یک تنگه‌ی باریک در سایه کنار هم قرار گرفته‌اند [۳۶]. رصدهای انجام شده توسط

---

۱. Central Umbral Dot

۲. Peripheral Umbral Dot