جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

فهرست خدمات و راهنمای مطالعات دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی

نشریه شماره ۶۱۵

وزارت صنعت، معدن و تجارت

معاونت امور معادن و صنایع معدنی

دفتر نظارت و بهره‌برداری

http://www.mimt.gov.ir

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

Nezamfanni.ir

۱۳۹۱

بسمه‌تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره: ۹۱/۱۰۸۵۴۹
	تاریخ: ۱۳۹۱/۱۲/۱۹

موضوع : فهرست خدمات و راهنمای مطالعات دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویبنامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۶۱۵ امور نظام فنی، با عنوان «**فهرست خدمات و راهنمای مطالعات دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی**» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۲/۵/۱ اجباری است.

بهروز مرادی

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- *شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.*

۲- *ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.*

۳- *در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.*

٤- *نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.*

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علیشاه، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی ، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email:info@nezamfanni.ir **web: http://nezamfanni.ir**

بسمه تعالی

پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره۴۲۳۳۹/ ت ۳۳۴۹۷ ه مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تاکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرحهای توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. دورسنجی یکی از جدیدترین و موثرترین روش‌های تولید انبوه داده‌های مرتبط با زمین است. کشور ایران با خاک وسیع، منابع سرشار زمینی، پوسته فعال، زمین‌شناسی پیچیده و قرارگیری در کمربند خشک کره زمین، برای به کارگیری توانمندی‌های متنوع و یکتای فناوری دورسنجی مناسب است.

دورسنجی منبع تولید اطلاعات سطحی و مکمل سایر داده‌های علوم زمین است. سرعت تولید داده در دورسنجی بسیار بالا و هزینه آن بسیار پایین است. دورسنجی عمدتا از فاصله دور داده‌ها را برداشت می‌کند، اما برای واسنجی (کالیبراسیون)، هدایت پردازش‌ها و ارزیابی نتایج نیازمند داده‌های زمینی یا "طیف‌سنجی زمینی" نیز است. بنابراین دورسنجی در پی بهینه‌سازی نحوه استفاده از منابع محدود مالی و انسانی از طریق هدایت هوشمندانه آن‌ها به مناطق کوچکتر و مستعدتر است.

با وجود قدمت چندین ساله به کارگیری داده‌های دورسنجی در بررسی‌های زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی، خلا ناشی از نبود رویه‌ای استاندارد و جامع، استفاده‌های نامناسب و سلیقه‌ای از این داده‌ها را به دنبال داشته که حاصل آن اغراق در توانایی‌های دورسنجی و یا به کل، نادیده انگاشتن آن بوده است. نشریه حاضر گام نخست برای هماهنگی و استانداردسازی زنجیره تهیه، پردازش، تحلیل، تفسیر و اعتبارسنجی این داده‌ها در زمین‌شناسی و اکتشاف است. هدف اصلی این نشریه کمک به بهره‌برداری بهینه از پتانسیل دورسنجی در علوم زمین از طریق تعریف چارچوب‌های نظری و عملی، حدود و راهبردها برای تمامی مراحل است.

در نشریه "فهرست خدمات و راهنمای مطالعات دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی" سعی شده در هر بخش ضمن مرحله‌بندی و تعیین استانداردها و انتظارات، زمینه علمی موضوع نیز به اختصار بررسی شود. بخش‌هایی مانند زمین‌شناسی طیفی و یا مدل کانی‌سازی به دلیل تازگی و یا اهمیت ویژه با تفصیل بیشتری بحث شده‌اند. در کنار داده‌های چندطیفی فضابرد، به داده‌های فراطیفی هوابرد، حرارتی، راداری و ژئوفیزیکی نیز پرداخته شده و توجه خاصی به مبحث طیف‌سنجی زمینی شده است.

با همه‌ی تلاش انجام شده قطعا هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که إن‌شاءا... کاربرد عملی و در سطح وسیع این نشریه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود.

در پایان، از تلاش و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی همچنین جناب آقای مهندس وجیها... جعفری مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

معاون نظارت راهبردی

اسفند ۱۳۹۱

مجری طرح

آقای وجیها... جعفری	معاون امور معادن و صنایع معدنی – وزارت صنایع و معادن

تهیه پیش‌نویس اصلی

خانم سیمین مهدیزاده‌تهرانی	آقای سعید اسدزاده

اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

خانم فرزانه آقارمضانعلی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
آقای بهروز برنا	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
آقای وجیه ا... جعفری	وزارت صنایع و معادن	کارشناس مهندسی معدن
آقای عبدالعلی حقیقی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای عبدالرسول زارعی	وزارت صنایع و معادن	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای ناصر عابدیان	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای هرمز ناصرنیا	سازمان نظام مهندسی معدن	کارشناس ارشد مهندسی معدن

اعضای کارگروه اکتشاف به ترتیب حروف الفبا

علی اصغرزاده	سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران	کارشناس ارشد مهندسی معدن
بهروز برنا	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
نعمتا... رشیدنژاد عمران	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای پترولوژی
ناصر عابدیان	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
عبدالمجید یعقوب‌پور	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

آقای مهدی ایران‌نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
آقای مصطفی شریف‌زاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی مکانیک سنگ
علیرضا غیاثوند	وزارت صنعت، معدن و تجارت	کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای بهزاد مهرابی	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی

اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

خانم فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی
آقای علیرضا فلسفی	کارشناس عمران امور نظام فنی
آقای علیرضا غیاثوند	رئیس گروه ضوابط و معیارهای معاونت امور معادن و صنایع معدنی

فهرست

عنوان **صفحه**

فصل اول- ارتباط دورسنجی با اکتشاف مواد معدنی

۱-۱- آشنایی ۳

۱-۲- مفاهیم کلیدی دورسنجی ۳

۱-۳- کاربردهای دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی ۶

۱-۳-۱- الگوی کانی‌شناسی ۶

۱-۳-۲- الگوی سنگ‌شناسی ۶

۱-۳-۳- الگوی هندسی- ساختمانی ۷

۱-۴- راهبردهای استفاده از دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی ۷

۱-۵- مدل فلززایی و کانساری ۱۲

۱-۵-۱- مدل فلززایی ۱۳

۱-۵-۲- مدل کانساری ۱۳

۱-۵-۳- مرور مدل‌های کانساری ۱۴

۱-۶- زمین‌شناسی طیفی ۱۷

۱-۷- زمین‌شناسی تصویری (فتوژئولوژی) ۱۹

فصل دوم- انواع داده‌های ماهواره‌ای

۲-۱- آشنایی ۲۳

۲-۲- وضوح زمانی و تاریخ تصویر ۲۳

۲-۳- وضوح مکانی و مقیاس تصویر ۲۴

۲-۴- تعداد باند طیفی ۲۵

۲-۵- مرور انواع داده‌های دورسنجی ۲۶

۲-۵-۱- ماهواره‌های منابع زمینی ۲۶

۲-۵-۲- داده‌های فرامکانی ۳۱

۲-۵-۳- داده‌های فراطیفی ۳۶

۲-۵-۴- داده‌های راداری ۳۸

۲-۵-۵- سایر داده‌های دورسنجی ۳۹

۲-۵-۶- آینده داده‌های دورسنجی ۴۰

۲-۶- معیارها و استانداردهای انتخاب داده‌های ماهواره‌ای ۴۰

۲-۷- جستجو و سفارش تصاویر ۴۰

۲-۷-۱- سفارش خرید از آرشیو تصاویر ۴۰

۲-۷-۲- سفارش اخذ داده جدید ۴۱

فصل سوم- استانداردهای پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

۳-۱- آشنایی ۴۵

۳-۲- تصحیح هندسی ۴۵

۳-۲-۱- تصحیح دوبعدی (زمین‌مرجع‌سازی) ۴۷

۳-۲-۲- تصحیح سه‌بعدی (متعامدسازی) ۴۷

۳-۲-۳- گردآوری نقاط کنترل زمینی ۴۸
۳-۲-۴- انتخاب مدل رقومی ارتفاع ۴۹
۳-۲-۵- اعمال تصحیح هندسی بر تصویر ۵۰
۳-۳- تصحیحات رادیومتری ۵۱
۳-۳-۱- واسنجی باندها ۵۱
۳-۳-۲- تصحیح اتمسفری ۵۱
۳-۳-۳- تصحیح توپوگرافی ۵۳
۳-۳-۴- سایر تصحیحات رادیومتری ۵۳
۳-۴- کاهش نویز تصاویر ۵۳
۳-۵- موزاییک کردن (یکپارچه‌سازی) تصاویر ۵۴
۳-۶- واضح‌سازی تصاویر ۵۴
۳-۷- سایر موارد پیش‌پردازش ۵۵
فصل چهارم- استانداردهای پردازش داده‌های دورسنجی
۴-۱- آشنایی ۵۹
۴-۲- تعبیر و تفسیر چشمی تصاویر دورسنجی ۵۹
۴-۲-۱- آشکارسازی و ساخت ترکیبات رنگی ۵۹
۴-۲-۲- فتوژئولوژی برای تهیه نقشه زمین‌شناسی اولیه ۶۰
۴-۳- پردازش طیفی داده‌های ماهواره‌ای برای برداشت کانی‌ها ۶۲
۴-۳-۱- بررسی و تعیین کانی‌های هدف ۶۲
۴-۳-۲- کاهش ابعاد داده و تبدیلات ۶۳
۴-۳-۳- الگوریتم‌های پردازش طیفی ۶۳
۴-۳-۴- نقشه فراوانی کانی‌ها ۶۴
۴-۴- شناسایی تغییرات ۶۵
۴-۵- تولید و پردازش مدل رقومی ارتفاع ۶۶
۴-۵-۱- فتوگرامتری رقومی تصاویر ماهواره‌ای ۶۶
۴-۵-۲- استفاده از تصاویر راداری SAR ۶۷
۴-۵-۳- فناوری LiDAR ۶۸
۴-۵-۴- درون‌یابی نقشه‌های کنتوری ۶۸
۴-۶- پردازش داده‌های راداری ۶۸
۴-۷- پردازش داده‌های ژئوفیزیکی ۶۹
فصل پنجم- استانداردهای ساخت پایگاه داده‌های مکانی، تفسیر و تلفیق اطلاعات
۵-۱- آشنایی ۷۳
۵-۲- اهمیت و نقش GIS در زمین‌شناسی و اکتشاف ۷۳
۵-۳- ساخت پایگاه داده مکانی ۷۳
۵-۴- تفسیر و اعتبارسنجی اطلاعات اکتشافی ۷۴
۵-۴-۱- تفسیر کانی‌شناسی ۷۴
۵-۴-۲- تحلیل ساختاری ۷۵

۵-۴-۳- تفسیر سنگ‌شناسی ۷۵
۵-۴-۴- ارتباط دورسنجی با ژئوفیزیک و ژئوشیمی ۷۵
۵-۵- تلفیق اطلاعات اکتشافی ۷۶
۵-۶- رده‌بندی و انتخاب آنومالی‌های اکتشافی ۷۶
۵-۷- استانداردهای خروجی‌گیری و نمایش اطلاعات استخراجی ۷۷
۵-۷-۱- نقشه و عکس- نقشه ۷۷
۵-۷-۲- جدول‌ها و متون ۷۷
۵-۷-۳- خروجی‌های چندرسانه‌ای ۷۸
فصل ششم- طیف‌سنجی زمینی
۶-۱- آشنایی ۸۱
۶-۲- طیف‌سنجی زمینی ۸۲
فصل هفتم- فهرست خدمات دورسنجی
۷-۱- مرور کلی داده‌های ماهواره‌ای ۸۷
۷-۲- بررسی فرآیندی کاربردهای دورسنجی ۸۸
۷-۳- فهرست خدمات دورسنجی در مراحل مختلف اکتشافی ۹۳
۷-۳-۱- فهرست خدمات دورسنجی در مرحله شناسایی ۹۳
۷-۳-۲- فهرست خدمات دورسنجی در مرحله پی‌جویی ۹۵
۷-۳-۳- فهرست خدمات دورسنجی در مرحله اکتشاف عمومی ۹۷
۷-۳-۴- فهرست خدمات دورسنجی در مرحله اکتشاف تفصیلی ۱۰۰
پیوست

فصل ۱

ارتباط دورسنجی با اکتشاف مواد معدنی

۱-۱- آشنایی

یکی از مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در تولید داده‌های علوم زمین، بر میدان‌های پتانسیل و انرژی الکترومغناطیسی استوار است. روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان‌های پتانسیل نظیر مغناطیس‌سنجی[۱] و گرانی‌سنجی[۲] هستند، در حالی که روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی[۳] و پرتوسنجی[۴] در کنار روش‌های مدرن دورسنجی (بازتابی، حرارتی و راداری) همگی مبتنی بر اندازه‌گیری انرژی الکترومغناطیسی در تعامل با مواد عمقی و سطحی زمین یعنی سنگ‌ها در حالت عام و کانی‌ها و کانی‌سازی در حالت خاص هستند. روش‌های یاد شده که امکان به کارگیری آن‌ها بر روی سکوهای در حال حرکت مثل هواپیما نیز فراهم است، برداشت داده در گستره‌های وسیع را به آسانی میسر می‌کنند و از این رو مزیت ویژه‌ای در زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی دارند.

علاوه بر این، در دورسنجی امکان سنجش از فاصله خیلی دور یعنی با ماهواره و از فضا میسر است که این قابلیت منجر به برداشت پیوسته و کم هزینه داده‌ها می‌شود. همچنین اندازه‌گیری‌های این روش بر خلاف روش‌های نقطه‌ای[۵] ژئوفیزیکی (و ژئوشیمیایی) معرف یک سطح است. به عبارت دیگر، نمودار طیفی ثبت شده در هر پیکسل، ترکیبی خطی و گاه غیرخطی از بازتابش تمامی مواد موجود در آن سطح است. وسعت و دقت این سطح نه تنها قابل تنظیم است، بلکه محتوی طیفی پیکسل، شناسایی و تفکیک مواد از راه دور را نیز میسر می‌کند. ترکیبات رنگی تصاویر دورسنجی، زمین را به شکل واقعی و قابل درک برای چشم انسان (با تمامی اطلاعات توپوگرافی و مرفولوژی آن) نمایش می‌دهد و در نتیجه مشاهدات محدود زمینی به نواحی وسیع‌تر قابل تعمیم می‌شود.

در کنار این مزیت‌ها، دورسنجی محدودیت‌های عمده و ذاتی نیز دارد. در دورسنجی اندازه‌گیری‌ها محدود به چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر زیر سطح است. راه حل مناسب در این شرایط استفاده از مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی مثل مدل کانی‌سازی برای مرتبط ساختن عوارض سطحی با پدیده‌های عمقی است که البته همیشه با درجه معینی از ریسک همراه است.

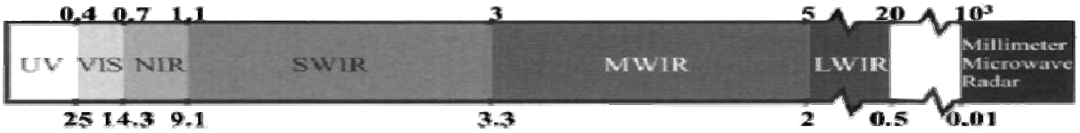
۱-۲- مفاهیم کلیدی دورسنجی

دورسنجی علم کسب اطلاعات درباره یک شی، محدوده و یا پدیده بدون تماس فیزیکی با آن است که به کمی‌سازی رفتار مواد در تعامل با انرژی الکترومغناطیسی می‌پردازد و بیشتر شامل سامانه‌های مشاهده زمین[۶] از بالا می‌شود.

سنجنده[۷] ابزار اندازه‌گیری و کمی‌سازی انرژی رسیده از زمین بر واحد سطح، بر واحد زمان و بر واحد طول موج ($w/m^2sr/\mu$) است که رادیانس[۸] نامیده می‌شود. حذف اثر اتمسفر و منبع انرژی (خورشید) از رادیانس ثبت شده داده بازتابی[۹] تولید می‌کند. محدوده

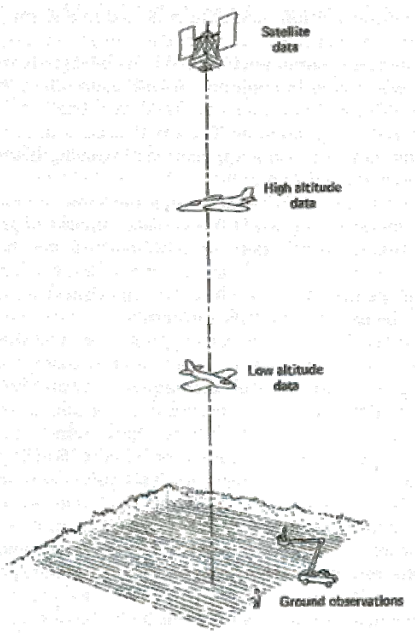
1- Magnetic surveying
2- Gravity surveying
3- Electromagnetic surveying
4- Radiometric surveying
5- Pinpoint
6- Earth observation systems
7- Sensor
8- Radiance
9- Reflectance

بازتابی شامل مریی (VIS)، مریی نزدیک (NIR) و مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) است (شکل ۱-۱). سنجنده‌های حرارتی، تشعشعات ارسالی از زمین در محدوده مادون قرمز طول موج متوسط و بلند (MWIR و LWIR) را انـدازه‌گیـری کـرده و داده‌هـای تابشی[1] تولید می‌کنند. سنجنده‌های راداری نیز در طول موج بیش از یک میلی‌متر فعال هستند. تغییرات انرژی ثبت شده، تابعی از نوع ماده، ترکیب شیمیایی و برخی ویژگی‌های فیزیکی آن و مبنای شناسایی و تفکیک مواد مختلف در سطح است.



شکل ۱-۱- بخش‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی بر اساس طول موج (حاشیه بالا) و فرکانس (حاشیه پایین)

سنجنده‌های هوابرد[2] بر روی سکوی[3] متحرک در ارتفاع کم (در حد ده‌ها کیلومتر) نصب می‌شوند (شکل ۱-۲). این سکوها بیشتر شامل انواع هواپیماهای سبک و بالگردها هستند. محدودیت عمده آن‌ها امکان برداشت داده در حد چندین روز (ناپیوسته) است.



شکل ۱-۲- سکوهای متداول دورسنجی و تقسیم‌بندی آن‌ها بر اساس ارتفاع از سطح زمین

سنجنده‌های فضابرد[4] در مدارهای خارج از جو و در ارتفاع بین چند صد تا چند هزار کیلومتری بر روی ماهواره‌ها نصب می‌شـوند. ویژگی‌های عمده آن‌ها دوره طولانی (چند ساله) و پیوسته برداشت، ارتفاع تقریبا ثابت نسبت به سـطح زمـین و نداشـتن محـدودیت

1- Emittance
2- Airborne
3- Platform
4- Spaceborne

جغرافیایی، سیاسی و طبیعی است. شاخص‌های مداری ماهواره شامل ارتفاع زاویه تمایل، دوره برداشت[۱]، زمان بازدید مجدد و قابلیت جهت‌گیری یا نشانه‌روی[۲] است.

شاخص‌ها و پارامترهای زیر برای توصیف و بیان عملکرد سنجنده‌ها به کار می‌رود:

– وضوح مکانی[۳]، اندازه پیکسلی[۴] یا فاصله نمونه‌برداری زمینی[۵]

– وضوح طیفی[۶] که شاخص توانایی یک سنجنده برای تفکیک عوارض طیفی است و متاثر از بازه طیفی[۷] و پهنای طیفی باند[۸] است.

– وضوح رادیومتری[۹] یا نسبت سیگنال به نویز[۱۰] (اختلاف بین رادیانس واقعی و رادیانس اندازه‌گیری شده یا نسبت بین میانگین سیگنال به واریانس آن)

– وضوح زمانی[۱۱] یا زمان بازدید مجدد (چابکی یک سنجنده در تصویربرداری از یک نقطه ثابت از زمین طی دوره‌های زمانی متوالی)

سنجنده‌ها بر اساس تعداد باند و وضوح طیفی به گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

– سنجنده‌های چند طیفی[۱۲] (با چند باند طیفی)

– سنجنده‌های فوق طیفی[۱۳] (با چندین تا چند ده باند طیفی، طراحی شده برای کاربردهای خاص)

– سنجنده‌های فراطیفی[۱۴] یا طیف‌سنج تصویری[۱۵] (با چند صد باند طیفی، چند منظوره)

– سنجنده‌های ماوراطیفی[۱۶] (با چند هزار باند طیفی، مطالعه گازهای اتمسفر)

سنجنده‌های فراطیفی قادرند با اندازه‌گیری انرژی در باندهای باریک و پرشمار، طیف پیوسته‌ای مشابه انواع آزمایشگاهی یا زمینی (طیف‌سنج‌های قابل حمل) برای هر پیکسل تصویر ثبت کرده و امکان مطالعه طیفی مواد درون هر پیکسل را فراهم کنند.

1- Period
2- Pointing capability
3- Spatial resolution
4- Pixel size
5- Ground sampling distance (GSD)
6- Spectral resolution
7- Spectral range
8- Spectral bandwidth
9- Radiometric resolution
10- Signal to noise ratio
11- Temporal resolution
12- Multispectral scanner
13- Superspectral scanner
14- Hyperspectral scanner
15- Imaging spectrometry
16- Ultraspectral scanner

۱-۳- کاربردهای دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی

مطالعات زمین‌شناسی و پروژه‌های اکتشافی در هر مرحله و مقیاسی برای کسب اطلاع و کمی‌سازی دو یا سه‌بعدی الگوهای چهارگانه زیر به انجام می‌رسند:

- الگوی توزیع عناصر
- الگوی کانی‌شناسی
- الگوی سنگ‌شناسی
- الگوی هندسی- ساختمانی

با این دیدگاه داده‌های ژئوشیمیایی برای تعیین الگوی توزیع عناصر و داده‌های مغناطیسی برای یافتن الگوی گسترش عمقی توده‌های ماگمایی کاربرد دارند. سیر نزولی ارزش اطلاعاتی این توالی با سیر صعودی هزینه کسب اطلاعات رابطه عکس دارد. به همین دلیل استخراج اطلاعات عنصری و کانی‌شناسی در مراحل تکمیلی‌تر دنبال می‌شود. دورسنجی با توانایی‌های بالقوه در کمی‌سازی سه الگو از چهار الگوی یاد شده، در اکتشاف یا زمین‌شناسی برای کاهش حجم و هزینه‌های عملیات زمینی و افزایش احتمال موفقیت (در اکتشاف) به شرح زیر مطلوب است:

۱-۳-۱- الگوی کانی‌شناسی

کانی‌ها معرف محیط‌های خاص زمین‌شناسی مانند هوازدگی، دگرسانی، اکسیداسیون- احیا، رسوب‌گذاری و پهنه‌های دگرگونی هستند. به کمک داده‌های چندطیفی/ فراطیفی می‌توان پارامترهای زیر را در مورد وضعیت کانی‌شناسی کمی کرد:

- شناسایی گروه‌های مختلف کانی‌ها و تعیین الگو و موقعیت مکانی زون‌ها[1]، فراوانی نسبی[2] و همراهی کانی‌ها[3]
- کمی‌سازی ترکیب و درجه تبلور کانی‌ها
- نقشه‌برداری موقعیت مکانی رگه‌ها و پرشدگی‌های معدنی

نقشه‌های کانی‌شناسی به این معنا، حلقه گمشده بخش زمین‌شناسی و به ویژه اکتشافی هستند. این اطلاعات در کمی‌سازی شرایط کانی‌شناختی، ژئوشیمیایی و بررسی سیستم‌های کانی‌سازی کاربرد دارند. پایش آلودگی‌های زیست‌محیطی معادن، مطالعه تغییرات در حوضه‌های رسوبی، تعیین شوری خاک، بررسی مناطق زمین گرمایی و نظایر آن از دیگر کاربردهای این اطلاعات است.

۱-۳-۲- الگوی سنگ‌شناسی

در این الگو تهیه نقشه زمین‌شناسی[4] با اطلاع از نحوه گسترش مکانی سنگ‌ها شروع می‌شود و تصاویر ماهواره‌ای با نمایش طبیعی سطح زمین، مبنای گرافیکی ایده‌آلی در موارد زیر به شمار می‌آیند:

- تفکیک و تعیین حدود گسترش سطحی واحدهای سنگی

1- Spatial zones
2- Relative abundances
3- Assemblages of minerals
4- Geological mapping

– به هنگام‌سازی نقشه‌های قدیمی، یکپارچه‌سازی نقشه‌ها و حذف خطاهای هندسی

– مطالعه ارتباط ذخایر معدنی با الگوی سنگ‌شناسی در قالب فعالیت‌های ماگمایی و یا فرآیندهای رسوبی

۱-۳-۳- الگوی هندسی- ساختمانی

این الگو در واقع بررسی اثرات نیروهای درونی و بیرونی زمین بر شکل هندسی و ساختمانی سنگ‌ها است که با تغییر شکل (چین‌خوردگی)، گسست (گسل‌خوردگی) و تغییر ارتفاع توپوگرافی همراه است. نقش داده‌های دورسنجی در این الگو شامل موارد زیر است:

– برداشت خطواره‌های ناحیه‌ای و تعیین الگوی مکانی پیدایش و توزیع کانسارها و فعالیت‌های آذرین

– برداشت شکستگی‌ها و تعیین نقش آن‌ها در گسترش مکانی- زمانی واحدهای سنگی

– برداشت شکستگی‌های مرتبط با تمرکز کانی‌سازی

– مطالعه چین‌ها و کمی‌سازی پارامترهای آن‌ها

– مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی

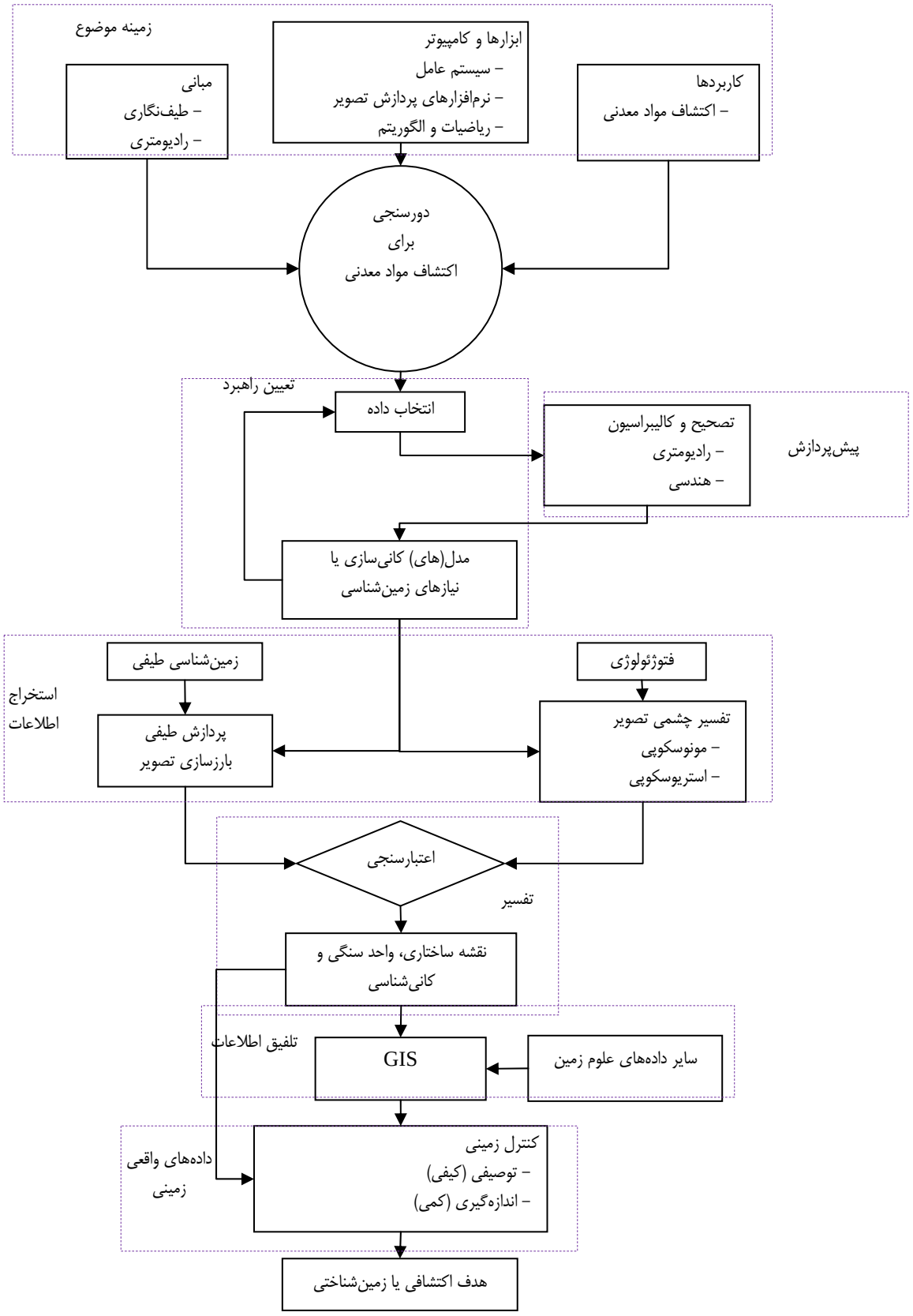
– تهیه نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس بر اساس زوج تصویر استریوسکوپی[1] ماهواره‌ای

– مطالعه تغییرات مکانی (مولفه افقی یا قائم) و زمانی پدیده‌های زمین‌شناسی (گسلش، فرونشست، رانش زمین، حرکت گنبدهای نمکی و نظایر آن‌ها)

۱-٤- راهبردهای استفاده از دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی

داده‌های خام[2] و رقومی ثبت شده به وسیله سنجنده‌های دورسنجی طی فرآیندی سلسله‌وار موسوم به پردازش، به اطلاعات و آنگاه با جهت‌دهی و تفسیر صحیح به دانسته‌های زمین‌شناسی- اکتشافی تبدیل می‌شوند. این فرآیند مستلزم به کارگیری دانش‌ها، روش‌ها و مهارت‌های مختلف است (شکل ۱-۳):

1- Stereo pair imagery
2- Raw-Data



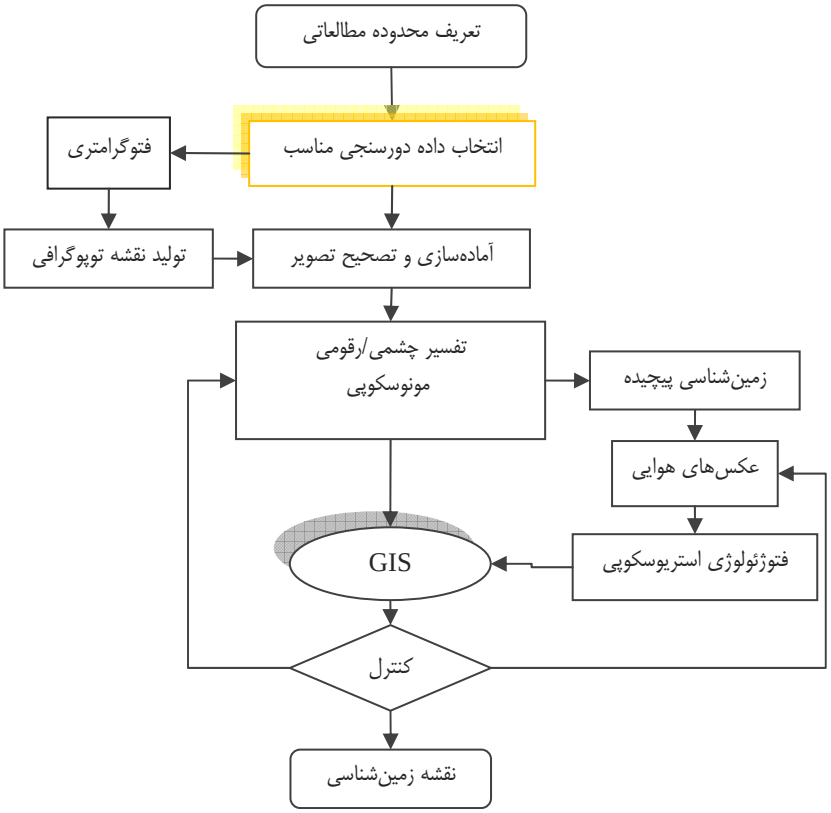
شکل ۱-۳- روندنمای بخش‌های مختلف زنجیره دورسنجی

- **زمینه موضوع**[1]: شامل رادیومتری، اپتیک، طیف‌نگاری[2] و دانش نرم‌افزاری در کنار علوم زمین‌شناسی است.
- **راهبرد**[3] **انتخاب داده، تعریف مساله و گزینش روش:** لازمه آن شناخت کافی از انواع داده‌ها و درک درست پدیده مورد مطالعه است که در اکتشاف با مدل کانی‌سازی بیان می‌شود. این موارد موضوع فصل ۱ و ۲ است.
- **پیش‌پردازش**[4]**:** آماده‌سازی داده‌های انتخابی متناسب با نیاز تعریف شده است (فصل ۳).
- **استخراج اطلاعات**[5]**:** استخراج اطلاعات بر پایه زمین‌شناسی تصویری و زمین‌شناسی طیفی با انواع روش‌های ریاضی و مهارت‌های چشمی است (فصل ۴).
- **تفسیر اطلاعات**[6] **و تولید محصولات:** شامل بررسی و تفسیر موازی محصولات و اطلاعات استخراج شده است که ممکن است با کار زمینی همراه باشد (فصل ۵).
- **تلفیق اطلاعات**[7]**:** برای پشتیبانی و تکمیل نتایج ممکن است اطلاعات استخراجی با دیگر لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS تلفیق شود (فصل ۵).
- **داده‌های واقعی زمینی**[8]**:** برای اعتبارسنجی و کنترل، اطلاعات تفسیری باید با واقعیت زمینی مطابقت داده شوند. این مرحله معمولا در انتهای زنجیره یاد شده جای می‌گیرد (فصل ۶).

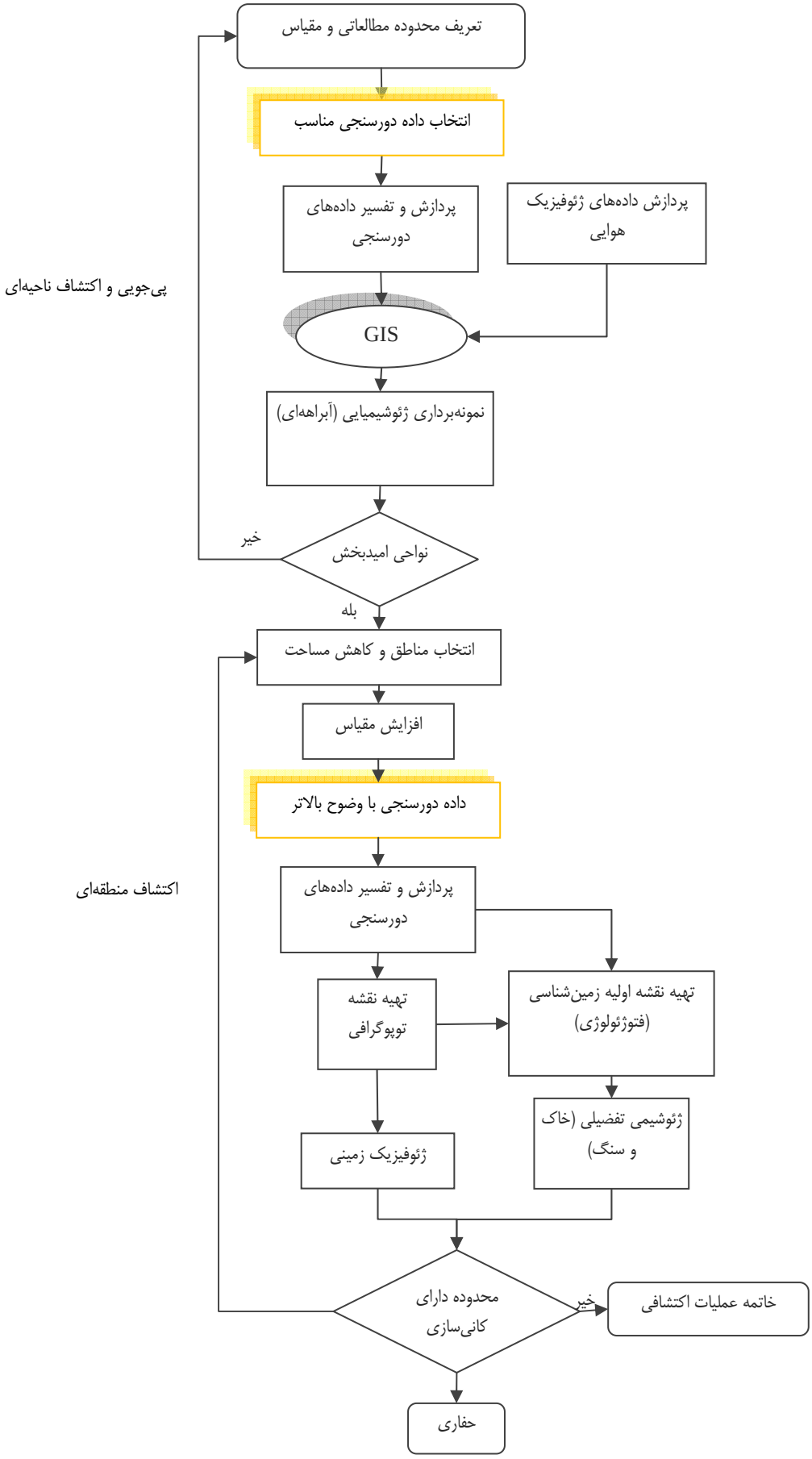
با در نظر گرفتن توانایی‌های غالب دورسنجی یعنی سرعت بالا، پوشش وسیع، هزینه کم و محدودیت آن در نفوذ به عمق و با آگاهی از مرحله‌ای بودن فرآیند اکتشاف، می‌توان جایگاه و اولویتی مطابق نمودارهای ۱-۴ و ۱- ۵ برای استفاده از این داده‌ها در بررسی‌های زمین‌شناسی و امور اکتشافی پیشنهاد کرد.

البته نیاز یک پروژه اکتشافی- زمین‌شناسی ممکن است به سادگی تصحیح هندسی و ساخت یک ترکیب رنگی باشد و یا طیف وسیع و متنوعی از پردازش‌ها را شامل شود. خروجی‌های مهم و متداول مورد انتظار از داده‌های دورسنجی (شامل نقشه کانی‌شناسی، نقشه پتانسیل معدنی، نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی و نیز عکس- نقشه) و جایگاه آن‌ها در فرآیند پردازش در شکل ۱-۶ آمده است. به استانداردهای خروجی‌گیری از این محصولات در فصل ۵ پرداخته شده است.

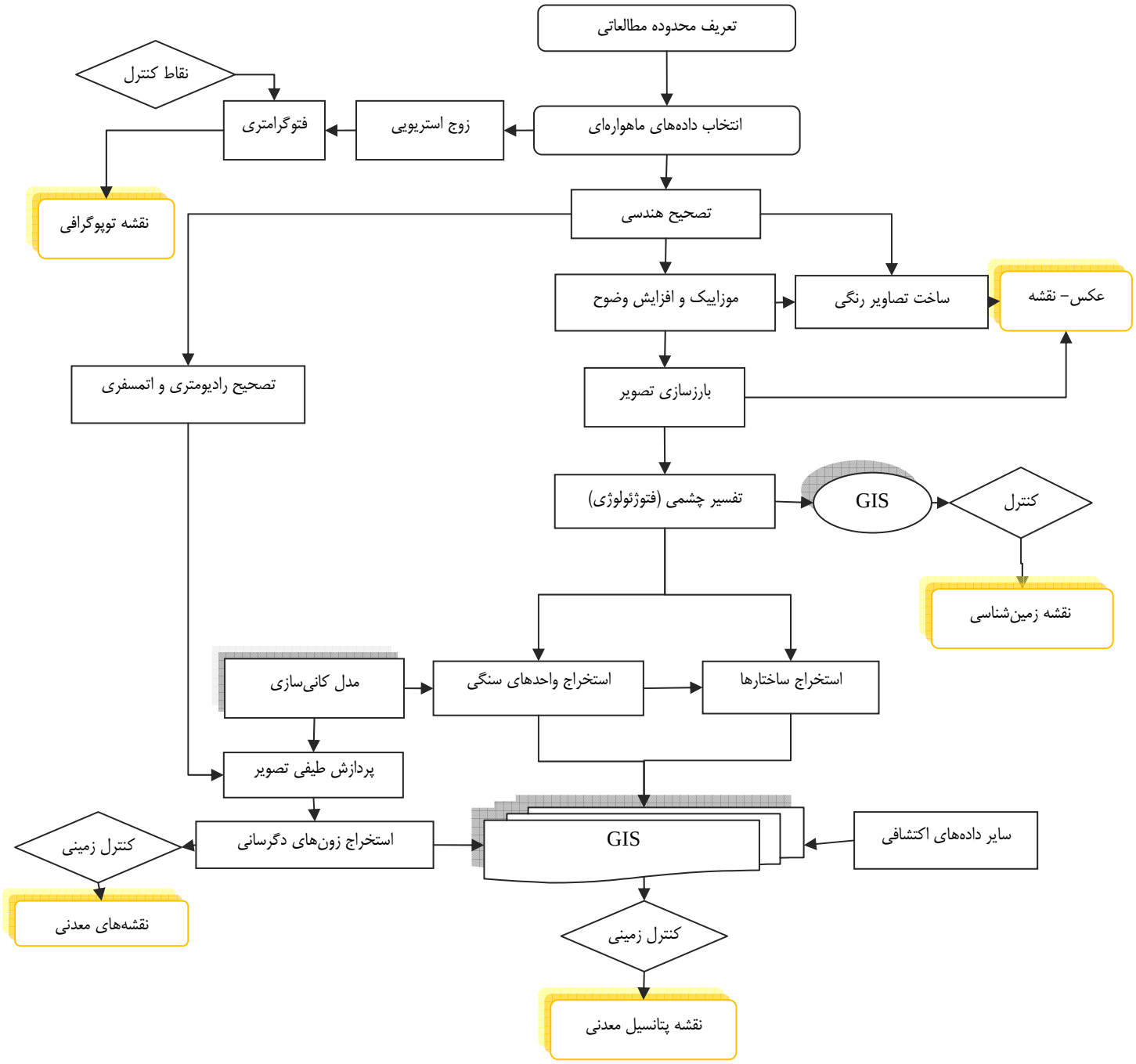
1- Background
2- Spectroscopy
3- Strategy
4- Preprocessing
5- Information extraction
6- Interpretation
7- Information synthesis
8- Ground truth data



شکل ۱-٤- روندنمای به کارگیری داده‌های دورسنجی در تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی



شکل ۱-۵- فلوچارت جایگاه و اولویت پیشنهادی برای به کارگیری داده‌های دورسنجی در یک فرآیند اکتشافی



شکل ۱-٦- توالی ساده شده فرآیند پردازش داده‌های دورسنجی و خروجی‌های مهم و متداول حاصل

۱-۵- مدل فلززایی[1] و کانساری[2]

کانسار پدیده زمین‌شناختی سه‌بعدی، شامل تمرکز غیرعادی از یک یا چند عنصر است که به صورت بارزی از محیط اطراف متمایز می‌شود. کانی‌سازی در پوسته زمین نادر (از دیدگاه اقتصادی) و استثنایی (از دیدگاه زمین‌شناسی) است، اما پدیده‌ای تصادفی

1- Metallogenic model
2- Mineral deposit model

نیست، بلکه توزیع آن در مکان و زمان در مقیاس‌های مختلف از ناحیه‌ای تا منطقه‌ای تابع نظم و ترتیبی است که با مدل‌های فلززایی و کانی‌سازی (یا مدل‌های زایشی نهشته[1]) بیان می‌شود.

یک منطقه اکتشافی بسته به بود یا نبود کانسارهای اکتشاف شده قبلی به دو گروه کار نشده[2] و کار شده[3] تقسیم‌بندی می‌شود. در نوع کار شده، اکتشاف در حوالی منابع شناخته شده انجام می‌شود، در حالی که در کار نشده اطلاع قبلی از منطقه وجود ندارد، لذا اکتشاف به کلی مفهومی و متکی به مدل‌های کانی‌سازی و فلززایی است.

۱-۵-۱- مدل فلززایی

فلززایی قانونمندی طبیعی حاکم بر چگونگی تشکیل کانسارها را تعیین می‌کند و موضوع اصلی در آن فاکتورهای تکتونو-ماگمایی کنترل‌کننده توزیع ناحیه‌ای کانی‌سازی است. فلززایی در پیوند با زمین‌ساخت ورقه‌ای تفسیر صحیحی از تکامل سیستم‌های کانی‌زایی شکل گرفته در پوسته زمین را ارایه می‌کند. فلززایی بسته به مقیاس و وسعت به ترتیب شامل ایالت، کمربند و منطقه فلززایی است. ایالت گستره وسیعی با تنوعی از انواع کانی‌سازی‌ها است. کمربند انواع مدل‌های کانساری خطی کشیده شده درون یک ایالت با شرایط زمین‌شناختی یکسان و رویداد تکتونیکی[4] مشخص (مانند کمان‌های آذرین[5] مرتبط با فرورانش، محیط برخوردی[6] و ریفتی[7]) و منطقه فلززایی بخش‌هایی از یک ایالت یا کمربند با روند و واحدهای سنگی مشخص است.

۱-۵-۲- مدل کانساری

مدل‌های کانساری، برای تصمیم‌گیری در مورد نحوه عملیات اکتشافی به کارگرفته می‌شوند. در یک مدل کانساری فرآیندهای زایشی یک نهشته نظیر نیروهای تحرک، مهاجرت و تمرکز عناصر توصیف می‌شود و از این رو پایه‌ای مفهومی برای تعیین استراتژی اکتشافی، انتخاب داده، گزینش الگوریتم‌های پردازش و در نهایت تفسیر و تلفیق اطلاعات استخراجی ایجاد می‌کند.

هاله‌های دگرسانی حاصل فرآیندهای گرمابی در بسیاری از ذخایر معدنی جزو معیارهای کلیدی شناخت[8] یک مدل کانساری محسوب می‌شوند. در صورت عملکرد کافی فرسایش، هاله‌های دگرسانی با گسترش نسبتا وسیع سطحی و کانی‌شناسی متنوع، به خوبی با سنجنده‌های چندطیفی/فراطیفی قابل شناسایی و نقشه‌برداری هستند. اثر هوازدگی شیمیایی توده‌های کانساری در برخی مواقع عامل محدودکننده دورسنجی است، اما در بسیاری موارد تغییرات کانی‌شناسی همراه با هوازدگی (به ویژه اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن) به عنوان یک شاخص اکتشافی با داده‌های دورسنجی نقشه‌برداری می‌شود.

1- Deposit genetic models
2- Greenfields
3- Brownfields
4- Tectonic event
5- Igneous arc
6- Collision
7- Rifting
8- Critical recognition criteria

با ورود زمین‌شناسی طیفی به اکتشاف، نیاز است که مدل‌های کانی‌سازی موجود برای پررنگ‌تر کردن نقش الگوهای کانی‌شناسی مورد بازنگری قرار گیرند تا در اکتشافات ذخایر پنهان[1] موثرتر واقع شوند.

۱-۵-۳- مرور مدل‌های کانساری

برخی از مهم‌ترین مدل‌های کانساری فلزی مورد انتظار در پهنه زمین‌ساختی ایران (عمدتا برخوردی- فرورانش) که امکان به کارگیری داده‌های ماهواره‌ای در اکتشاف آن‌ها وجود دارد، در جدول ۱-۱ ارایه شده است. این مدل‌ها بیشتر شامل انواع کانسارهای مس، طلا، سرب- روی، آهن، آلومینیم، منگنز و قلع است. به کارگیری دورسنجی طیفی در اکتشاف مستقیم سایر مدل‌های فلزی- غیرفلزی مبهم است، زیرا یا کانه‌سازی با الگوهای کانی‌شناسی مشخص همراه نیست، یا تاکنون با دیدگاه کانی‌شناسی- طیفی مورد بررسی قرار نگرفته است.

کانسارهای طلای اپی‌ترمال (سولفیداسیون بالا[2] و سولفیداسیون پایین[3]) و مس پورفیری به دلیل تنوع کانی‌های دگرسانی برای اکتشاف با داده‌های چندطیفی/فراطیفی ایده‌آل هستند. سایر مدل‌های مهم کانساری در پوسته ایران که قابلیت اکتشاف با دورسنجی دارند، شامل موارد زیر است:

- نهشته‌های سرب و روی چینه‌کران[4] دره می‌سی‌سی‌پی[5] و سدکس[6] در ایران مرکزی
- سولفیدهای توده‌ای تیپ قبرسی همراه با افیولیت‌ها در جنوب، شرق و شمال غرب کشور
- آهن‌های اسکارنی همراه با زون فرورانش جزایر قوسی و تصادم قاره‌ای
- بوکسیت‌های نازک لایه و گسترش یافته در نیمه شمالی کشور

برای استفاده از داده‌های دورسنجی در اکتشاف مدل‌های ارایه شده در جدول ۱-۱، محدودیت‌ها و ملاحظات دیگری نیز وجود دارد که در بحث انتخاب داده ماهواره‌ای (فصل ۲)، پردازش طیفی (فصل ۴) و فهرست خدمات دورسنجی (فصل ۷) مورد بحث قرار گرفته است.

جدول ۱-۱- مدل‌های کانساری فلزی قابل اکتشاف با داده‌های دورسنجی و خلاصه ویژگی‌های آن

مدل	محیط کانسار			ویژگی‌های کانی‌شناختی		
	جایگاه زمین‌ساختی	محیط تشکیل	سنگ درونگیر/میزبان	کانسنگ/ باطله	دگرسانی	هوازدگی
مس پورفیری (+/- طلا و مولیبدن)	بخش آتشفشانی جزایر قوسی، زون‌های فرورانش و حاشیه قاره‌ها	توده‌های پورفیری	گرانودیوریت، کوارتزمونزونیت تا دیوریت	کالکوپیریت، پیریت، بورنیت، سیلوانیت، کوارتز، فلدسپات پتاسیم، منیتیت، کلریت، اسفالریت و گالن	کوارتز، پیریت، بیوتیت، کلریت، رس‌های پرآلومین	کلاهک آهنی و کربنات مس

1- Concealed mineral deposits
2 -High-Sulfidation
3 -Low-Sulfidation
4 -Stratabond
5 -Mississippi valley type (MVT)
6 -Sedimentary exhalative (SEDEX)

ادامه جدول ۱-۱- مدل‌های کانساری فلزی قابل اکتشاف با داده‌های دورسنجی و خلاصه ویژگی‌های آن

مدل	محیط کانسار			ویژگی‌های کانی‌شناختی		
	جایگاه زمین‌ساختی	محیط تشکیل	سنگ درونگیر/میزبان	کانسنگ/ باطله	دگرسانی	هوازدگی
مولیبدن کلیمکس	در پوسته‌های ضخیم دور از حاشیه قاره‌ای و مناطق کششی کراتون‌ها	توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق چندفازی	گرانیت- ریولیت	مولیبدنیت، کوارتز، فلوئوریت، فلدسپات پتاسیم، پیریت و ولفرامیت	سریسیتی، توپاز، کوارتز، پیریت، کانی‌های رسی و کلریت	
طلای اپی‌ترمال سولفید بالا	جزایر قوسی حاشیه‌های قاره‌ای	آتشفشان کالکوآلکالن	آندزیت، ریوداسیت	سولفاسالت‌های مس (آنارژیت، لوزونیت)، پیریت، کالکوسیت، کوولیت، بورنیت	آلونیت متبلور در روی سطح و پیروفیلیت در اعماق	لیمونیت، گوتیت، ژاروسیت و آلونیت
طلای اپی‌ترمال سولفید پایین	نوع غنی از گوگرد در جزایر قوسی و حاشیه‌های قاره‌ای و نوع فقیر از گوگرد در شرایط کششی واقع در قوس‌ها و نیز در شرایط بعد از کوهزایی	آتشفشان کالکوآلکالن	آندزیت، ریوداسیت و ریولیت	اسفالریت، گالن، تتراهدریت، کالکوپیریت	سریسیت یا ایلیت، آدولاریا و رزکولیت	گوتیت، ژاروسیت و آلونیت
طلای کوهزایی (مزوترمال)	سیستم شکستگی فشارشی و دگرگونی	کمربندهای فعال حاشیه قاره	گریواک، چرت، شیل و کوارتزیت	کوارتز، طلای آزاد، پیریت، گالن، اسفالریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت، پیروتیت و فلوئوریت	کوارتز، سیدریت، آنکریت	-
طلای کارلین	کمان آتشفشانی یا ریفت‌های پشت کمانی	چشمه‌های آبگرم مناطق آتشفشانی و توربیدیت‌های کربناتی	آهک یا دولومیت سیلتی و سیلتستون‌های زغال‌دار	طلای آزاد، پیریت، اورپیمان، سینابر، آرسنوپیریت، فلوئوریت، باریت و کوارتز	ژاسپروئید، کوارتز، ایلیت، کائولینیت و مونت‌موریلونیت، سیلیس و آلونیت	اکسیدهای آهن قرمز
مس اسکارنی	کمربندهای کوهزایی حاشیه قاره‌ای	همبری توده‌های نفوذی با آهک	استوک‌های گرانودیوریتی تا کوارتز مونزونیتی و نفوذی در کربنات‌ها	کالکوپیریت، پیریت، هماتیت، منیتیت، بورنیت و پیروتیت	کلسیت، سیدریت، تالک، اپیدوت و کانی‌های رسی	کربنات مس، کالکوسیلیکات
سولفید توده‌ای قبرسی (VHMS)	ریفت‌های اقیانوسی	چشمه‌های آبگرم زیر دریایی پشت قوسی	افیولیت (دونیت و هارزبورژیت و گابرو)	پیریت، کالکوپیریت، به مقدار ناچیز اسفالریت	کوارتز، کلسدونی، کلریت، ایلیت، کلسیت، گوتیت و هماتیت	گوسن‌های لیمونیتی
سرب و روی دره می‌سی‌سی‌پی	سکوی قاره‌ای پایدار و درون قاره‌ای	آب‌های کم عمق دریایی	آهک دولومیتی	اسفالریت، گالن، پیریت، مارکاسیت، باریت، فلوئوریت	دولومیتی شدن و سیلیسی شدن	کربنات و سیلیکات روی
اکسید آهن مس-طلا	گرابن‌های کم عمق	پی‌سنگ‌های گرانیتی شکسته	برش‌های گرانیتی و آتشفشانی	هماتیت، بورنیت، کالکوپیریت، کالکوسیت، باریت	هماتیت، کلریت، سریسیت	اکسیدهای آهن
سرب و روی اگزالاتیو (SEDEX)	ساختمان‌های نیمه‌گرابنی و گسل‌های هم‌زمان با رسوب‌گذاری	حوضه‌های رسوبی اپی‌کراتونیک تا اینترکراتونیک	شیل سیاه، ماسه‌سنگ، چرت و آهک‌های میکرایتی	اسفالریت، گالن، باریت پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت	سیلیسی، آلبیتی، کلریتی و دولومیتی	گوسن‌های غنی از کربنات
پلی‌متالیک رگه‌ای	جزایر قوسی و حاشیه قاره‌ای	برش‌ها و شکستگی‌های نزدیک سطح	مونزونیت، دیوریت تا گرانودیوریت- آندزیت	طلای آزاد، پیریت، اسفالریت، کالکوپیریت، گالن، آرسنوپیریت	پروپلیتی و آرژیلیتی و سریسیتی	اکسید منگنز و آهن، کربنات سرب و روی

ادامه جدول ۱-۱- مدل‌های کانساری فلزی قابل اکتشاف با داده‌های دورسنجی و خلاصه ویژگی‌های آن

مدل	محیط کانسار			ویژگی‌های کانی‌شناختی		
	جایگاه زمین‌ساختی	محیط تشکیل	سنگ درونگیر/میزبان	کانسنگ/ باطله	دگرسانی	هوازدگی
مس رگه‌ای	حاشیه قاره‌ای و جزایر قوسی	ولکانیک‌های بالای پلوتوولکانیک	آندزیت، داسیت و توف و برش آتشفشانی	پیریت، آنارژیت، کوولیت، کالکوسیت، بورنیت و کالکوپیریت	کلسدونی، آلونیت، پیروفیلیت، دیاسپور و دیکیت	–
آهن اسکارنی	محیط کمان ولکانو-پلوتونی حاشیه قاره‌ای، جزایر قوسی	همبری توده‌های نفوذی عمیق و نیمه‌عمیق با سنگ‌های کربناته	گرانودیوریت، دیوریت، گابرو، گرانیت و سنگ‌های آهکی دگرگونه	منیتیت، کالکوپیریت، پیریت، پیروتیت و اسفالریت	دیوپسید، آمفیبول، سرپانتین، کلریت، گارنت و اپیدوت	اکسیدهای آهن
آهن آتشفشانی	ریفت‌های درون قاره‌ای، فرورانش حاشیه قاره‌ای	زون‌های دستخوش پویایی تکتونو-ماگمایی	جریان گدازه‌های آندزیتی تا تراکیتی	منیتیت، آپاتیت، پیریت، کالکوپیریت	اکتینولیت، کوارتز، کلریت و پتاسیک	–
آهن متاسوماتیت	گسل‌های کنترل ریفتی قاره‌ای	زون‌های متاسوماتیت در تقاطع ساختارهای ژرف	سازندهای کربناتی-رسوبی- آذرآواری متاثر از متاسوماتیسم	منیتیت، مارتیت، پیریت، کالکوپیریت، آلبیت، کوارتز، ترمولیت و کلسیت	آلبیت، ترمولیت، اکتینولیت، فلوگوپیت، سرپانتین، تالک و سیدریت	اکسیدهای آهن
آهن نوع منیتیت-آپاتیت	محیط‌های ریفتی درون قاره‌ای، کمپلکس‌های تفریقی الترابازیک آلکالن	زون‌های متاثر از بازپویایی تکتونوماگمایی	پیروکسنیت، گابرو، سینیت و کربناتیت	منیتیت آپاتیت‌دار، ترمولیت، اکتینولیت، پلاژیوکلاز، آلبیت	فنیتی به صورت آمفیبول متاسوماتیک	–
آهن آذرآواری (الگوما)	کمربندهای آتشفشانی زیردریایی و زون‌های تصادم	حوضه‌های آتشفشانی- رسوبی و سپرهای کهن	سنگ‌های آتشفشانی و رسوبات آواری آب‌های عمیق	منیتیت، هماتیت، سیدریت و کوارتز	–	هیدروکسیدهای آهن
آهن رسوبی-شیمیایی	حوضه‌های رو به خشکی (Foreland Basin)	محیط کم عمق سکوی قاره‌ای در شرایط بالاشدگی	سنگ‌های رسوبی-تبخیری (اهک، ماسه‌سنگ و دولومیت)	هماتیت، منیتیت، سیدریت و کوارتز	هماتیتی، دولومیتی، آنکریتی و سیدریتی	اکسیدهای آهن
بوکسیت کارستی	سرزمین‌های پایدار تکتونیکی با آب و هوای گرم	هوازدگی شدید سطحی	مواد هوازده غنی از آلومین	گیبسیت، بوهمیت، دیاسپور، هماتیت، گوئتیت، آناتاز، کائولن و کوارتز	–	سیلیکات‌های آلومینیم
منگنز ولکانوژن	شکاف میان اقیانوسی و جزایر قوسی	چشمه‌های آبگرم دریایی	چرت، ژاسپر و بازالت	ردوکروزیت، کلسیت، برنیت، هاسمانیت، رودنیت، اپال Mnدار، منیتیت و پیرولوزیت	اسپیلیتی، سیلیسی و هماتیتی شدن	اکسید منگنز
قلع گرایزنی	کمربندهای چین خورده، سنگ‌های آتشفشانی محیط‌های کراتونیک	توده‌های نفوذی مزوترمال و ولکانیک‌های عمیق	لوکوگرانیت نوع S	کاسیتریت، مولیبدنیت، آرسنوپیریت، ولفرامیت و بیسموتیت	موسکویت، کلریت، تورمالین، کوارتز و توپاز	–

داده‌های دورسنجی همچنین برای شناسایی، اکتشاف و یا تفکیک انواع گوناگونی از کانی‌های غیرفلزی و مواد معدنی زیر به طور مستقیم کاربرد دارد. این کانی‌ها شامل موارد زیر است:

- انواع کربنات‌ها (آهک و دولومیت)
- خاک‌های صنعتی و انواع کانی‌های رسی (بنتونیت، کائولینیت و نظایر آن‌ها)

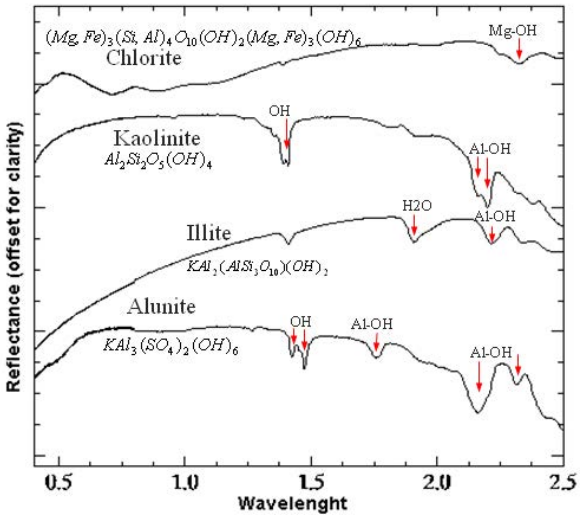
- سیلیس‌های گرمابی و رسوبی
- واحدهای تبخیری (مثل ژیپس، نمک‌ها)
- سنگ‌های نما و ساختمانی
- مواد اولیه کارخانجات سیمان

۱-٦- زمین‌شناسی طیفی[1]

طیف‌نگاری[2] علم مطالعه رفتار مواد (جامد، مایع و یا گاز) در مقابل امواج الکترومغناطیسی به صورت تابعی از طول موج است. رفتار مواد در محدوده مریی تا مادون قرمز ۰٫۴-۲٫۵ میکرومتر، بازتابی و در محدوده حرارتی ۳ تا ۱۴ میکرومتر، تابشی است. زمین‌شناسی طیفی شاخه‌ای از طیف‌نگاری است که تمرکز ویژه آن مطالعه رفتار طیفی کانی‌ها و سنگ‌ها است. هر کانی دارای نمودار بازتاب طیفی[3] یکتا با جذب و بازتاب‌های منحصر به فرد در طول موج‌های مشخص است (شکل ۱-۷) که گاه به آن‌ها اثر انگشت طیفی[4] می‌گویند. جذب ممکن است ناشی از پدیده‌های تشدید الکترونیک[5]، لرزش[6] و چرخش[7] اتمی و مولکولی باشد. از این رو طیف هر کانی ارتباط مستقیمی با ترکیب کانی‌شناسی و سیستم تبلور آن دارد. جذب‌ها مبنای شناسایی کانی‌ها (و سنگ‌ها) از راه دور هستند و عمده روش‌های پردازش طیفی بر توانایی تشخیص آن‌ها استوار است.

کانی‌ها به طور ذاتی تغییرات فیزیکی و شیمیایی زیادی از خود نشان می‌دهند که در طیف آن‌ها منعکس می‌شود. این تغییرات موجب جابه‌جایی[8] موقعیت جذب آن‌ها و یا تغییر در عمق، پهنا و شکل جذب می‌شوند، ولی شکل کلی طیف حفظ می‌شود (پیوست، شکل ۱). این نوسانات طیفی بیانگر تغییر در شرایط فیزیکی- شیمیایی محیط تشکیل کانی‌ها هستند و در استخراج اطلاعات اکتشافی و زمین‌شناسی اهمیت بسیار دارند. طیف‌نگاری به هر دو گروه کانی‌های بلورین و بی‌شکل (آمورف) حساس است.

1- Spectral geology
2- Spectroscopy
3- Spectral reflectance curve
4- Spectral signature
5- Electronic resonance
6- Vibrational resonance
7- Spinning resonance
8- Shift



شکل ۱-۷- طیف بازتابی چند کانی رسی به همراه ترکیب شیمیایی آن‌ها، موقعیت و علل جذب

موقعیت، شکل، عمق، پهنا و تقارن عوارض جذبی توسط ساختار بلورین خاصی که گونه جذبی را در خود دارد (مانند عامل (co_3^{2-}) و نیز شیمی و ساختار کانی و نوع شبکه بلورین کنترل می‌شود. از این رو کانی‌ها بر اساس بنیان کاتیونی مشترک آن‌ها طبقه‌بندی و مطالعه طیفی می‌شوند. جدول ۱-۲ کانی‌هایی را که به روش طیفی قابل شناسایی‌اند بر اساس بنیان کاتیونی آن‌ها فهرست کرده است.

رفتار طیفی بسیاری از کانی‌ها در آزمایشگاه یا در زمین مطالعه و در قالب کتابخانه‌های طیفی[1] ارایه می‌شود. یک کتابخانه طیفی در واقع بیان رقومی (برداری) کانی‌ها به وسیله رایانه است. مهم‌ترین کتابخانه‌های طیفی از سوی سازمان زمین‌شناسی آمریکا[2]، JPL ناسا، دانشگاه جان هاپکینز، CSIRO و نیز آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی آمریکا[3] تهیه شده است. این کتابخانه‌ها نقطه شروع پردازش طیفی‌اند و به عنوان یکی از داده‌های مرجع (فصل ۶) در کنترل نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱-۲- کانی‌های قابل شناسایی به روش طیف‌سنجی بازتابی بر اساس عامل جذبی و مولکولی

عامل مولکولی/ گروه	کانی‌ها
گروه اکسیدهای آهن	هماتیت، گوتیت، منیتیت توده‌ای
گروه کانی‌های Al-OH	پاراگونیت، مسکویت، فنژیت، ایلیت، پیروفیلیت، کائولینیت، هالویزیت، دیکیت، اسمکتیت (مونت‌موریونیت، پالیگورسکیت)، گیبسیت
سولفات‌ها	آلونیت، ژاروسیت، ژیپس
گروه کانی‌های Si-OH	اپال، کوارتز هیدروترمال

1- Spectral library
2- US geological survey (USGS)
3- US airforce research lab

ادامه جدول ۱-۲- کانی‌های قابل شناسایی به روش طیف‌سنجی بازتابی بر اساس عامل جذبی و مولکولی

عامل مولکولی/ گروه	کانی‌ها
کانی‌های آمونیوم‌دار NH-OH	بودینگتونیت
گروه کانی‌های Fe-OH	ساپونیت، نانترونیت، ژاروسیت، هکتوریت
گروه کانی‌های Mg-OH	کلریت، بیوتیت، فلوگوپیت، آنتیگوریت، ترمولیت، اکتینولیت، تالک، هورنبلند، بروسیت
کربنات‌ها	کلسیت، دولومیت، دولومیت آهن‌دار، منیزیت، آنکریت، سیدریت، مالاکیت
برخی سیلیکات‌های دارای عامل OH	اپیدوت، پرهنیت، تورمالین، توپاز
سایر کانی‌ها	فسفات‌ها (؟)، بورات‌ها (؟)، زئولیت‌ها

۱-۷- زمین‌شناسی تصویری[1] (فتوژئولوژی)

اصول تفسیری زمین‌شناسی تصویری (فتوژئولوژی) مستقل از نوع تصویر و یا طول موج برداشتی بر همه داده‌های هوابرد/ فضابرد بازتابی و تا حدودی تابشی قابل تعمیم است. فتوژئولوژی ممکن است بر روی یک زوج عکس هوایی با دید استریویی[2] و یا یک تصویر رنگی از داده‌های چندطیفی با دید مونوسکوپی انجام شود که به ترتیب بعد ارتفاعی و محتوی طیفی عامل اصلی استخراج اطلاعات زمین‌شناسی است (پیوست، شکل ۲).

در فتوژئولوژی از عواملی مانند تراکم، الگو و شکل مقطع آبراهه‌ها (منعکس‌کننده میزان نفوذپذیری و مقاومت سنگ در مقابل فرسایش)، تغییرات در رنگ و تن، میزان هوازدگی، ساخت سنگ (مرتبط با ماهیت شیمیایی و ابعاد اجزای تشکیل دهنده)، همراهی و توالی واحدهای سنگی و وضعیت و تراکم گیاهان برای شناسایی و تفکیک واحدهای سنگی استفاده می‌شود. در شناسایی و تفسیر ساختارها (گسل‌ها، خطواره‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها) فتوژئولوژی بر عواملی مانند دره‌ها و آبراهه‌های خطی شده یا دارای تغییر مسیر ناگهانی (به ویژه در مورد گسل‌های پرشیب)، قطع امتدادها، تکرار، جابه‌جایی یا حذف چینه‌های یک سکانس یا یک واحد آتشفشانی (به ویژه برای گسل‌های کم شیب)، تفاوت تن و بافت تصویر و نیز گیاهان رونددار تکیه دارد.

1- Photogeology
2- Stereoscopic view

فصل ۲

انواع داده‌های ماهواره‌ای

۲-۱- آشنایی

سه پارامتر وضوح مکانی (اندازه پیکسلی)، وضوح طیفی و وضوح زمانی به ترتیب برای بیان کمی جزییات مکانی[1]، اطلاعات طیفی[2] و تکرر برداشت داده‌های ماهواره‌ای به کار برده می‌شوند. در این فصل ضمن بررسی نقش این پارامترها در مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافی، ویژگی انواع سنجنده‌های دورسنجی موجود بررسی و داده‌ها طبقه‌بندی شده‌اند و در نهایت معیارهای انتخاب و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۲-۲- وضوح زمانی و تاریخ تصویر

مقصود از وضوح زمانی، توانایی تکرار تصویربرداری از یک نقطه ثابت از زمین است که مختص داده‌های ماهواره‌ای است و در مورد داده‌های هوابرد مصداق ندارد. این پارامتر بیشتر برای مطالعه پدیده‌های زمین‌شناسی پویا مانند زلزله، فوران آتشفشان، زمین‌لغزش و یا مطالعه دوره‌ای معادن در حال استخراج و نیز پایش اثرات زیست‌محیطی آن‌ها اهمیت می‌یابد. با توجه به آن که بسیاری از پدیده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی ایستا هستند و در فواصل زمانی کم تغییر نمی‌کنند. لذا نه تنها تاریخ برداشت‌ها کم اهمیت می‌شود، بلکه در بسیاری مواقع، داده‌های قدیمی به دلایل زیر برتری نسبی پیدا می‌کنند:

- اثرات به هم‌خوردگی سطحی ناشی از فعالیت انسان (احداث معادن، فعالیت‌های کشاورزی و کشت محصول، جاده‌های احداثی و توسعه شهرها) در آن‌ها حداقل است.
- تصاویر قدیمی‌تر یک سنجنده افت رادیومتری و کیفی کمتری دارند.

قابلیت تکرار زمانی، بیشتر برای ماهواره‌های با وضوح مکانی بالا مورد تاکید است زیرا تشخیص و مطالعه پدیده‌های پویا را تنها بر روی این تصاویر می‌توان انجام داد. میانگین زمان عبور مجدد این ماهواره‌ها بسته به طول و عرض جغرافیایی محل برداشت تصویر از ۱٫۱ روز تا ۴ روز در تغییر است.

زمان نسبی برداشت داده‌های دورسنجی در طول سال نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. به دلایل زیر داده‌های فصول گرم یا تابستان بر داده‌های دیگر فصل‌ها برتری دارد:

- زاویه تابش خورشید نسبت به افق بیشترین است و کانی‌ها و سنگ‌های سطح بیشترین مقدار انرژی را دریافت می‌کنند. بنابراین تباین (کنتراست) طیفی مواد بیشینه و طول سایه‌ها کمینه است.
- با توجه به فراوانی ارتفاعات در کشور، گرمای تابستان موجب آب شدن بیشتر برف‌های ارتفاعات می شود و سنگ در معرض دید ماهواره قرار می‌گیرد.
- به دلیل پایداری نسبی جو ایران در فصل تابستان، احتمال وجود ابر کم است و رطوبت خاک به کمترین مقدار ممکن می‌رسد، ابر در سطح زمین سایه می‌اندازد و رطوبت سطحی نیز تباین طیفی و کیفیت تصویر را کاهش می‌دهد.

1- Spatial detail
2- Spectral information

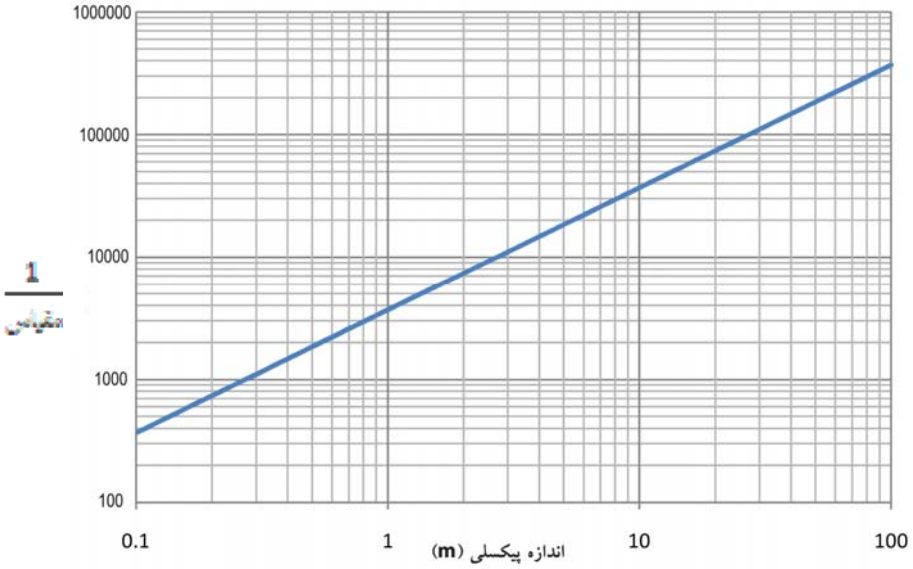
– پوشش گیاهی فصلی با رسیدن فصل گرما به حداقل رسیده و مانع رویت سطح زیرین به وسیله سنجنده نمی‌شود.

میزان تاثیر این عوامل به طول و عرض جغرافیایی، وضعیت توپوگرافی، وضعیت اقلیمی و دسترسی به داده‌های جایگزین و نیاز پروژه بستگی دارد، به طوری که گاه می‌توان داده‌های فصل زمستان و بهار را نیز در مطالعات به کار برد.

۲-۳- وضوح مکانی و مقیاس تصویر

تصاویر رقومی دورسنجی مقیاس ذاتی ندارند، اما مقیاس قابل دستیابی با هر داده با حفظ تمایز[1] و کیفیت مطلوب داده، دارای محدودیت است. ارتباط خطی بین مقیاس و اندازه پیکسلی با رابطه تجربی زیر و نمودار شکل ۲-۱ بیان می‌شود:

$$\frac{1}{\text{مقیاس}} = \text{اندازه پیکسلی (متر)} \times ۳۹۳۷$$



شکل ۲-۱- نمودار ارتباط خطی بین اندازه پیکسلی (متر) و مقیاس مطالعاتی (مقیاس محورها لگاریتمی است).

پروژه‌های اکتشافی در چهار مقیاس زیر مطالعه می‌شوند. این مقیاس‌ها با کمی تعدیل برای مطالعات زمین‌شناسی نیز کاربرد دارند:

الف- شناسایی که در وسعت یک ایالت یا ناحیه کانی‌سازی برای تعریف محدوده مطالعاتی اجرا می‌شود، مقیاس کار: ۱:۱۰۰،۰۰۰، ۱:۲۵۰،۰۰۰ و کوچکتر

ب- پی‌جویی که در آن به مطالعه کانی‌زایی در مقیاس منطقه معدنی پرداخته می‌شود، مقیاس کار: ۱:۵۰،۰۰۰ تا ۱:۲۵۰۰۰

پ- کتشاف عمومی که برای تعیین محدوده یک سیستم کانی‌سازی و عوامل کنترل‌کننده آن انجام می‌گیرد، مقیاس کار: ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۱۰،۰۰۰

ت- اکتشاف تفصیلی که در مقیاس کانسار انجام می‌گیرد و هدف آن تعیین مشخصات سه‌بعدی کانی‌زایی است و به کمک حفریات اکتشافی، تعیین ذخیره و تکمیل بررسی‌های امکان‌سنجی انجام می‌گیرد، مقیاس کار: ۱:۵۰۰۰ و بزرگتر

1- Clarity

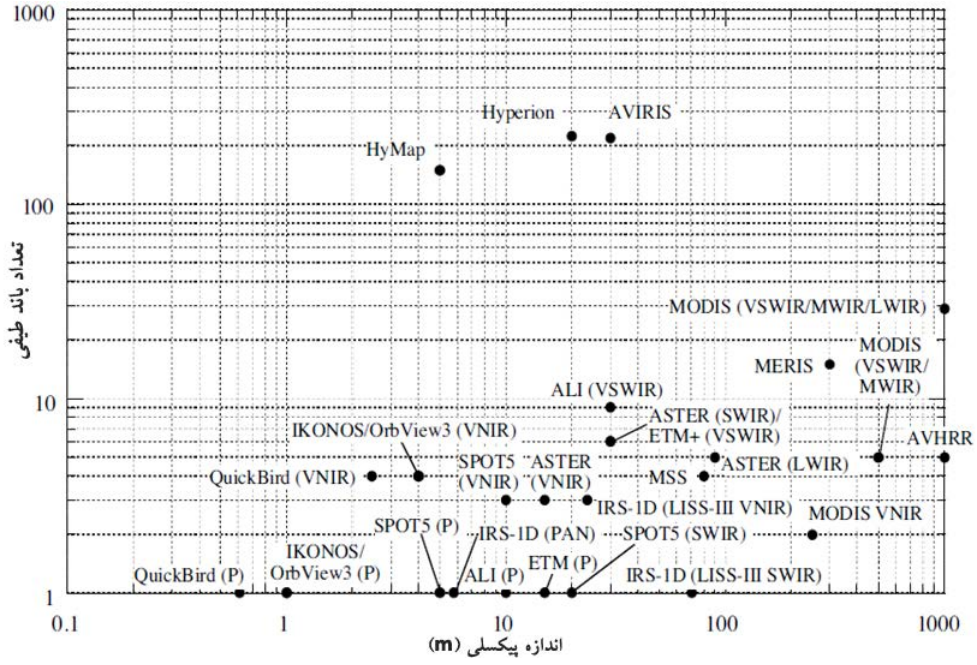
ابعاد پیکسلی متناسب با این مقیاس‌ها به صورت زیر است:

- مقیاس ۱:۲۵۰،۰۰۰ و کوچکتر: اندازه پیکسل ۷۰ متر و بیشتر (وضوح پایین)
- مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ تا ۱:۵۰،۰۰۰: اندازه پیکسل بین ۳۰ تا ۱۵ متر (وضوح متوسط)
- مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۱۰،۰۰۰: اندازه پیکسل بین ۷/۵ تا ۲/۵ متر (وضوح بالا)
- مقیاس ۱:۵۰۰۰ و بزرگتر: اندازه پیکسل حدود ۱/۵ متر و کمتر (وضوح خیلی بالا)

داده فرامکانی[1] اصطلاح دیگر داده‌های با وضوح مکانی خیلی بالا است.

۲-٤- تعداد باند طیفی

تعداد باند طیفی بر روی انتخاب داده‌های ماهواره‌ای به ویژه در بررسی کانی‌ها اهمیت دارد. به طور کلی با افزایش مقیاس مطالعاتی نیاز به داده‌های با سطح اعتماد بیشتر برای کمی‌سازی الگوی کانی‌شناسی بیشتر می‌شود و لذا افزایش تعداد باند طیفی ضرورت می‌یابد. به عبارت دیگر در حالت ایده‌آل، کار با داده‌های چندطیفی[2] در مقیاس‌های کوچک برای شناسایی زون‌های مستعد کانی‌سازی شروع می‌شود و با داده‌های فوق‌طیفی[3] یا فراطیفی[4] در مقیاس‌های بزرگتر، برای تشخیص انواع کانی‌ها و دگرسانی‌ها خاتمه می‌یابد. ارتباط بین اندازه پیکسلی (مقیاس) و تعداد باند طیفی انواع سنجنده‌ها در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- سنجنده‌های مختلف دورسنجی از دیدگاه اندازه پیکسلی (متر) و تعداد باند طیفی

1- Hyperspatial
2- Multispectral
3- Superspectral
4- Hyperspectral

۲-۵- مرور انواع داده‌های دورسنجی

داده‌های دورسنجی متداول و قابل استفاده در زمین‌شناسی و اکتشاف در سه گروه کلی داده‌های ماهواره‌های منابع زمینی[1] (شامل سنجنده‌های چند/فوق‌طیفی)، داده‌های فراطیفی (طیف‌سنج‌های تصویری) و داده‌های فرامکانی (داده‌های با وضوح مکانی خیلی بالا) قابل بررسی هستند. داده‌های راداری در مبحث جداگانه‌ای بررسی می‌شوند.

۲-۵-۱- ماهواره‌های منابع زمینی

الف- سنجنده +ETM

سنجنده‌های +ETM بر روی سکوی لندست-۷، نسل پنجم از سری ماهواره‌های لندست قرار دارند و طی سه دهه با موفقیت سطح زمین را به طور دوره‌ای و کامل تصویربرداری کرده‌اند. این سنجنده که از ۱۵ آوریل ۱۹۹۹ در مدار نصب شده دارای سه زیر مجموعه پانکروماتیک، بازتابی و حرارتی است و مشخصات آن در جدول ۲-۱ آمده است. داده‌های این سنجنده در دو سطح 0R و 1G برای همگان ارایه می‌شود. سطح 0R داده خامی است که تصحیح هندسی و رادیومتری نشده است. خطاهای سیستماتیک اولیه (رادیومتری-هندسی) در داده سطح 1G رفع شده به نحوی که در مناطق با ارتفاع کم، خطای هندسی آن‌ها کمتر از ۲۵۰ متر است. در داده‌های سطح 1R و 1T، جابه‌جایی ارتفاعی با نقاط کنترل زمینی (در صورت وجود) تصحیح می‌شود. همه سطوح داده‌ای معمولا به فرمت Geotiff و یا Fast-Format ارایه می‌شوند.

ابزار SLC لندست-۷ که حرکت رو به جلوی ماهواره را جبران می‌کند، از ۳۱ می ۲۰۰۳ دچار نقص فنی شده و در نتیجه از آن زمان به بعد بعضی از خطوط تصاویر دچار فقدان داده (گپ) می‌شود. داده‌های برداشتی پس از این تاریخ را داده‌های با مد SLC-خاموش[2] و قبل از آن را مد SLC-روشن[3] می‌نامند.

جدول ۲-۱- مهم‌ترین ویژگی‌های ماهواره لندست +ETM

ویژگی مداری	ارتفاع: ۷۰۵ کیلومتر، زمان عبور از استوا: ۱۰ صبح، زاویه میل: ۹۸٫۲ درجه، دوره تکرار: ۱۶ روز
باندهای طیفی	1: 0.45–0.52 2: 0.52–0.60 3: 0.63–0.69 4: 0.76–0.90 5: 1.55–1.75 7: 2.08–2.35 6: 10.4–12.5 PAN: 0.52–0.90
وضوح مکانی	Pan:15m, b1-b5, b7: 30m, b6: 60m
پهنای روبش	۱۸۵ کیلومتر
سطح کمی‌سازی	۸ بیت

1- Earth resource satellite data
2- SLC-off mode
3- SLC-on mode

ب- سنجنده ASTER

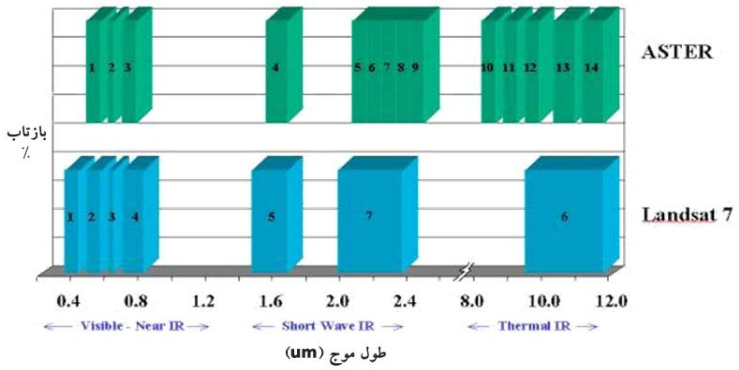
سنجنده ASTER که بر روی سکوی ترا[1] نصب شده، یک سنجنده فوق‌طیفی محسوب می‌شود که انرژی الکترومغناطیسی را در ۹ باند بازتابی و ۵ باند حرارتی با سه تلسکوپ VNIR، SWIR و TIR ثبت می‌کند (جدول ۲-۲). ASTER در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتری از سطح زمین نصب شده و زمان عبور آن از استوا ۱۰:۳۰ صبح است. پهنای روبش[2] آن ۶۰ کیلومتر است و تا ۲۳۲ کیلومتر دید به پهلو[3] (قابلیت جهت‌گیری) دارد. محدوده‌های VNIR، SWIR، TIR، مجموعه کاملی از داده‌ها را برای به نقشه درآوردن واحدهای زمین‌شناختی فراهم می‌کنند. سه باند VNIR منبع مهمی برای شناسایی فلزات انتقالی به ویژه آهن هستند. در ۶ باند SWIR کانی‌های کربناتی، هیدرات‌ها و هیدروکسیدها جذب مولکولی مشخصی دارند و لذا این داده‌ها برای بررسی ترکیب کانی‌شناختی آن‌ها ایده‌آل است. داده‌های حرارتی ASTER تنها داده چندطیفی حرارتی موجود در نوع خود است که در کمی‌سازی کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ همچون کوارتز و فلدسپات و نیز دگرسان گرمابی سیلیسی بسیار مفیداند. در شکل ۲-۳ باندهای طیفی ASTER با سنجنده +ETM مقایسه شده است.

جدول ۲-۲- برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنجنده ASTER

زیر مجموعه	شماره باند	محدوده طیفی (میکرومتر)	وضوح مکانی	بیت
VNIR	۱	۰٫۵۲-۰٫۶	۱۵ متر	۸
	۲	۰٫۶۳-۰٫۶۹		
	۳N	۰٫۷۸-۰٫۸۶		
	۳B	۰٫۷۸-۰٫۸۶		
SWIR	۴	۱٫۶-۱٫۷	۳۰ متر	۸
	۵	۲٫۱۴۵-۲٫۱۸۵		
	۶	۲٫۱۸۵-۲٫۲۲۵		
	۷	۲٫۲۳۵-۲٫۲۸۵		
	۸	۲٫۲۹۵-۲٫۳۶۵		
	۹	۲٫۳۶۰-۲٫۴۳۰		
TIR	۱۰	۸٫۱۲۵-۸٫۴۷۵	۹۰ متر	۱۲
	۱۱	۸٫۴۷۵-۸٫۸۲۵		
	۱۲	۸٫۹۲۵-۹٫۲۷۵		
	۱۳	۱۰٫۲۵-۱۰٫۹۵		
	۱۴	۱۰٫۹۵-۱۱٫۶۵		

1- Terra platform
2- Swath width
3- Cross track (pointing)

ASTER بهترین سنجنده فضابرد موجود با این پوشش طیفی از کل سطح کره زمین است، اما بر خلاف لندست، همه سطح زمین را در یک دوره تکرار نمی‌پوشاند. تخمین زده شده که ASTER تاکنون به طور متوسط سه بار از کل سطح زمین تصویربرداری کرده است.



شکل ۲-۳- مقایسه ویژگی موقعیت و تعداد باندهای طیفی سنجنده‌های ETM+ با ASTER

داده‌های ASTER به صورت معمول در دو سطح پردازشی 1a و 1b در قالب فایل‌های HDF ارایه می‌شوند. داده‌های سطح 1b دارای مختصات اولیه در سیستم مختصاتی UTM هستند و با مدار ماهواره هم راستا[1] شده‌اند و جابه‌جایی بین باندها در تلسکوپ SWIR رفع شده است. داده‌های برداشتی سنجنده ASTER دارای سه کاستی زیر است:

- پدیده نشت باندی[2] که طی آن فوتون‌های SWIR b4 به سایر باندها، به ویژه باند ۵ و ۹ نشت می‌کند.
- وجود حسگرهای SWIR ناکارآمد[3] که موجب بروز آنومالی نواری[4] در داده‌ها می‌شود.
- افزایش تدریجی دمای حسگرهای SWIR از سال ۲۰۰۷ که نتیجه آن کاهش کیفیت رادیومتری داده‌ها است. داده‌های برداشتی SWIR پس از آوریل ۲۰۰۸ عملا غیرقابل استفاده است.

پ- سنجنده SPOT

ماهواره SPOT مشابه لندست دارای مداری دایره‌ای، نزدیک به قطب و خورشیدآهنگ است. ارتفاع اسمی مدار آن از سطح زمین ۸۳۲ کیلومتر و زاویه انحراف آن ۹۸٫۷ درجه است و با یک روند نزولی در ساعت ۱۰:۳۰ صبح به وقت محلی از استوا عبور می‌کند. پهنای روبش SPOT در امتداد شاغولی[5] برابر ۶۰ کیلومتر است و الگوی مداری آن هر ۲۶ روز یک بار تکرار می‌شود. SPOT اولین سامانه نوری قابل جهت‌گیری[6] است که با سیستم پهلونگر هم تصاویر استریو برداشت می‌کند و هم موجب کاهش زمان دیدار مجدد به ۱ تا ۴ روز می‌شود. ماهواره SPOT-5 که در سال ۲۰۰۲ به وسیله دولت فرانسه به فضا پرتاب شده، دارای دو ابزار با وضوح تصویری بالا[7]، ابزار استریوسکوپی با وضوح بالا و ابزار شناسایی گیاهان است. در مجموع ۳ باند طیفی با وضوح مکانی ۱۰ متر در

1- Path-Oriented
2- Crosstalk
3- SWIR bad detector
4- Striping
5- Nadir
6- Pointable optics
7- High resolution geometric (HRG)

محدوده طیفی B1: ۰٫۵۹–۰٫۵ میکرومتر، B2: ۰٫۶۸–۰٫۶۱ میکرومتر، B3: ۰٫۸۹–۰٫۷۸ میکرومتر، یک باند طیفی با وضوح مکانی ۲۰ متر و یک باند پانکروماتیک در محدوده طیفی Pan: ۰٫۷۱–۰٫۴۸ میکرومتر با وضوح مکانی ۵ متر دارد. جایگذاری و درون‌یابی دو آرایه خطی با دقت ۵ متر در ایستگاه‌های زمینی موجب ایجاد یک تصویر پانکروماتیک با دقت ۲٫۵ متر می‌شود. برنامه SPOT همانند لندست، برداشت طولانی و پیوسته داده‌ها است.

ت- ماهواره CARTOSAT-1/2 و سایر ماهواره‌های IRS

ماهواره CARTOSAT-1 (یا IRS-P5) در پنجم ماه می سال ۲۰۰۵ در مدار دایره‌ای شکل نزدیک به قطب و خورشیدآهنگ، با زاویه میل ۹۷٫۸۷ درجه و ارتفاع ۶۱۸ کیلومتری قرار گرفته و دوره تکرار آن ۱۲۶ روز است. ماهواره، دو سنجنده پانکروماتیک با خود حمل می‌کند که با بازه طیفی ۰٫۸۵–۰٫۵ میکرومتر، وضوحی برابر ۲٫۱ متر دارند و به صورت جلو- عقب تصاویر استریو در پهنای ۳۰ کیلومتر با سطح کمی ۱۰ بیتی فراهم می‌کنند. قابلیت جهت‌گیری ماهواره موجب شده است که زمان دیدار مجدد آن به ۵ روز کاهش یابد و کاربرد عمده داده‌های آن در کارتوگرافی، مدلسازی زمین و تولید نقشه‌های کاداستر است. به دنبال CARTOSAT-1، ماهواره CARTOSAT-2 به طور موفقیت‌آمیزی در تاریخ ۱۰ ژانویه ۲۰۰۷ در مدار قطبی خورشیدآهنگ با زاویه میل ۹۷٫۹ و ارتفاع ۶۳۰ کیلومتر قرار گرفت. داده‌های ماهواره به وسیله یک دوربین پانکروماتیک در بازه طیفی ۰٫۸۵–۰٫۴۵ میکرومتر با وضوح مکانی ۰٫۸ متر در سه وضعیت Spot، Paint brush و Multiview تهیه می‌شود. در وضعیت نخست نوارها در امتداد مسیر ماهواره و در راستای شمالی- جنوبی برداشت می‌شود. در وضعیت دوم، برای افزایش پهنای روبش ۹٫۶ کیلومتری، دوربین چرخانده شده و در وضعیت آخر یک محدوده خاص سه بار متوالی در زوایای مختلف تصویربرداری می‌شود تا پوشش استریویی به دست آید. این ماهواره در ردیف داده‌های فرامکانی قرار می‌گیرد. سری ماهواره CARTOSAT در ادامه ماموریت ماهواره‌های IRS-P6 یا RESOURCESAT-1 و سری IRS-1A تا IRS-1D هند طراحی شده است. ماهواره RESOURCESAT-1 در ۱۷ اکتبر ۲۰۰۳ در مدار قرار گرفته است. این ماهواره در مدار دایره‌ای شکل نزدیک به قطب و خورشیدآهنگ، با زاویه میل ۹۷٫۶۹ درجه و ارتفاع ۸۱۷ کیلومتری فعالیت می‌کند. ۱۰۱٫۳۵ دقیقه طول می‌کشد تا ماهواره یک تحول[1] خود به دور زمین را کامل کرده و در ۲۴ روز با ۳۴۱ مدار، پوشش کل زمین را تکمیل می‌کند. زمان عبور آن از استوا ۱۰:۳۰ صبح است. چهار سنجنده مستقر در سکوی ماهواره شامل LISS-3، LISS-4Mono، LISS-4MX و AWiFS است که در نتیجه داده‌های با وضوح طیفی، مکانی و زمانی مختلف ارایه می‌کنند. مشخصات سنجنده‌های سازمان فضایی هند (IRS) در جدول ۲–۳ آمده است.

1- Revolution

جدول ۲-۳- برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های سنجنده‌های مستقر در ماهواره‌های IRS

ماهواره	سنجنده	باند طیفی (میکرومتر)	وضوح مکانی (متر)	پهنای روبش (کیلومتر)	سطح کمی‌سازی (بیت)
IRS-1A IRS-1B	LISS-I,II	۰٫۴۵–۰٫۵۲ ۰٫۵۲–۰٫۵۹ ۰٫۶۲–۰٫۶۸ ۰٫۷۷–۰٫۸۶	(I) ۷۳ (II) ۳۶	۱۴۶	۷
IRS-1C	LISS-III	۰٫۵۲–۰٫۵۹ ۰٫۶۲–۰٫۶۸ ۰٫۷۷–۰٫۸۶	۲۳٫۵	۱۴۱	۷
IRS-1D	LISS-III	مشابه بالا ۱٫۵۵–۱٫۷	۲۰ ۷۰٫۵	۱۴۸	
	PAN WiFS	۰٫۵–۰٫۷۵ ۰٫۶۲–۰٫۶۸ ۰٫۷۷–۰٫۸۶	۵٫۸ ۱۸۹	۷۰ ۸۱۰	۶
Resourcesat-1	LISS-III LISS-IV PAN mode AWiFS	مشابه بالا B2: ۰٫۵۲–۰٫۵۹ B3: ۰٫۶۲–۰٫۶۸ B4: ۰٫۷۷–۰٫۸۶ مشابه بالا B2: ۰٫۵۲–۰٫۵۹ B3: ۰٫۶۲–۰٫۶۸ B4: ۰٫۷۷–۰٫۸۶ B5: ۱٫۵۵–۱٫۷۰	مشابه بالا ۵٫۸ مشابه بالا ۵۶ (در Nadir) تا ۷۰	مشابه بالا ۲۳٫۹ مشابه بالا ۳۷۰×۲	مشابه بالا ۱۰ (۷) مشابه بالا ۱۰

ث- ماهواره ALOS[1]

ماهواره ALOS برای مشاهده دقیق زمین در محدوده اپتیکی تا ماکروویو طراحی شده و در تاریخ ۲۴ ژانویه ۲۰۰۶ در مدار خورشیدآهنگ[2] خود قرار گرفته است. ALOS سه سنجنده به نام‌های PRISM، AVNIR-2 و PALSAR دارد (جدول ۲-۴). سنجنده PRISM خود دارای سه سیستم مستقل اپتیکی در بازه طیفی ۰٫۷۷– ۰٫۵۲ میکرومتر برای تصویربرداری از جلو، زیر و عقب ماهواره در راستای مسیر حرکت[3] با پهنای ۳۵ کیلومتر و وضوح ۲٫۵ متر است. تصاویر پانکروماتیک در امتداد مسیر حرکت ماهواره با

1- Advanced land observing satellite
2- Sun-synchronous
3- Along-track

نسبت باز به ارتفاع[1] یک برداشت می‌شوند و قابلیت تولید نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس تا ۱:۱۰،۰۰۰ را دارند. اگر ماهواره از قابلیت جهت‌گیری خود استفاده کند، دوره بازدید مجدد ۴۶ روزه آن به ۲ روز کاهش می‌یابد.

سنجنده AVNIR-2 چهار باند طیفی با وضوح ۱۰ متر و قابلیت چرخش تا ۴۴ درجه دارد (جدول ۲-۴). PALSAR یک سنجنده باند L (۱٫۲۷ گیگاهرتز) SAR است که برای ادامه ماموریت ماهواره JERS-1 طراحی شده است. این سنجنده قادر است در دو حالت یکی برداشت با وضوح بالا (۱۰ متر) با پهنای ۷۰ کیلومتر برای مشاهده تفصیلی منطقه‌ای و دیگری اینترفرومتری[2] و اسکن SAR با پهنای بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ کیلومتر داده گردآوری کند.

جدول ۲-٤- ویژگی‌های عمومی سه سنجنده مستقر در ماهواره ALOS

سنجنده	PALSAR		AVNIR-2	PRISM
	ScanSar	وضوح بالا		
فرکانس (گیگاهرتز)/طول موج (میکرومتر)	۱٫۲۷ GHz (L band)		۰٫۴۲-۰٫۵ ۰٫۵۲-۰٫۶ ۰٫۶۱-۰٫۶۹ ۰٫۷۶-۰٫۸۹	۰٫۵۲-۰٫۷۷
وضوح مکانی (متر)	۱۰۰	۱۰	۱۰	۲٫۵
پهنای روبش (کیلومتر)	۲۵۰-۳۵۰	۷۰	۷۰	۳۵-۷۰
زاویه چرخش (°)	۱۰-۵۱		+/-۴۴	+/-۲۴
تعداد نگاه	۸	۲	Flexible	۳
پلاریزاسیون	HH, VV	HH & HV, VV & VH		
آهنگ انتقال داده (Mbps)	۲۴۰		۱۶۰	۹۶۰

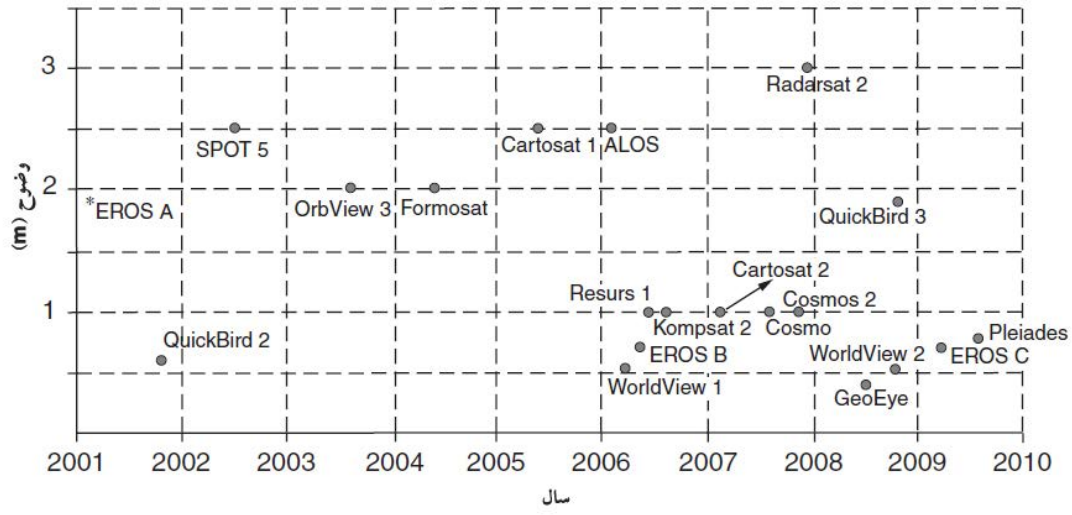
۲-۵-۲- داده‌های فرامکانی

وضوح داده‌های فرامکانی از ۱٫۵ متر شروع می‌شود و تا ۴۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. در عمل این تصاویر جایگزین عکس‌های هوایی در تولید انواع نقشه‌های بزرگ‌مقیاس توپوگرافی و زمین‌شناسی شده‌اند. سنجنده‌های فضابرد فرامکانی علاوه بر کاهش چشمگیر هزینه‌های برداشت داده، امکان تصویربرداری به روز و دوره‌ای از یک نقطه/ منطقه نیز فراهم می‌کنند. عصر داده‌های فرامکانی با پرتاب موفقیت‌آمیز IKONOS-2 در سال ۱۹۹۹ آغاز شد و طی سال‌های اخیر، تعداد ماهواره‌های فرامکانی به شدت افزایش یافته است (شکل ۲-۴).

داده‌های فرامکانی با یک باند پانکروماتیک با وضوح کمتر از یک متر و چند باند طیفی رنگی با وضوح حدود ۲ متر، در عملیات زمین‌شناسی و اکتشافی در زمینه‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

1- Base-to-Height
2- Interferometry

- تولید اطلاعات ارتفاعی و مکانی:
  - تولید نقشه‌های توپوگرافی یک‌دست با فاصله کنتوری تا ۱ متر به ویژه برای مناطق کوهستانی
  - تهیه نقشه‌های پایه از معدن و عملیات معدنکاری
- تولید انبوه اطلاعات زمین‌شناسی (بر اساس اصل حرکت از کلیات به جزییات) تا مقیاس ۱:۲۰۰۰
- مدیریت و برنامه‌ریزی عملیات اکتشافی- زمین‌شناسی مانند:
  - طراحی، پیاده‌سازی، بهینه‌سازی و نمایش موقعیت نقاط نمونه‌برداری ژئوشیمیایی، حفریات اکتشافی (ترانشه)، خطوط پیمایش و ایستگاه‌های اندازه‌گیری ژئوفیزیکی بر روی تصویر
  - تفسیر سایر داده‌های نقطه‌ای بر روی داده‌های یکپارچه تصویری در محیط GIS
  - کمک به طراحی و پیاده‌سازی نقاط حفاری و گسترش و بهینه‌سازی شبکه
  - مطالعه و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی عملیات معدنکاری
  - برنامه ریزی استخراج در معادن بر روی تصاویر به روز
- امور لجستیکی عملیات اکتشافی- زمین‌شناسی مانند:
  - تعیین محل تاسیسات، اسکان، جاده دسترسی، انباشتگاه باطله و نیز پایش سایت معدن
  - سه‌بعدی‌سازی و شبیه‌سازی مجازی سطح در مقیاس‌های مختلف به کمک رایانه (پیوست، شکل ۳).



شکل ۲-٤- انواع ماهواره‌های با وضوح مکانی خیلی بالا که طی ده سال گذشته به فضا پرتاب شده‌اند.

داده‌های فرامکانی متداول و قابل استفاده در اکتشاف و زمین‌شناسی شامل انواع زیر است:

الف- ماهواره IKONOS-2

ماهواره IKONOS-2 که در تاریخ ۲۴ سپتامبر ۱۹۹۹ پرتاب شده، دورسنجی فضابرد را وارد عصر داده‌های فرامکانی کرد. این ماهواره در ارتفاع ۶۸۱ کیلومتری در مداری خورشیدآهنگ به دور زمین می‌چرخد. دوره تحول آن ۹۸ دقیقه است و در شبانه‌روز ۱۴

بار زمین را دور می‌زند. IKONOS دو سنجنده چندطیفی و پانکروماتیک با وضوح ۱ متری دارد (جدول ۲-۵) و با چرخش تلسکوپ خود به طرفین تا ۵۲ درجه، زمان بازدید مجدد آن از ۳۵ روز به ۱٫۵ روز کاهش می‌یابد. داده‌های تصحیح شده IKONOS در سه سطح پردازشی Geo، Pro و PrecisionPlus ارایه می‌شود.

ب- ماهواره QuickBird

QuickBird اولین ماهواره از مجموعه ماهواره‌های در دست طراحی و ساخت شرکت دیجیتال گلوب برای ارایه داده‌های تجاری با کیفیت و وضوح خیلی بالا از سطح زمین است. این ماهواره در ۱۸ اکتبر ۲۰۰۱ در مداری خورشیدآهنگ با ارتفاع تقریبی ۴۵۰ کیلومتری از سطح زمین نصب شده است. زمان عبور مجدد[1] آن بین ۱ تا ۳٫۵ روز در تغییر است که بستگی به عرض جغرافیایی و زاویه تهیه تصویر دارد (جدول ۲-۶). این ماهواره یک باند پانکروماتیک با وضوح ۶۱ سانتی‌متر و ۴ باند چندطیفی با وضوح ۲٫۴ متر دارد و در هر منظر، پهنایی معادل ۱۶٫۵ کیلومتر را روبش می‌کند. دقت مکانی زمینی[2] این داده‌ها بدون نقاط کنترل زمینی حدود ۲۰ متر است.

جدول ۲-۵- مشخصات فنی و ویژگی‌های ماهواره IKONOS

وزن	۷۲۰ کیلوگرم	
ارتفاع	۶۸۱ کیلومتر	
زاویه میل	^{o}۹۸٫۱	
سرعت روی زمین	۶٫۸ ثانیه/کیلومتر	
دوره مدار	۹۸ دقیقه	
عبور مجدد (روز)	۳۵ (رزولوشن ۳ در ۱ متر)	
نوع مدار	خورشیدآهنگ، نزدیک قطبی	
عبور از استوا	۱۰:۳۰ صبح	
پهنای روبش در حالت عمود	۱۳ کیلومتر	
سطح کمی‌سازی	۱۱ بیت	
باند طیفی (میکرومتر)	**XLS**	**PAN**
	۰٫۴۴۵-۰٫۵۱۶ (آبی)	۰٫۴۵-۰٫۹
	۰٫۵۰۶-۰٫۵۹۵ (سبز)	
	۰٫۶۳۲-۰٫۶۹۸ (قرمز)	
	۰٫۷۵۷-۰٫۸۵۳ (NIR)	
وضوح مکانی (متر)	۴	۱ (۰٫۵)*

1- Revisit-Time
2- Geolocational Accuracy

جدول ۲-٦- مشخصات فنی و ویژگی‌های ماهواره QuickBird

تاریخ نصب	۱۸ اکتبر ۲۰۰۱
موشک نصب	Boeing Delta II
محل پرتاب	Vandenberg Air Force Base, California
ارتفاع مدار	۴۵۰ کیلومتر
زاویه میل مدار	۹۷/۲ درجه، خورشیدآهنگ
سرعت	۷/۱ کیلومتر در ثانیه
زمان عبور از استوا	۱۰:۳۰ صبح
طول مدت یک مدار	۹۳/۵ دقیقه
زمان عبور مجدد	۱ تا ۳/۵ روز بسته به عرض جغرافیایی (Off-nadir ۳۰°)
پهنای روبش	۱۶/۵ کیلومتر× ۱۶/۵ کیلومتر در nadir
دقت برداشت	۲۳ متر افقی (CE90%)
سطح کمی‌سازی	۱۱ بیت
وضوح	Pan: 61 cm (nadir) to 72 cm (25° off-nadir) MS: 2.44 m (nadir) to 2.88 m (25° off-nadir)
باندهای تصویر	Pan: ۴۵۰–۹۰۰ نانومتر Blue: ۴۵۰–۵۲۰ نانومتر Green: ۵۲۰–۶۰۰ نانومتر Red: ۶۳۰–۶۹۰ نانومتر Near IR: ۷۶۰–۹۰۰ نانومتر

ماهواره QuickBird سالانه توان تولید ۷۵ میلیون کیلومتر مربع داده تصویری را دارد و به دلیل برداشت طولانی مدت (بیش از ۱۰ سال) آرشیو نسبتا کاملی نیز دارد (به ویژه برای مناطق کوهستانی و غیرقابل دسترس) که در نتیجه اهمیت آن برای کاربران زمین‌شناسی- اکتشاف دوچندان می‌شود.

پ- ماهواره GeoEye-1

ماهواره GeoEye-1 که در ۶ سپتامبر ۲۰۰۸ با موشک دلتا-۲ درمدار نصب شده، بالاترین وضوح مکانی موجود از زمین در بخش تجاری را از آن خود کرده است. مدار خورشیدآهنگ و قطبی ماهواره دارای زاویه میل ۹۸ درجه و ارتفاع ۶۸۴ کیلومتر است. زمان عبور از استوا ۱۰:۳۰ صبح به وقت محلی و با دوره تحول ۹۸ دقیقه، در هر روز قادر است ۱۲ تا ۱۳ مدار را کامل و سطحی معادل ۷۰۰،۰۰۰ کیلومترمربع را تصویربرداری کند. تصاویر آن در دو وضعیت چندطیفی و پانکروماتیک به طور مستقل و هم‌زمان با وضوح به ترتیب ۱/۶۴ متر و ۴۱ سانتی‌متر برداشت می‌شود (جدول ۲-۷). دوربین نصب شده بر روی ماهواره قادر است به طرفین یا به جلو و عقب بچرخد که در نتیجه زمان عبور مجدد آن به ۳ روز و کمتر کاهش می‌یابد. GeoEye-1 می‌تواند عوارض زمینی را با

دقت مکانی ۳ متر جانمایی کند. داده‌های این ماهواره در سطوح مختلفی از قبیل basic، Geo، Ortho و Stereo ارایه می‌شود. داده‌های استریو برای تولید مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پیش‌بینی شده است که ماهواره GeoEye-2 با ویژگی‌های عمومی GeoEye-1 در اوایل سال ۲۰۱۳ در مدار قرار بگیرد و داده‌هایی با وضوح ۲۵ سانتی‌متر برداشت کند.

جدول ۲-۷- مشخصات فنی و ویژگی‌های ماهواره GeoEye-1

ویژگی	چندطیفی	پانکروماتیک
باندهای طیفی	۰٫۴۵–۰٫۵۲ آبی ۰٫۵۲–۰٫۶ سبز ۰٫۶۲۵–۰٫۶۹۵ قرمز (NIR) ۰٫۷۶–۰٫۹	۰٫۴۵–۰٫۹
وضوح مکانی	۱٫۶۴ متر	۰٫۴۱ متر
پهنای روبش	۱۵٫۲ کیلومتر	
سطح کمی‌سازی	۱۱ بیت	
دید به جلو	تا ۶۰°	
زمان عبور مجدد	کمتر از ۳ روز	
ارتفاع	۶۸۴ کیلومتر	
زاویه میل	۹۸°	

ت- ماهواره WorldView-1

ماهواره WorldView-1 اولین ماهواره نسل جدید شرکت Digital Globe است که در ۱۸ سپتامبر ۲۰۰۷ به کمک موشک دلتا در مدار قرار گرفت. قدرت ذخیره‌سازی بالا و داده‌های سیاه–سفید با وضوح نیم متری از ویژگی‌های عمده آن است. ارتفاع مدار خورشیدآهنگ ماهواره ۴۹۶ کیلومتر از سطح زمین و زمان عبور مجدد آن به طور متوسط ۱٫۷ روز و زمان تحول آن ۹۴٫۶ دقیقه است و طی یک روز ۷۵۰،۰۰۰ کیلومتر مربع تصویر را با وضوح نیم متری تهیه و در حافظه ۲۱۹۹ گیگابایتی خود ذخیره می‌کند. پهنای روبش ماهواره WorldView-1 معادل ۱۷٫۶ کیلومتر است و به طور دوسویه سطح را در محدوده طیفی ۰٫۴–۰٫۹ میکرومتر روبش و در ۱۱ بیت ذخیره می‌کند که این امر موجب کیفیت رادیومتری بسیار بالای داده‌ها می‌شود. دقت مکانی زمینی این داده‌ها بدون نقاط کنترل زمینی بسته به وضعیت توپوگرافی و دید به پهلو، تا ۷٫۶ متر نیز می‌رسد.

ث- ماهواره WorldView-2

ماهواره WorldView-2 در ۸ اکتبر ۲۰۰۹ در مدار خورشیدآهنگ در ارتفاع ۷۷۰ کیلومتری نصب شد. علاوه بر باند پانکروماتیک مشابه داده WorldView-1، این ماهواره ۸ باند رنگی با وضوح ۱٫۸ متری نیز دارد (جدول ۲–۸) و تمامی داده‌های آن به صورت ۱۱ بیتی کمی می‌شود. پهنای روبش WV-2 برابر ۱۶٫۵ کیلومتر و دقت زمینی آن بدون لحاظ نقاط کنترل زمینی ۱۰ تا ۱۳ متر است. زمان عبور مجدد آن نیز از ۱٫۱ تا ۴٫۲ روز نوسان می‌کند. کاربردهای آن تهیه نقشه زمین‌شناسی و DEM و نیز اکتشاف منابع زمینی

تا مقیاس ۱:۲۰۰۰ است (پیوست، شکل ۴). در پیوست، شکل ۵ موقعیت و تعداد باندهای ماهواره‌های Digital Globe با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۲-۸- مشخصات فنی و ویژگی‌های ماهواره WorldView-2

ویژگی	WorldView-2
وضوح مکانی (متر)	۰٫۵ (Pan)، ۱٫۸ XSL
باندهای طیفی	۰٫۴۵–۰٫۵۲ آبی
	۰٫۵۲–۰٫۵۹ سبز
	۰٫۶۳–۰٫۶۹ قرمز
	۰٫۷۶–۰٫۸۹ (NIR)
	۰٫۴۲۳–۰٫۴۵۳ (Coastal)
	۰٫۵–۰٫۶۴ زرد
	۰٫۷–۰٫۷۳ (Red Edge)
	۰٫۹–۱٫۰۵ (NIR-2)
ارتفاع (کیلومتر)	۷۷۰
پهنای روبش (کیلومتر)	۱۶٫۵
عبور مجدد (روز)	۱٫۱ در ۱ متر تا ۴٫۲ در ۰٫۵۲ متر GSD
نوع مدار	دایره‌ای و خورشیدآهنگ
قابلیت دید به پهلو	تا ۴۵° در ۴٫۵° در ثانیه
سطح کمی‌سازی	۱۱ بیت
دقت مکان‌یابی	۶٫۵ متر CE90 در nadir
آهنگ انتقال داده	۸۰۰ (Mbps×band)

۲-۵-۳- داده‌های فراطیفی

ویژگی‌های عمده یک طیف‌سنج تصویری برداشت داده تصویری در صدها باند پیوسته، با فاصله طول موجی منظم و وضوح طیفی حدود ۱۰ نانومتر است که در نتیجه نمودار بازتابی یا تابشی پیوسته‌ای برای هر پیکسل تصویر، مشابه انواع آزمایشگاهی به دست می‌آید. با پردازش این داده‌ها، نه تنها تمایز، بلکه شناسایی انواع کانی‌ها و ثبت تغییرات شیمیایی و بلورین آن‌ها ممکن می‌شود. در سه دهه گذشته سنجنده‌های فراطیفی متعددی طراحی و توسعه یافته‌اند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲-۹ درج شده است. مهم‌ترین سنجنده‌های فراطیفی قابل دسترس سنجنده‌های HyMap و Hyperion هستند.

جدول ۲-۹- مهم‌ترین سنجنده‌های فراطیفی موجود و یا در دست ساخت

سنجنده/ ماهواره	سازنده	هدف	تعداد باند	بازه طیفی (میکرومتر)
FTHSI On MightySat II	Air Force Research Lab	نظامی R & D	۲۵۶	۰/۳۵ تا ۱/۰۵
Hyperion On EO-1	NASA Goddard Space Flight Center	سازمان فضایی	۲۲۰	۰/۴ تا ۲/۵
AVIRIS[1]	NASA Jet Propulsion Lab	علمی R & D	۲۲۴	۰/۴ تا ۲/۵
HYDICE[2]	Naval Research Lab	نظامی R & D	۲۱۰	۰/۴ تا ۲/۵
PROBE-1	Earth Search Science Inc.	تجاری و کاربردی	۱۲۸	۰/۴ تا ۲/۵
CASI[3]	ITRES Research Limited	تجاری و کاربردی	تا ۲۲۸	۰/۴ تا ۱
HyMap[4]	Integrated Spectronics	تجاری و کاربردی	۱۰۰ تا ۲۰۰	۰/۴۵-۲/۵
EPS-H[5]	GER[6]	-	۱۳۶+۱۲	۰/۳ تا ۲/۵
DAIS	GER Corporation	-	۲۱۱	۰/۴ تا ۱۲
AIS[7]	Spectral Imaging	علمی R & D	۱۲۸	۱/۲-۲/۴
AHI	-	دانشگاهی R & D	۲۱۰	۷/۹-۱۱/۵
TRWIS	-	علمی R & D	۳۸۴	۰/۳-۲/۵
AIS	Specim	-	۲۴۰	Visible-nIR
ARCHER	-	Civil Air Patrol	۵۱۲	۰/۵-۱/۱
COMPASS	Air Force Research Lab	تشکیلات نظامی	۲۵۶	۰/۴-۲/۵
SEBASS	-	نظامی R & D	۱۲۸ و ۱۲۸	۲-۵ و ۸-۱۴

الف- سنجنده HyMap

HyMap سنجنده‌ای هوابرد و تجاری با طراحی هنرمندانه است که توسط شرکت Spectronix استرالیا طراحی و ساخته شده و توسط شرکت HyVista بهره‌برداری می‌شود. این سنجنده دارای وضوح مکانی ۵ متر و بیشتر است که به ارتفاع پرواز هواپیما و

1- Airborne visible infrared imaging spectrometer
2- Hyperspectral digital imagery collection experiment
3- Compact airborne spectrographic imager
4- Hyperspectral mapper
5- Environmental protection system
6- geophysical & environmental research corporation
7- Airborne imaging spectrometer

میدان دید اپتیک آن بستگی دارد. وضوح طیفی آن حدود ۱۵ نانومتر و وضوح رادیومتری یا نسبت سیگنال به نویز آن بیش از ۱۰۰۰ است. HyMap ۱۲۶ باند دارد که با اسکنر نوع متقاطع با مسیر[1] یا ویسک بروم[2] و منشور تفکیک‌کننده[3] و ۴ آرایه جداگانه با ۳۲ حسگر برداشت می‌شود. HyMap همچنین پایدارکننده ژیروسکوپی دارد و لذا داده‌های برداشتی آن دارای حداقل خطای هندسی است. در پیوست، شکل ۶ طیف حاصل از HyMap با طیف‌سنج زمینی مقایسه شده است.

ب- سنجنده Hyperion

سنجنده Hyperion که در قالب برنامه هزاره جدید و به وسیله JPL به همراه دو ابزار دورسنجی دیگر یعنی تصحیح‌گر اتمسفر[4] و سنجنده ALI در نوامبر سال ۲۰۰۰ در مدار قرار گرفته است، اولین ماهواره فراطیفی محسوب می‌شود.

Hyperion داده‌هایی در محدوده بین ۲٫۶-۰٫۳۶ میکرومتر با وضوح طیفی تقریبا ۱۰ نانومتر و وضوح مکانی ۳۰ متر در ۲۴۲ باند طیفی فراهم می‌کند. برخی از باندهای آن در بخش‌های بالایی و پایینی محدوده، نسبت سیگنال به نویز پایین دارند و قابل استفاده نیستند و لذا طی پردازش‌های سطح یک، تنها ۱۹۸ باند کالیبره و استفاده می‌شود. پهنای روبش این سنجنده ۷٫۵ کیلومتر است.

۲-۵-٤- داده‌های راداری

داده‌های ماهواره‌ای راداری در مطالعه پدیده‌های فعال سازه‌ای، نشست زمین، بررسی پایداری دیواره پله‌های معادن بر اساس روش تداخل‌سنجی، تولید مدل رقومی ارتفاع، مطالعات ساختاری و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی بر اساس زبری کاربرد دارد (شکل ۲-۵). مهم‌ترین داده‌های راداری شامل موارد زیر است:

- **ماهواره JERS-1** در ۱۱ فوریه ۱۹۹۲ در مدار خورشیدآهنگ با زاویه میل ۹۷٫۷ درجه و ارتفاع ۵۶۸ کیلومتر قرار گرفت. سنجنده SAR آن در باند L (۱٫۳ گیگاهرتز) داده‌هایی با وضوح ۱۸ متری و پهنای روبش ۷۵ کیلومتری فراهم می‌کند.

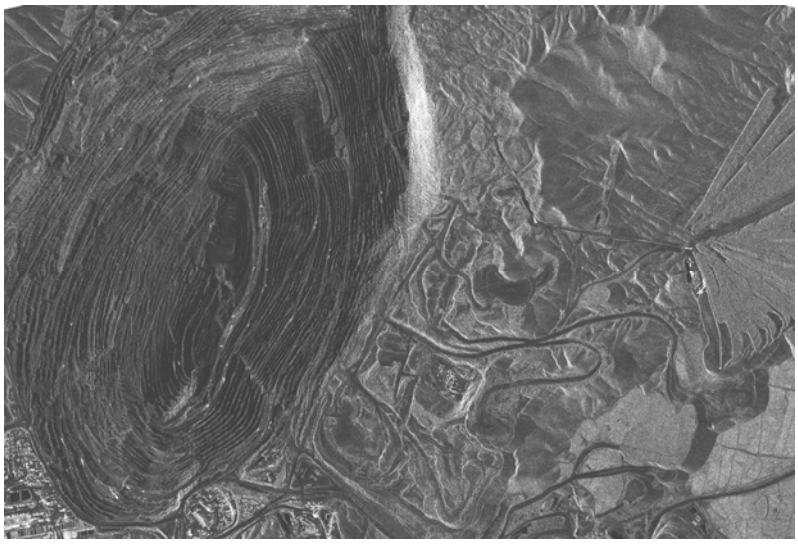
- **ماهواره ERS-1** در ۱۷ جولای ۱۹۹۱ و ERS-2 در آوریل ۱۹۹۵در مدار نصب شد و داده‌هایی با وضوح ۲۶ متر ارایه می‌کند.

- **ماهواره RADARSAT-1** در ۴ نوامبر ۱۹۹۵ و RADARSAT-2 در ۱۴ دسامبر ۲۰۰۷ به فضا پرتاب شد و به ترتیب وضوح مکانی ۳۰ و ۳ متری دارند.

- **ماهواره EnviSat** در اول مارس ۲۰۰۲ در مداری با ارتفاع ۸۰۰ کیلومتری قرار گرفت و سنجنده ASAR آن قادر است داده‌هایی با وضوح ۳۰ متر برداشت کند.

از دیگر داده‌های راداری می‌توان به TerraSAR-X و TanDEM با وضوح ۱متر، داده‌های Cosmo Skymed با وضوح ۱ متر و سنجنده PALSAR ماهواره ALOS اشاره کرد.

1- Cross-Track
2- Whiskbroom
3- Diffraction grating
4- Atmospheric corrector



شکل ۲-۵- داده راداری TerraSAR-X بر روی یک معدن در حال بهره‌برداری

۲-۵-۵- سایر داده‌های دورسنجی

عکس‌های هوایی جزو قدیمی‌ترین و (هنوز هم) مهم‌ترین داده‌های دورسنجی محسوب می‌شوند که هم به صورت آنالوگ و هم رقومی (اسکن شده با وضوح کافی) به کار می‌روند. عکس‌های هوایی در مقایسه با داده‌های ماهواره‌ای دارای تفاوت‌ها و مزایا/ معایب زیر هستند:

- همپوشانی کافی عکس‌ها دید سه‌بعدی یا استریوسکوپی فراهم می‌کند.
- وضوح مکانی عکس‌های هوایی به تراکم رنگ دانه‌های فیلم بستگی دارد و عملا بی‌نهایت است.
- عکس‌های هوایی آنالوگ‌اند و باید برای استفاده در رایانه رقومی (اسکن) شوند.
- هندسه عکس‌های هوایی ساده است و عموما دارای اعوجاج و جابه‌جایی در طرفین هستند.
- عکس‌های هوایی بیشتر سیاه–سفید و فاقد رنگ هستند.

نسل امروزی عکس‌های هوایی، رقومی و عموما رنگی است. سنجنده‌هایی مانند UltraCam که بر روی هواپیما نصب می‌شوند، قادرند تصاویری با وضوح مکانی چنده سانتی‌متری تهیه کنند. تصاویر این چنینی در عملیات تفصیلی با مقیاس بالاتر از ۱:۱۰۰۰ به ویژه برای مطالعه سایت معدن و عملیات استخراج، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از دیگر داده‌های دورسنجی می‌توان ماهواره‌های ALI، MODIS، KOMPSAT-2، OrbView-2، RapidEye، FORMOSAT، داده‌های حرارتی، داده‌های ژئوفیزیک هوایی (گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، الکترومغناطیس و پرتوسنجی گاما)، داده‌های مغناطیس ماهواره‌ای مانند Oersted، SAC-C و Magsat، داده‌های LiDAR[1]، داده‌های رقومی ارتفاعی و داده‌های طیف‌سنجی زمینی (دستگاه PIMA و ASD) را نام برد که دو مورد اخیر، در فصل‌های بعد بررسی می‌شوند.

1- Light detection and ranging

۲-۵-٦- آینده داده‌های دورسنجی

امروزه تولید و فروش داده‌های ماهواره‌ای به یک تجارت بسیار پرسود تبدیل شده است. جهت‌گیری و روند کنونی بازار، پاسخ به تقاضای فزاینده برای داده‌هایی با وضوح مکانی خیلی بالا (مانند GeoEye-1,2) و وضوح زمانی کم (WorldView-1) و نیز داده‌های استریویی (به طور نمونه ALOS، CARTOSAT و WorldView-1) به منظور تولید مدل رقومی ارتفاع در مقیاس‌های بزرگتر برای پوشش پدیده‌های بسیار فعال مانند سیل، طوفان، زلزله، سونامی، لکه‌های نفتی، آتش‌سوزی جنگل‌ها، فوران آتشفشان‌ها و نظایر آن‌ها است. پس از اشباع این بازار و یا به موازات آن، داده‌های دورسنجی منابع زمینی به ترتیب زیر رشد خواهند کرد:

- ماموریت ماهواره‌هایی مانند لندست و اسپات با Landsat-8 و SPOT-6 ادامه خواهد یافت.
- داده‌های فراطیفی فضابرد، به دنبال موفقیت Hyperion از رویا به واقعیت تبدیل خواهد شد.
- داده‌های حرارتی هوابرد/فضابرد با تعداد باند بیشتر و وضوح مکانی بالاتر محقق می‌شود.
- با داده‌های استریویی یا راداری، DEM وضوح بالای کل زمین تولید خواهد شد.
- داده‌های فرامکانی و فراطیفی به صورت نسل WorldView-2 به هم پیوند می‌خورند.
- داده‌های راداری SAR و رادار تصویربردار نقش پررنگ‌تری در مطالعه زمین بر عهده می‌گیرند.
- هواپیماهای فوق سبک با انعطاف‌پذیری بالا در دورسنجی هوابرد جایگاه مهمی خواهند یافت.
- هزینه‌های تهیه داده‌ها در اثر رقابت و گذر زمان به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.
- سطح پردازش و تنوع محصولات افزایش می‌یابد و اطلاعات پردازش شده جای داده خام را می‌گیرد.

۲-٦- معیارها و استانداردهای انتخاب داده‌های ماهواره‌ای

سوال اساسی در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای این است که چه داده‌ای باید برای مطالعه پدیده زمین‌شناسی- اکتشافی پیش رو انتخاب شود؟ با افزایش و تنوع گزینه‌ها، انتخاب داده مناسب به یک مساله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود که تابع هدف آن، تولید اطلاعاتی متناسب با نیاز پروژه با لحاظ کردن محدودیت‌هایی نظیر مقیاس، دسترسی، وضوح طیفی، محدودیت‌های مالی و نظایر آن‌ها است. نظر به اهمیت این مبحث فصل ۷ به طور ویژه به آن اختصاص یافته است.

۲-۷- جستجو و سفارش تصاویر

سفارش و تهیه داده‌های ماهواره‌ای از دو طریق زیر میسر است:

۲-۷-۱- سفارش خرید از آرشیو تصاویر

شرکت‌های ارایه دهنده داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر برداشت شده را به سرعت وارد بایگانی خود می‌کنند و از این رو ابعاد یک بایگانی ارتباط مستقیم با عمر ماهواره دارد. داده‌های بایگانی شده از طریق تارنمای هر شرکت یا نرم‌افزارهایی مانندGoogle Earth قابل جستجو و سفارش هستند. برخی از داده‌های ماهواره‌ای نیز به وسیله شرکت‌های خصوصی و یا سازمان‌های دولتی در ایران

بایگانی شده و در اختیار مراجعه‌کنندگان قرار می‌گیرد که از جمله آن‌ها داده‌های ASTER و IRS-P5&6 است. داده‌های بایگانی شده چند مزیت عمده دارند که از جمله آن‌ها هزینه کمتر، دسترسی آسان‌تر و سریع‌تر (بین چند روز تا چند هفته) و میزان ابر مشخص است. نحوه سفارش داده از یک بایگانی دو حالت یکی بر اساس منظر و دیگری بر اساس مساحت دارد. داده‌هایی که به صورت منظر یا ضریبی از منظر (۱/۲، ۱/۴ و ...) ارایه می‌شوند، بیشتر شامل داده‌های با وضوح مکانی کم تا متوسط هستند که قیمت پایین‌تری نیز دارند. داده‌های فرامکانی معمولا به صورت مساحتی (بر حسب کیلومتر مربع) در اختیار گذاشته می‌شوند. مساحت قابل سفارش محدودیت دارد و حداقل آن ۲۵ کیلومتر مربع است.

۲-۷-۲- سفارش اخذ داده جدید

سنجنده‌هایی که اپتیک آن‌ها قابلیت نشانه‌روی داشته باشد، امکان اخذ تصویر جدید بر طبق سفارش مشتری را دارند. اخذ جدید در مواردی مانند نبود داده، نبود داده دلخواه (مانند داده استریو)، نبود داده با کیفیت مطلوب (داده ابری) و یا نبود داده به روز توصیه می‌شود. حداقل مساحت برای اخذ جدید بستگی به نوع ماهواره، نوع داده (استاندارد یا استریو) و عجله سفارش دهنده دارد و بین ۱۰۰ تا ۲۱۰ کیلومتر مربع در تغییر است. مهم‌ترین محدودیت‌های اخذ جدید زمان نسبتا طولانی انتظار (در حد چند ماه)، قیمت بالاتر و پوشش ابر است. داده‌های با ۱۵ تا ۲۰٪ ابر برداشت موفق محسوب شده و تحویل می‌شود.

سفارش اخذ برای سنجنده‌های هوابرد (مانند HyMap) نیازمند اجاره سنجنده برای یک دوره زمانی مشخص و هواپیمای مناسب برای پرواز است که با توجه به محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌ای، این امکان فقط برای سازمان‌های دولتی فراهم است.

قیمت داده‌های دورسنجی به اندازه منظر، وضوح مکانی، سطح پردازش و قدمت داده بستگی دارد. ماهواره‌هایی که تنوع داده دارند (داده پانکروماتیک، رنگی، راداری و استریو)، ممکن است داده‌های خود را جداگانه و یا به صورت یک‌جا[1] در یک منظر یا در یک مساحت مشخص توزیع کنند.

سطح پردازش و محصولات داده‌های ماهواره‌ای بسیار متنوع و وابسته به نوع سنجنده است. برای اطلاع از جزییات، تنوع و ویژگی انواع مختلف و سطوح داده‌های یک سنجنده/ماهواره باید به کتابچه و راهنمای کاربر آن مراجعه کرد. در یک نگاه کلی مهم‌ترین سطوح پردازشی داده‌ها شامل موارد زیر است:

– داده خام: پایین‌ترین سطح پردازش است و در آن بیشتر خطاهای ناشی از خود سنجنده اصلاح شده و داده به شکل یک تصویر ارایه می‌شود.

– داده مختصات‌دار[2]: تصویر به وسیله اطلاعات موقعیتی خود ماهواره در یک سیستم مختصاتی (بیشتر WGS84) توجیه و نمونه‌برداری مجدد شده و خطای هندسی ناشی از چرخش زمین و انحراف مدار ماهواره رفع شده است.

– داده تصحیح شده رادیومتری: عدد پیکسل‌های تصویر به رادیانس در سنجنده تبدیل شده است.

– داده متعامد شده[3]: هر دو جابه‌جایی افقی و قائم تصویر حذف می‌شود.

1- Bundle
2- Projected
3- Orthorectified

– داده رنگی: ترکیبی رنگی از داده‌های چندطیفی ارایه می‌شود.

– داده واضح شده[1]: داده‌های چندطیفی رنگی با باند پانکروماتیک ترکیب می‌شود.

– داده بارز شده[2]: کیفیت عوارض خاصی در تصویر افزایش یافته است.

– سطوح بالاتر پردازش[3]: بر اساس تقاضای مشتری انواع تصحیحات رادیومتری بر روی داده‌ها اعمال می‌شود و گاه ممکن است اطلاعات استخراجی را نیز شامل شود. بدیهی است با افزایش سطح پردازش، هزینه تهیه داده افزایش و نقش کاربر در چرخه پردازش، کاهش می‌یابد.

1- Pan-sharped
2- Enhanced
3- Higher-Level products

فصل ۳

استانداردهای پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

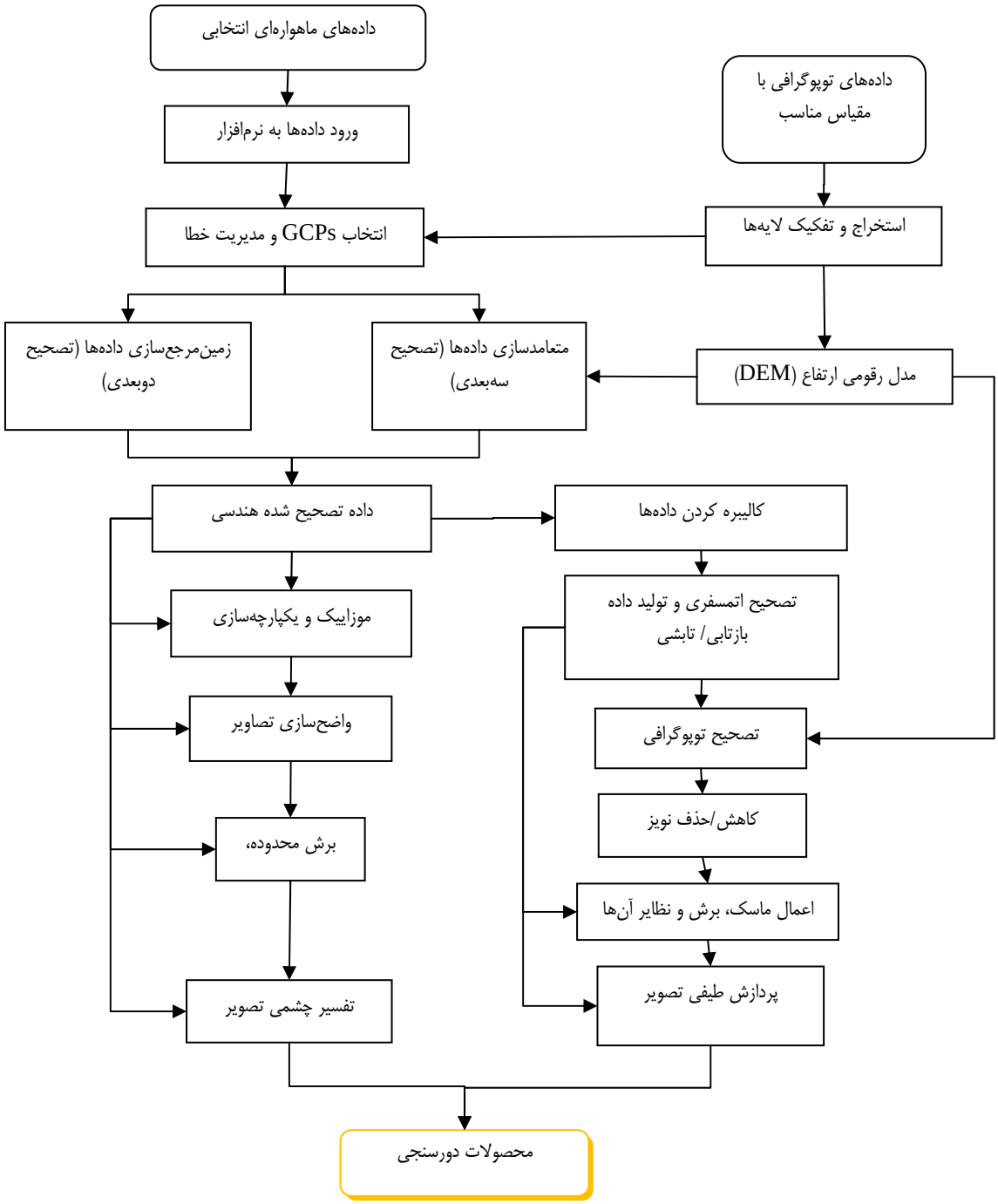
۳-۱- آشنایی

داده‌های دورسنجی هوابرد/فضابرد از درون یا بیرون جو با سکوی در حال حرکت از سطح نسبتا ناهموار زمین به طور دوره‌ای و در زمان‌های مختلف برداشت می‌شوند و از این رو استخراج اطلاعات در بررسی‌های اکتشافی- زمین‌شناسی نیازمند یک سلسله تصحیحات و پیش‌پردازش‌ها قبل از عملیات پردازش اصلی است (شکل ۳-۱). انجام یک یا چند مرحله از این مراحل به نوع داده و ماهیت پروژه بستگی دارد. اعمال مجموعه‌ای از تصحیحات قبل از به کارگیری داده‌ها الزامی است. پیش‌پردازش معمولا شامل دو گروه تصحیحات هندسی و رادیومتری است، اما استانداردهای یکپارچه و واضح‌سازی نیز در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- تصحیح هندسی

عمده‌ترین عواملی که سبب ایجاد خطای هندسی و اعوجاج[1] در تصاویر دورسنجی می‌شوند شامل تغییر وضعیت، ارتفاع و سرعت ماهواره، تغییر موقعیت هواپیما (جهش[2]، پیچش[3] و چرخش)، هندسه دوربین، دوران و انحنای زمین، اثر پانوراما[4] و از همه مهم‌تر پستی- بلندی سطح زمین هستند. در سطوح مختلف داده‌ها، اثر بیشتر این عوامل از تصویر حذف می‌شود، ولی خطای ارتفاعی به طور معمول تصحیح نمی‌شود. تصحیح هندسی، اولین و ضروری‌ترین تصحیح مورد نیاز داده‌های دورسنجی است و به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی انجام می‌گیرد. با اعمال تصحیحات هندسی، هر پیکسل تحت یک سیستم مختصاتی (معمولا WGS84) به موقعیت متناظر خود در سطح زمین مرتبط می‌شود و بنابراین ارتباطی دوسویه بین فضای تصویر و سطح زمین شکل می‌گیرد. عکس- نقشه حاصل را می‌توان به کمک GIS به سایر داده‌ها و با GPS به عوارض زمینی مرتبط کرد.

1 -Distortions
2- Pitch
3- Yaw
4- Panoramic effect



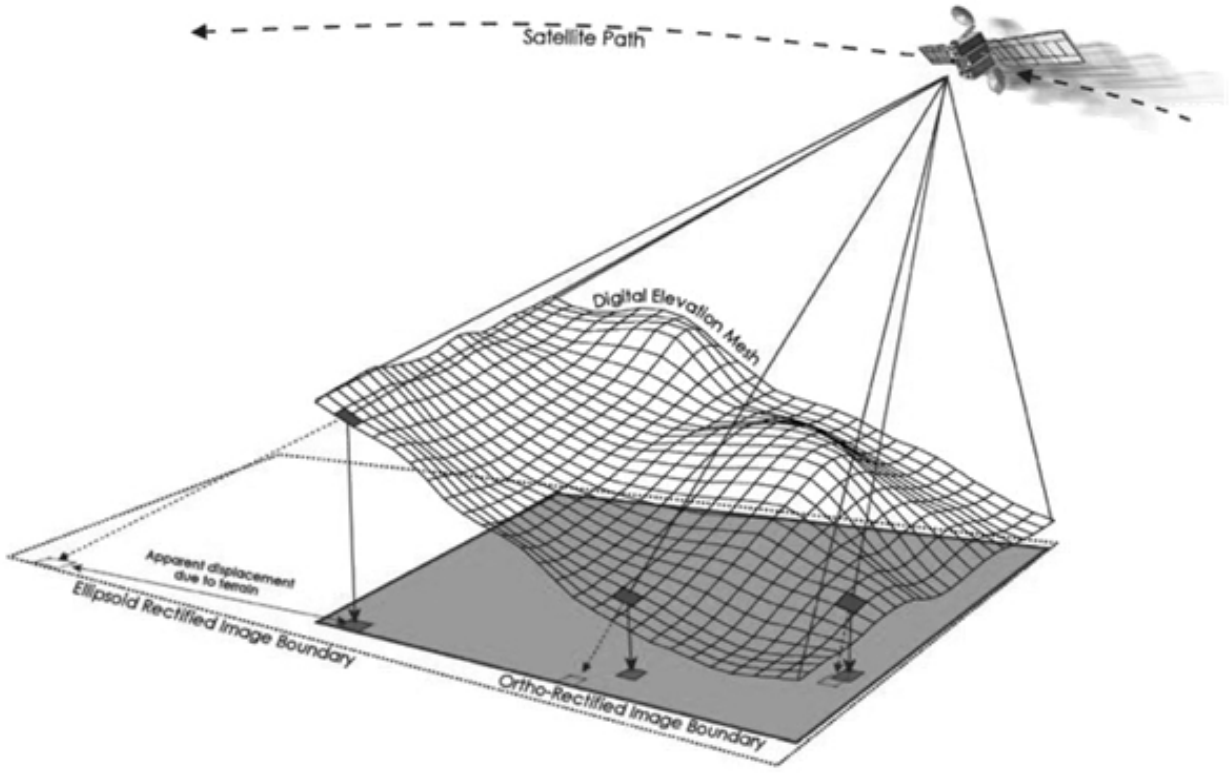
شکل ۳-۱- مراحل آماده‌سازی و پیش‌پردازش داده‌های دورسنجی (بازتابی/تابشی) در یک برنامه مطالعاتی زمین‌شناسی-اکتشافی

۳-۲-۱- تصحیح دوبعدی (زمین‌مرجع‌سازی)

در تصحیح دوبعدی، بدون شناخت و یا مدلسازی منابع خطا، ارتباط بین مختصات جغرافیایی (x,y) زمین و مختصات پیکسل‌های تصویر (i,j) با یک تابع تبدیل (معمولا چندجمله‌ای) برقرار می‌شود. تعداد و دقت نقاط کنترل زمینی انتخاب شده، ضرایب و درجه چندجمله‌ای را تعیین می‌کند. خطای مجاز که با روش کمترین مربعات تعیین می‌شود، باید کمتر از ۱ پیکسل باشد و درجه چندجمله‌ای بهتر است از یک یا دو فراتر نرود. بهترین موارد استفاده از این روش، زمین‌مرجع کردن نقشه‌های اسکن شده مانند نقشه زمین‌شناسی و نظایر آن‌ها است.

۳-۲-۲- تصحیح سه‌بعدی (متعامدسازی[1])

روش دقیق‌تر تصحیح داده‌ها که بعد سوم، یعنی ارتفاع (Z) را نیز لحاظ می‌کند، متعامدسازی نامیده می‌شود. این تصحیح به ویژه برای داده‌های فرامکانی، تصاویر ورودی به GIS، نقشه‌های دگرسانی و نیز ترکیب تصاویر سنجنده‌های مختلف با هم ضرورت دارد. در تصحیح سه‌بعدی، خطای تصویر با استفاده هم‌زمان از مدل سنجنده[2]، در کنار تعداد محدودی نقطه کنترل زمینی و مدل رقومی ارتفاعی[3] تهیه می‌شود (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲- تصحیح هندسه تصویر با مدلسازی وضعیت برداشت تصویر به کمک مدل رقومی ارتفاع و اطلاعات مداری ماهواره

1- Orthorectification
2- Sensor model
3- Digital elevation model (DEM)

عکس‌های هوایی به صورت یک قاب هم‌زمان برداشت می‌شوند و هندسه ساده‌ای دارند. پارامترهای مورد نیاز برای متعامدسازی آن‌ها شامل توجیه داخلی[۱] و خارجی[۲] عکس و یک DEM مناسب است. توجیه داخلی برای برقرارسازی ارتباط بین دوربین و عکس از طریق نقاط معتمد[۳]، فاصله کانونی و توجیه خارجی برای مرتبط کردن عکس با زمین از طریق نقاط کنترل زمینی انجام می‌گیرد.

تصاویر ماهواره‌ای هندسه پیچیده‌تری دارند. برای تسهیل فرآیند تصحیح، مدل‌های طولانی و پیچیده سنجنده‌های ماهواره‌ای، با مدل‌های ساده‌تر زیر جایگزین می‌شوند:

الف- مدل‌های چندجمله‌ای نسبتی ماهواره‌ای[۴]:

مدل‌های ریاضی تجربی ساده شده شامل دو نسبت چندجمله‌ای[۵] درجه ۳ (طول، عرض و ارتفاع) برای محاسبه موقعیت خطوط اسکن و موقعیت ستون‌ها هستند و بیش از ۲۰ ضریب دارند. این ضرایب توسط شرکت ارایه دهنده داده، برای هر تصویر به طور جداگانه محاسبه می‌شود. این روش با عنوان قابلیت موقعیت‌یابی سریع[۶] نیز شناخته می‌شود.

ب- مدل ریاضی تابع نسبتی[۷]:

این روش در مواقعی که اطلاعات مورد نیاز برای مدل ریاضی مطلق، ضرایب RPC و یا کل یک منظر در دسترس نباشد، پیشنهاد می‌شود. در روش تابع نسبتی ضرایب چندجمله‌ای بر اساس نقاط کنترل زمینی سه‌بعدی و یا پارامترهای توجیه خارجی[۸] (در صورت وجود) محاسبه می‌شود.

پ- مدل ریاضی مدار ماهواره[۹]:

این مدل‌های جامع و تجربی، معادلات ساده‌ای دارند که بر پایه شرایط خطی تبدیل بین فضای تصویر و فضای زمین، توسعه یافته و دقت آن‌ها مناسب است (تا حد یک‌سوم پیکسل). معادلات این مدل با تعدادی نقطه کنترل زمینی، چند نقطه گره و یک DEM قابل حل هستند.

ت- مدل جایگزین سنجنده[۱۰]:

این مدل عمومی است و با سطح اطمینان بالا می‌توان آن را تقریبا با همه مدل‌های سنجنده (هوابرد و فضابرد) جایگزین کرد.

۳-۲-۳- گردآوری نقاط کنترل زمینی

نقاط کنترل زمینی در تولید DEM، در تصحیح هندسی (دو/سه‌بعدی)، توجیه داخلی/خارجی عکس‌های هوایی و گاه در یکپارچه‌سازی تصاویر مورد نیاز است. منابع زیر برای گردآوری نقاط کنترل زمینی وجود دارد:

1 -Interior orientation
2 -Exterior orientation
3 -Fiducial marks
4 -Rational polynomial satellite sensor models
5- Rational polynomial coefficient (RPC)
6 -Rapid positioning capability (RPC)
7 -Rational functions
8 -Exterior orientation parameters
9 -Satellite orbital math model
10 -Replacement sensor model (RSM)

- نقشه‌های پایه توپوگرافی با مقیاس متناسب
- تصاویر تصحیح شده قبلی با وضوح مکانی مناسب
- برداشت زمینی با سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)

نقاط کنترل زمینی به طور مستقیم بر روی دقت مدل ریاضی و نتیجه متعامد/ زمین‌مرجع‌سازی تاثیر می‌گذارند و لذا اهمیت و حساسیت زیادی دارند. به هنگام جمع‌آوری نقاط کنترل زمینی نکات زیر باید مد نظر قرار گیرد:

- نقاط کنترل برای زمین‌مرجع کردن شامل x و y است و برای متعامدسازی z نیز مورد نیاز است.
- نقاط انتخابی در تصویر و نقشه پایه باید ثابت و دقیق باشند و از نقاط متحرک مانند سایه‌ها اجتناب شود. تجربه نشان داده که تقاطع آبراهه‌ها مکان مناسبی برای انتخاب نقاط کنترل زمینی است.
- حداقل تعداد نقاط مورد نیاز به نوع داده، وضعیت توپوگرافی و دقت مدل ماهواره‌ای بستگی دارد و معمولا نباید کمتر از ۶ نقطه باشد. برای افزایش دقت توصیه می‌شود از چنده نقطه کنترلی برای متعامدسازی استفاده شود.
- نقاط در سراسر تصویر و به ویژه در ارتفاعات باید توزیع مناسب/متناسب داشته باشند. ترتیب انتخاب نقاط نیز بر روی همگرایی مدل تاثیر دارد. بهتر است انتخاب نقاط از گوشه‌های تصویر شروع شود و در مرکز تصویر پایان یابد. از انتخاب نقاط بر روی خط مستقیم باید اجتناب کرد.
- خطای مجاز کل پیشنهادی برای مجموعه نقاط حدود ۱٫۳ پیکسل (RMS<0.3) است. نقاط پرخطا باید با جابه‌جایی، جایگزینی و یا حذف، مدیریت شوند.

اگر تعداد نقاط کافی و میزان خطا پایین باشد و یا مدل ساخته شده توانایی پیش‌بینی صحیح موقعیت یک نقطه جدید را داشته باشد، در آن صورت، کار انتخاب نقاط کنترل پایان یافته است.

۳-۲-۴- انتخاب مدل رقومی ارتفاع

مدل رقومی ارتفاع یا DEM، نمایش رستری و ناپیوسته ارتفاع سطح زمین است. وضوح مکانی[1] DEM معرف میزان دقت آن در نمایش مورفولوژی سطحی و دقت ارتفاعی بیانگر دقت مطلق در اندازه‌گیری ارتفاع است. از پارامتر CE90[2] برای بیان دقت نسبی[3] جانمایی افقی پیکسل‌ها و از پارامتر LE90[4] برای بیان میزان دقت مطلق[5] ارزش عددی پیکسل‌های DEM استفاده می‌شود. پارامتر نخست به معنی قطر دایره افقی محاط به ۹۰٪ عوارض کنترلی و دیگری معرف فاصله عمودی (بر حسب متر) در برگیرنده ۹۰٪ نقاط کنترل است. در کنار DEM به عنوان یک واژه عمومی، واژگان تخصصی‌تر مدل رقومی سطح[6] (DSM) و مدل رقومی زمین[7]

1 -Spatial resolution
2- Circular eror of 90%
3- Relative accuracy
4- Linear eror of 90%
5- Absolute accuracy
6- Digital surface model (DSM)
7- Digital terrain model (DTM)

(DTM) قرار دارند که به ترتیب برای تعریف سطح زمین با همه عوارض (مثل درختان یا ساختمان‌ها) و سطح بدون عوارض نامبرده به کار می‌روند. ارتفاع DEM، نسبت به میانگین سطح دریای آزاد یا ژئوئید[1] تعریف می‌شود. روش‌های مختلف تولید DEM در فصل ۴ بحث شده است.

برای متعامدسازی تصویر، DEM انتخابی لازم است وضوحی برابر یا بیشتر از وضوح تصویر مورد تصحیح داشته باشد. همچنین از آنجایی که مولفه ارتفاعی ماهواره نسبت به بیضوی[2] با مرکز زمین، یعنی سیستم جهانی ژئودزی[3] تعریف می‌شود، لازم است ارتفاع DEM از سطح ژئوئید به سطح بیضوی تبدیل شود.

برخی از دیگر کاربردهای DEM شامل تولید نقشه‌های تجسمی[4]، شبیه‌سازی مجازی دید استریویی، سه‌بعدی‌سازی و پرواز، تعیین شیب و امتداد، حذف اثر توپوگرافی از داده‌های بازتابی و راداری، تصحیح اتمسفری داده‌های بازتابی، تصحیح داده‌های ژئوفیزیکی (گرانی و مغناطیسی)، آنالیزهای ژئومورفولوژی، تعیین مدل جریانات آب، محاسبه احجام و تهیه مقطع زمین‌شناسی است.

۳-۲-۵- اعمال تصحیح هندسی بر تصویر

پس از گردآوری تعداد کافی نقطه کنترل زمینی و انتخاب DEM، باید بر اساس مدل ماهواره‌ای یا تابع تبدیل، داده‌ها متعامد/زمین‌مرجع شوند. در متعامدسازی، معادلات مدل ماهواره برای تک-تک پیکسل‌ها حل می‌شود و از این راه پیکسل‌ها به جای واقعی خود در زمین منتقل می‌شوند. در روش زمین‌مرجع‌سازی، پیکسل‌های بین نقاط کنترل با توابعی مانند چندجمله‌ای، مثلث‌بندی و RST مرتبط می‌شوند. در صورتی که هدف استفاده از ویژگی‌های طیفی تصویر باشد، باید با روش نمونه‌برداری مجدد نزدیک‌ترین همسایه[5] انتخاب شود. سیستم مختصاتی متداول در متعامدسازی UTM-WGS84 است، اما سیستم‌های دیگر نیز برای تصاویر به کار می‌روند (فصل ۵).

میزان خطای تصویر متعامد شده به دقت ضرایب چندجمله‌ای‌ها، تعداد، توزیع و دقت نقاط کنترل زمینی، دقت پارامترهای مدل ماهواره‌ای و وضوح مکانی و دقت DEM بستگی دارد. برای کنترل صحت و دقت هندسه تصاویر، می‌توان از لایه‌های برداری جاده و آبراهه استفاده کرد. این عوارض در صورت تصحیح مناسب تصویر، باید در موقعیت مناسب خود قرار گیرند (پیوست، شکل ۷).

سنجنده‌هایی مثل HyMap با فایل‌های GLT[6] که در آن موقعیت هندسی پیکسل‌ها تعریف شده‌اند، همراه می‌شوند. در این صورت، تصحیح هندسی بسیار ساده است و با اعمال این فایل‌ها بر هر نوار انجام می‌گیرد.

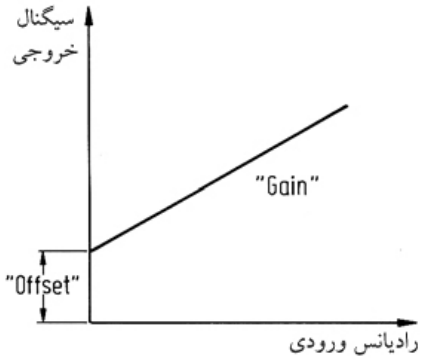
1- Geoid
2-Ellipsoid
3-World geodetic system
4- Perspective
5- Nearest neighbors
6- Geographic lookup table (GLT)

۳-۳- تصحیحات رادیومتری

تصحیحات رادیومتری فرآیند تبدیل اعداد ثبت شده به وسیله سنجنده به داده بازتابی/تابشی سطحی است. در پردازش طیفی تصویر و یا در شناسایی تغییرات این تصحیحات ضروری است اما برای تفاسیر کیفی/ چشمی می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد:

۳-۳-۱- واسنجی باندها

واسنجی فرآیند ساده تبدیل عدد رقومی ثبت شده به وسیله سنجنده به رادیانس در سنجنده[1] با واحد فیزیکی (w/m2sr/µ) است. این تبدیل خطی برای تک تک باندها باید به طور مجزا انجام گیرد. ضرایب تبدیل، یعنی شیب خط یا Gain و عرض از مبدا یا Offset باند (شکل ۳-۳) به همراه داده ارایه می‌شوند.



شکل ۳-۳- ضرایب تبدیل خطی عدد رقومی ثبت شده به وسیله سنجنده به رادیانس

۳-۳-۲- تصحیح اتمسفری[2]

گازها و ذرات معلق موجود در اتمسفر، رادیانس رسیده به سنجنده را تعدیل می‌کنند. بخار آب در طول موج‌های ۰/۹۴، ۱/۱۴، ۱/۳۸ و ۱/۸۸ میکرومتر، اکسیژن در ۰/۷۶ میکرومتر و دی‌اکسید کربن در نزدیکی ۲/۰۸ میکرومتر، باند جذبی دارند (پیوست، شکل ۸)، به گونه‌ای که حدود نیمی از بازه ۰/۴-۲/۵ میکرومتر از این جذب‌ها متاثر می‌شود. در طول موج‌های کمتر از ۱ میکرومتر هم پدیده نشر اتمسفری ناشی از مولکول‌ها و ذرات معلق غالب است.

برای احیای ضریب بازتاب سطحی مواد و رسیدن به داده بازتابی در سطح[3] باید اثرات گازها و ذرات معلق اتمسفر طی یکی از رویه‌های زیر حذف یا تعدیل شود.

1- At-Sensor radiance
2- Atmospheric correction
3- At-Surface reflectance

الف- تعدیل اتمسفری

در این رویه که آن را روش تجربی بر مبنای سین[۱] نیز می‌نامند، داده‌های بازتابی نسبی[۲] تولید می‌شود و شامل دو گروه مستقل از اندازه‌گیری زمینی است. الگوریتم‌های گروه اول مثل IAR[۳] و FF[۴] در مواقعی که دسترسی به روش‌های دقیق‌تر و کمی مقدور نباشد با رعایت شرایطی ویژه مانند آب و هوای خشک و بدون پوشش گیاهی، وجود یک محدوده با بازتاب طیفی خنثی و یا غالب نبودن یک ماده/کانی خاص در تصویر، به کار می‌رود. ایراد عمده این روش تولید جذب‌های کاذب در طیف پیکسل‌ها است.

از سوی دیگر، روش خطوط تجربی (EL[۵]) نیازمند اندازه‌گیری طیف بازتابی حداقل یک هدف روشن و یک هدف تیره بر روی زمین برای رگرسیون خطی تصویر در مقابل آن‌ها است. حاصل این روش بسیار دقیق و قابل مقایسه با طیف‌های آزمایشگاهی و یا زمینی است. طیف مرجع ممکن است از یک تصویر تصحیح شده فراطیفی انتخاب شود که در آن صورت، روش واسنجی متقاطع سنجنده[۶] نامیده می‌شود.

ب- تصحیح اتمسفری

این رویه که مدل جامع عبور تشعشع[۷] نیز نام دارد، داده‌های بازتابی ظاهری (بدون تصحیح توپوگرافی) تولید می‌شود و طی آن، اثرات جمعی انتشار اتمسفر و ذرات معلق، اثر تفریقی جذب گازها و بخار آب موجود در اتمسفر و اثر ضربی رادیانس ورودی خورشید به وسیله مدل‌های جامع مبتنی بر MODTRAN مدل شده و از رادیانس اندازه‌گیری شده به وسیله سنجنده حذف می‌شود. مهم‌ترین نرم‌افزارهایی که بر این اساس کار می‌کنند شامل ACRON[۸]، FLAASH[۹]، ATCOR[۱۰]، HATCH و HYCORR[۱۱] هستند که دو مورد آخر بر اساس کدهای ATREM[۱۲] توسعه یافته‌اند.

پ- روش تلفیقی[۱۳]

علیرغم پیشرفت‌های فنون تصحیح اتمسفری هنوز هم دانش مطلقی نیست و خروجی آن‌ها با خطای باقیمانده همراه است. راه حل مناسب، تلفیقی از روش‌های تصحیح اتمسفری و واسنجی زمینی است. روش تلفیقی که پالایش بازتابی نیز نامیده می‌شود با الگوریتم موسوم به EFFORT[۱۴] نیز به طور محدود قابل اجرا است.

1- Scene-Based empirical approaches
2- Relative reflectance
3- Internal average reflectance
4- Flat field
5- Empirical line
6- Cross-sensor calibration approach
7- Rigorous radiative transfer modeling
8- Atmosphere correction now
9- Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes
10- Atmospheric and topographic correction
11- Hyperspectral correction
12- Atmospheric removal
13- Hybrid approaches
14- Empirical flat field optimal reflectance transformation

۳-۳-۳- تصحیح توپوگرافی

تصحیح توپوگرافی شامل دو بخش است: در بخش اول، اثر توپوگرافی یعنی شیب و امتداد متفاوت سطح نسبت به ارتفاع و آزیموت خورشید کاهش می‌یابد. این تصحیح نیازمند یک مدل بازتابی (معمولا مدل بازتابی لامبرت[1]) و داده‌های رقومی ارتفاع است. بخش دوم تصحیح اختلاف ارتفاع سطح و اثر آن بر روی رادیانس عبوری است که خروجی این تصحیح پیچیده، داده‌های بازتابی مطلق تولید می‌کند.

۳-۳-٤- سایر تصحیحات رادیومتری

علاوه بر تصحیحات یاد شده، تصحیحات دیگری نیز باید انجام گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- بعضی از تصحیحات خاص داده‌های فراطیفی، شامل حذف جریان تاریک، تصحیح لبخند[2] یا انحنای خطی و تصحیح پهنای باندی[3]
- تصحیح اثر BRDF[4] برای جبران میزان بازتاب متفاوت سطح در اثر تغییر زاویه تابش و ارتفاع خورشید و زاویه برداشت تصویر
- تصحیح داده‌های حرارتی[5] که مستقل از فرآیند یاد شده باید انجام شده و طیف‌های تابشی[6] در مقایسه طیف هر پیکسل با جسم سیاه[7] تولید شود.
- تصحیحاتی به فراخور سنجنده مثل تصحیح نشت باندی[8] تلسکوپ SWIR سنجنده ASTER

۳-٤- کاهش نویز تصاویر

نویز نسبت به سیگنال تعریف شده و به هر اندازه‌گیری فاقد اطلاعات اطلاق می‌شود. وجود نویز کار پردازش طیفی را مختل و تفسیر چشمی را مشکل می‌سازد. نویز هم با داده‌های خام و هم با اطلاعات استخراجی همراه می‌شود. اولین نویزها به هنگام برداشت داده، تقویت سیگنال، کمی‌سازی و انتقال ایجاد می‌شوند و نویزهای بعدی طی پردازش طیفی شکل می‌گیرد. نویز ممکن است تناوبی[9] (مثل نواری شدن) و یا تصادفی باشد که مثال بارز آن نویز داده‌های ETM، ASTER و Hyperion است. نویز به حالت جمعی، ضربی و یا ترکیبی داده‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

حذف/کاهش نویز از داده‌های ماهواره‌ای به دلیل ناشناخته ماندن مولفه‌های آن مشکل است. به طور کلی کاهش نویز به دو حالت درون پیکسلی و درون تصویری قابل انجام است. در روش درون پیکسلی، نویز موجود در نمودار طیفی هر پیکسل بر اساس

1- Lambertian reflectance model
2- Smile correction
3- Bandwidth
4- Bi-Directional reflectance distribution function
5- Thermal atmospheric correction
6- Emittance
7- Black-Body
8- Cross-Talk correction
9- Periodic

فرکانس مجاز تغییرات، مدل و حذف می‌شود (مثل روش‌های پالایش بازتابی در بند ۳-۳-۲ و الگوریتم‌های زمین‌آماری[1]). در روش درون تصویری، از انواع فیلترها مانند میانه، بالاگذر[2] و انحراف معیار برای کاهش نویز تصادفی و از روش‌های رگرسیون برای حذف نویزهای تناوبی کمک می‌گیرند. فیلترهای انحراف معیار دارای مزیت حفظ فرکانس‌های بالای سیگنال هم‌زمان با حذف نویز هستند. فیلتر کردن را می‌توان هم در فضای تصویر و هم در فضاهای غیرهمبسته‌ای چون PCA و فرکانس (با تبدیل فوریه یا FFT) بر داده‌ها اعمال کرد.

۳-۵- موزاییک کردن[3] (یکپارچه‌سازی) تصاویر

یکپارچه‌سازی یا موزاییک کردن تصاویر عبارت از اتصال تصاویر دارای مرز مشترک به منظور دستیابی به یک تصویر یکپارچه است. در تولید تصاویر یکپارچه، لازم است داده‌ها متعامد شده باشند تا مرز اتصال آن‌ها فاقد جابه‌جایی مکانی باشد. از سوی دیگر تغییرات جوی و شدت متفاوت نور خورشید در سین‌های با تاریخ مختلف، منجر به نوسانات ناخواسته رادیومتری می‌شود. از این رو مناظر تحت موزاییک باید حتی‌المقدور از لحاظ زمانی به هم نزدیک باشند و یا اختلافات فاحش رادیومتری آن‌ها تصحیح شده باشد. برای تهیه تصاویر یکپارچه و یکدست، لازم است لبه‌ها منطبق و اختلاف رنگ تنظیم شود. بهتر است خطوط اتصال[4] لبه‌ها از بخش‌هایی با کمترین برجستگی و اختلاف رنگی عبور کند. در تنظیم رنگ بر مبنای مرز مشترک می‌توان از چندجمله‌ای درجه ۱ تا ۳ استفاده کرد. معیار و استاندارد قضاوت درباره یکدستی و یکپارچگی تصویر، بررسی چشمی ترکیبات رنگی حاصل است. پیوست، شکل ۹، موزاییک تصاویر ETM کل کشور را نشان می‌دهد.

از آنجا که تنظیم رنگ در فرآیند یکپارچه‌سازی موجب به هم خوردن مقادیر DN پیکسل‌ها می‌شود، تصویر موزاییک شده برای آنالیز طیفی اعتبار کافی ندارد. عبور از این محدودیت، نیازمند به کارگیری روش‌های آمار چندمتغیره برای تنظیم طیفی باندها است.

۳-٦- واضح‌سازی[5] تصاویر

وضوح مکانی و طیفی داده‌های ماهواره‌ای با هم نسبت عکس دارند و نمی‌توان وضوح طیفی و مکانی تصویر را هم‌زمان افزایش داد. از این رو بیشتر سنجنده‌های کنونی، به ویژه انواع فرامکانی، با دو تلسکوپ جداگانه، داده‌های چندطیفی و پانکروماتیک را در دو وضوح مکانی متفاوت برداشت می‌کنند.

در مواقعی که داده‌های رنگی چندطیفی با وضوح مکانی باند پانکروماتیک مورد نیاز باشد، می‌توان این دو را با هم ترکیب[6] و یا واضح کرد. واضح‌سازی را می‌توان بر روی داده‌های هم‌زمان یک سنجنده و یا تصاویری از سنجنده‌های مختلف اعمال کرد (پیوست،

1- Geostatistics
2- High-Pass
3- Mosaicking
4- Cutlines
5- Pan-Sharpening
6- Merge (Fusion)

شکل ۱۰). داده‌های چندطیفی و Pan به دلیل برداشت هم‌زمان و هم‌مختصات بودن[1]، بدون متعامدسازی هم قابل ترکیب هستند، اما داده‌های دو سنجنده مختلف باید در ابتدا با دقت زیاد متعامد شوند تا از هم‌مختصات شدن آن‌ها اطمینان حاصل شود. نسبت مجاز اندازه پیکسلی در واضح‌سازی ۴ به ۱ است، یعنی اندازه پیکسلی باند Pan حداکثر باید ۴ برابر داده چندطیفی باشد. از لحاظ محدوده طیفی تحت پوشش هم بهتر است باند Pan کل محدوده باندهای چندطیفی را پوشش دهد.

ترکیب تصاویر اصولا با تبدیلات خاص در فضاهای غیرهمبسته انجام می‌شود. برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های واضح‌سازی به ترتیب افزایش اهمیت شامل IHS، PCA، Gram-Schmidt، موجک[2] و نیز برخی روش‌های دورگه[3] است. مزیت و کارآیی یک روش با حفظ هم‌زمان ویژگی‌های طیفی و مکانی دو داده ورودی مشخص می‌شود. داده واضح‌سازی شده قابلیت پردازش طیفی ندارد، اما امروزه الگوریتم‌های مبتنی بر موجک برای غلبه بر این محدودیت توسعه یافته‌اند.

۳-۷- سایر موارد پیش‌پردازش

سایر موارد آماده‌سازی داده‌های دورسنجی به شرح زیر است:

- برش تصویر به اندازه مورد نظر پروژه با مختصات یا با یک پلی‌گون (بهتر است تصویر کمی بزرگتر از مختصات چهارگوش مطالعاتی بریده شود.)
- سایه انداختن (ماسک) موارد نامطلوب تصویر مانند ابرها، گیاهان، سایه‌های بزرگ، دریاچه‌ها، حاشیه‌های تصویر و نظایر آن‌ها (این موارد را می‌توان از طریق پردازش طیفی استخراج و به عنوان پدیده ماسک در نظر گرفت.)
- تغییر سیستم مختصات تصویر که لازمه آن پیچش[4] و نمونه‌برداری مجدد است. گزینه مطلوب در این موارد روش جامع است که تبدیل را برای تک-تک پیکسل‌ها محاسبه می‌کند.
- تغییر اندازه پیکسلی از اندازه کوچکتر به بزرگتر و بالعکس که نیازمند نمونه‌برداری مجدد است. کاهش اندازه پیکسلی با روش نمونه‌برداری مجدد به هیچ وجه نشانه افزایش وضوح مکانی نیست.
- یک کاسه کردن[5] داده‌های مختلف در یک فایل که همانند واضح‌سازی، داده‌ها باید ابتدا از طریق متعامدسازی هم‌مختصات شده باشند.

1- Co-register
2- Wavelet
3- Hybrid
4-Warp
5-Stacking

فصل ۴

استانداردهای پردازش داده‌های دورسنجی

٤-١- آشنایی

پردازش، عملیات تبدیل داده‌های تصویری تصحیح شده به اطلاعات زمین‌شناسی یا اکتشافی است و دو رویه کلی پردازش چشمی و رقومی را شامل می‌شود. در این فصل انواع روش‌های پردازش داده‌های دورسنجی به تفکیک بازتابی/تابشی، راداری و ژئوفیزیکی برای استخراج اطلاعات کانی‌شناسی، سنگ‌شناسی و هندسی- ساختاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

داده‌های تصویری دورسنجی معمولا دوبعدی و گاه استریو برداشت می‌شوند. هر پیکسل این داده‌ها از n باند طیفی (n بعد ظاهری) تشکیل شده است. روش‌های مختلف استخراج اطلاعات از تصاویر به سه گروه شناسایی الگوی مکانی، شناسایی الگوی طیفی و شناسایی الگوی زمانی تقسیم می‌شوند. الگوی مکانی از چیدمان پیکسل‌ها در کنار هم، الگوی طیفی از محتوی n بعدی طیف هر پیکسل و الگوی زمانی از تغییرات زمانی دو الگوی دیگر برای شناسایی پدیده‌ها و استخراج اطلاعات کمک می‌گیرد.

استخراج اطلاعات ممکن است با تکیه بر مهارت‌های چشمی مفسر، با انواع الگوریتم‌های رایانه‌ای خودکار و نیمه‌خودکار و یا با روش‌های مرکب انجام گیرد.

٤-٢- تعبیر و تفسیر چشمی تصاویر دورسنجی

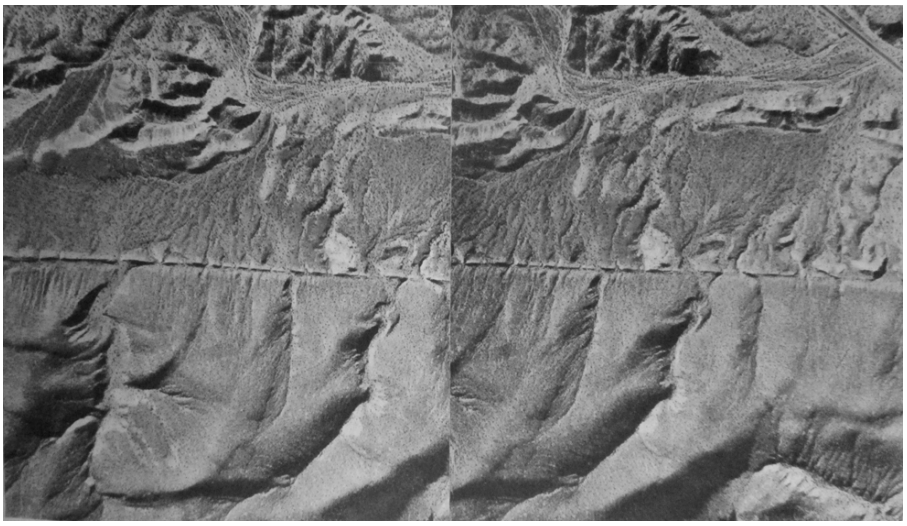
٤-٢-١- آشکارسازی و ساخت ترکیبات رنگی

بر خلاف عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای قبل از شروع تفسیر باید به وسیله رایانه آشکارسازی شوند. آشکارسازی نمایش یک یا سه باند از مجموعه n باند تصویر به صورت خاکستری (سیاه و سفید) و یا ترکیب رنگی است. انتخاب سه باند از مجموع n باند، باید به گونه‌ای باشد که بیشترین تباین را ایجاد کند. از آنجا که وابستگی خطی باندهای نزدیک به هم بالاست، بهتر است باندهای با فاصله‌های طول موجی بیشتر از هم، با یکدیگر ترکیب شوند.

آشکارسازی مستقل از نوع ترکیب رنگی ممکن است ۲، ۲٫۵ و یا ۳ بعدی (استریو) باشد (شکل ۴-۱). دید ۲٫۵ بعدی با تصاویر سایه‌دار (پیوست، شکل ۱۱) و یا آناگلیف[1] و دید سه‌بعدی با یک زوج تصویر برداشت شده با سنجنده یا زوج تصویر مجازی (تولید شده بر اساس DEM با الگوریتم‌های خاص) میسر می‌شود.

دید سه‌بعدی حاصل از تصاویر استریو افزون بر اندازه و شکل، اطلاعات مفیدی نیز درباره ارتفاع، عمق و حجم اجسام ارایه می‌دهد و به ویژه در تخمین شیب گسل‌ها و لایه‌ها و تفسیر ساختاری برتری آشکاری دارد. از این رو گاهی تصاویر ماهواره‌ای با کمک DEM به صورت تجسمی[2] نمایش داده می‌شوند.

1- Anaglyphs
2- Perspective



شکل ٤-١- نمونه‌ای از یک زوج تصویر استریو با دید برجسته (سه‌بعدی) برای تفسیر عوارض زمین‌شناسی

٤-٢-٢- فتوژئولوژی برای تهیه نقشه زمین‌شناسی اولیه

تهیه نقشه زمین‌شناسی، هم در بررسی‌های گوناگون زمین‌شناسی و هم در مراحل مختلف اکتشافی ضرورت پیدا می‌کند. عملیات متوالی و متنوع تهیه نقشه زمین‌شناسی به طور کلی سه مرحله تعیین موقعیت و گسترش (دو یا سه‌بعدی) سنگ‌ها و شکل هندسی آن‌ها، تعیین توالی زمانی (چینه‌شناسی) و سن توده‌های سنگی و در نهایت انتخاب نام مناسب سنگ‌شناسی برای واحدها را در برمی‌گیرد. مرحله نخست به طور کامل و مرحله دوم به طور محدود، به داده‌های دورسنجی تکیه دارند. برای این منظور داده‌های دورسنجی را به دو حالت زیر از دیدگاه فتوژئولوژی تفسیر می‌کنند:

- انجام تفسیر بر روی عکس-نقشه‌های متعامد دوبعدی در محیط GIS که این حالت فاقد دید استریو است، ولی کمینه خطا و بیشینه بهره‌وری/ سرعت را دارد.
- انجام تفسیر بر روی عکس‌های هوایی استریو با استریوسکوپ و پیاده‌سازی خطوط ترسیمی روی نقشه توپوگرافی کاغذی که نقطه ضعف این حالت، خطای هندسی بالاتر و زمان بیشتر انجام کار است.

در عمل روشی مشابه فلوچارت شکل ۱-۴ به عبارت دیگر استفاده استادانه و موازی از هر دو روش برای پوشش ضعف‌های هر کدام پیشنهاد می‌شود. در این حالت عکس-نقشه ورودی به GIS معمولا ترکیبی رنگی از داده متعامد است که بسته به نیاز پروژه ممکن است در آن چند منظر یکپارچه شوند.

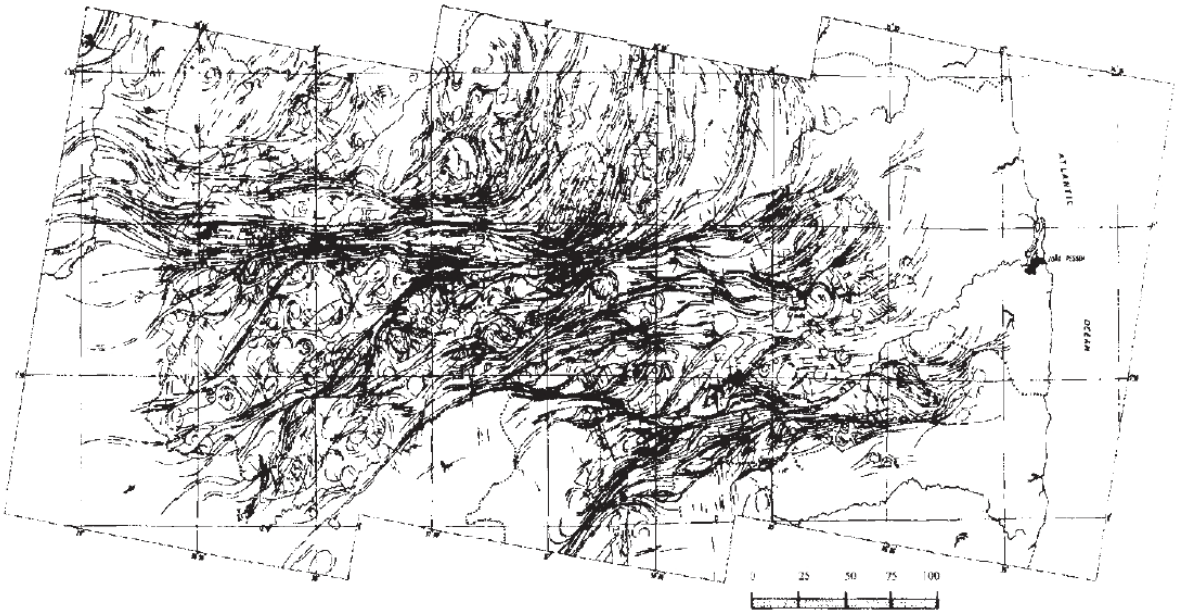
تفسیر فتوژئولوژی دو یا سه‌بعدی تصویر ماهواره‌ای/ عکس هوایی در موارد زیر کاربرد دارد:

- بررسی زمین‌ساخت و مکانیسم شکستگی‌ها شامل انواع گسل‌ها، درزه‌ها، خطواره‌ها، چین‌خوردگی‌ها و نظایر آن‌ها (شکل ۴-۲).
- تفکیک و شناسایی واحدهای سنگی[1] و توالی چینه‌شناسی (پیوست، شکل ۱۲).

1- Lithology discrimination

حاصل این فرآیند معمولا یک نقشه اولیه زمین‌شناسی است که باید با برداشت‌های زمینی (کنترل رخنمون‌ها، برداشت سنگ‌شناسی و تعیین سن) تصحیح و تکمیل شود. امروزه تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی به صورت خودکار با الگوریتم‌هایی موسوم به استخراج عوارض تا حدودی ممکن شده است.

داده‌های رادار اطلاعات مفیدی درباره بافت و زبری سطح ارایه می‌دهند و نقش مهمی در شناسایی خطواره‌ها و تفکیک واحدهای سنگی ایفا می‌کنند. خطواره[1] عارضه‌ای خطی و ناپیدا در سطح است که با اثرات کنترلی آن بر توپوگرافی، فعالیت‌های ماگمایی/آتشفشانی و سیستم‌های دگرسانی، به طور غیرمستقیم شناخته می‌شود.



شکل ٤-۲- نمونه‌ای از نقشه خطواره‌ها و شکستگی‌های تفسیر شده بر اساس داده‌های ماهواره‌ای

فتوژئولوژی علاوه بر کمک به تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در موارد زیر نیز قابل استفاده است:

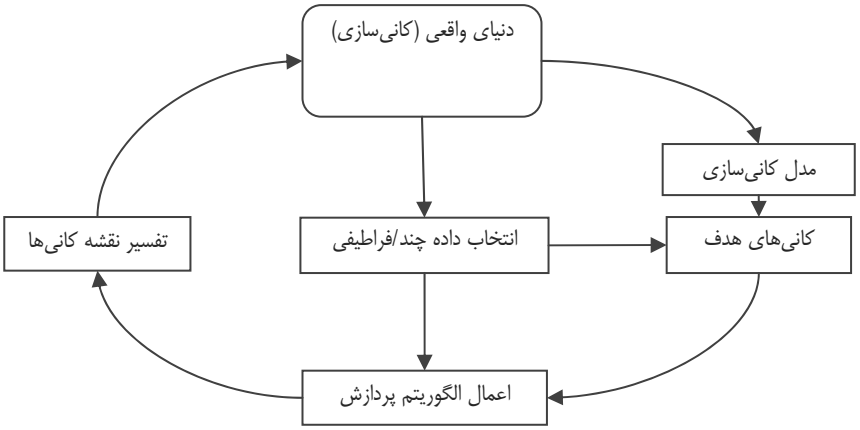
- تدقیق واحدهای استخراج شده قبلی که در این حالت نقشه‌های اسکن یا رقومی شده بر روی عکس-نقشه در محیط GIS پیاده شده و عوارض مورد نظر به طور هم‌زمان اصلاح و تفسیر/ تدقیق می‌شوند.
- تفسیر جزیی یا انتخابی بخشی از واحدها
- تعمیم واحد/سکانس‌های نقشه‌های قبلی برای مقاصد مختلف از جمله بررسی‌های فلززایی
- زمین‌ریخت‌شناسی، مطالعات زیست‌محیطی، مخاطرات زمین و نظایر آن‌ها
- مدیریت و برنامه‌ریزی عملیات اکتشافی- زمین‌شناسی
- بررسی و تطبیق نتایج پردازش طیفی با تصویر رنگی
- استخراج دگرسانی‌های گرمابی (راه حل صحیح‌تر استفاده از روش‌های کمی، پردازش طیفی است.)

1- Lineament

٤-۳- پردازش طیفی داده‌های ماهواره‌ای برای برداشت کانی‌ها

در گذشته، بخش‌های دگرسان شده بر اساس نمود ظاهری و یا روش مقایسه‌ای بر روی عکس‌های هوایی و نیز طی عملیات زمینی شناسایی می‌شد. اما امروزه ورود داده‌های چند/فراطیفی به بخش اکتشاف، نه تنها فرآیند شناسایی دگرسانی‌ها را تسهیل کرده، بلکه انقلابی در روش شناسایی و بررسی کانی‌ها ایجاد کرده است.

تولید نقشه‌های کانی‌شناسی با روش طیفی مطابق فلوچارت شکل ۴-۳ از سه پایه اصلی تشکیل شده است، یکی مدل کانی‌سازی که کانی‌های هدف را تعیین و زمین‌شناسی طیفی (فصل ۱) که نمودارهای طیفی بازتابی/تابشی مرجع را فراهم می‌کند. دوم انواع الگوریتم‌های پردازش طیفی که استخراج اطلاعات کانی‌شناسی/ دگرسانی و در مواردی سنگ‌شناسی از تصویر را ممکن می‌کند و مورد سوم تولید و تفسیر نقشه‌های کانی‌شناسی در راستای هدف اکتشافی- زمین‌شناسی است.



شکل ٤-۳- فلوچارت مراحل سه‌گانه برداشت کانی‌ها

٤-۳-۱- بررسی و تعیین کانی‌های هدف

آنچه در پردازش طیفی از تصویر استخراج و برداشت می‌شود، معمولا کانی با ترکیب شیمیایی و رفتار طیفی مشخص و گاه واحدهای سنگی است. الگوی کانی‌شناسی (فصل ۱) در شناخت انواع محیط‌های زمین‌شناسی (محیط‌های هوازدگی، اکسیداسیون- احیا، رسوب‌گذاری، دگرگونی)، مناطق زمین‌گرمایی، طبقه‌بندی انواع خاک‌ها، پایش شور شدن خاک، بررسی‌های زیست‌محیطی و نظایر آن‌ها نقش کلیدی دارد. در این نشریه تنها کاربردهای الگوی کانی‌شناسی در اکتشافات معدنی بررسی می‌شود.

پارامترهای دگرسانی، هوازدگی و به طور محدودتر سنگ درونگیر (جدول ۱-۱)، ویژگی‌های کانی‌شناسی یک مدل را توصیف و کانی‌های بالقوه برای برداشت را پیشنهاد می‌کند. به هنگام پردازش طیفی برای استخراج الگوهای کانی‌شناسی بالقوه یک مدل، باید موانع و محدودیت‌های زیر را در نظر داشت:

- محدودیت‌های داده یعنی تعداد باند، وضوح طیفی، رادیومتری و مکانی سنجنده
- محدودیت‌های طیفی شامل حضور جذب و بازتاب‌های یکتا و اثر ترکیب‌شدگی

- محدودیت‌های محیطی (الگوی هندسی، اقلیم، مقیاس و مساحت)
- محدودیت در توانایی الگوریتم‌ها (نرم‌افزاری) و رایانه‌ها (سخت‌افزاری)
- محدودیت تصحیحات رادیومتری

بسته به واکنش سنجنده مورد نظر کانی‌های بالقوه پیشنهادی (معمولا جدول ۲-۱) را باید مجددا نمونه‌برداری کرد. بررسی شکل طیفی حاصل، وضعیت پنجره‌های اتمسفری و هم‌پوشانی جذبی دیگر مواد، کانی‌های قابل نقشه‌برداری را مشخص می‌کند. وضوح مکانی سنجنده، پدیده ترکیب‌شدگی، فرض‌های ساده‌کننده الگوریتم‌ها و یا برونزد محدود کانی هدف (مثل انواع کانی‌سازی رگه‌ای) نیز دایره کانی‌های بالفعل را محدودتر می‌کند.

کانی‌های بالفعل ممکن است دارای ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم با کانی‌سازی باشند. در ذخایری مثل لاتریت‌ها، بوکسیت‌ها، ذخایر چینه‌سان، آهن لایه‌ای، فسفات‌ها، کربنات‌ها، انواع کانی‌های تبخیری، انواع خاک‌های صنعتی و نظایر آن‌ها، خود ماده معدنی هدف مستقیم نقشه‌برداری طیفی است در حالی که هاله‌های دگرسانی یا مناطق هوازدگی، به طور غیرمستقیم به پهنه کانه‌دار مرتبط می‌شوند.

٤-۳-۲- کاهش ابعاد داده و تبدیلات

داده‌های دورسنجی بازتابی/تابشی، به ویژه فراطیفی، به دلیل همبستگی بالای باندها، نیازمند کاهش n باند طیفی به m بعد ذاتی[1] (n>m) با تبدیلاتی مثل MNF[2] و PCA هستند. m باند حاصل استقلال خطی دارند و در آن نویز محو[3] شده است.

٤-۳-۳- الگوریتم‌های پردازش طیفی

انبوه روش‌های پردازش طیفی در یک تقسیم‌بندی نوآورانه در دو گروه کلی زیر قرار می‌گیرند (شکل ۴-۴):

الف- روش‌های متکی بر دانش طیفی مفسر

در این روش‌ها بر اساس اطلاع قبلی از موقعیت جذب و بازتاب‌های یک کانی، اقدام به برداشت آن در حوزه طیفی می‌کنند و شامل تمام عملیات ریاضی است که برای کمی‌سازی موقعیت طول موجی، عرض، عمق و تقارن جذب‌ها بر روی باندها انجام می‌گیرد.

ب- روش‌های متکی بر داده[4] (دورسنجی)

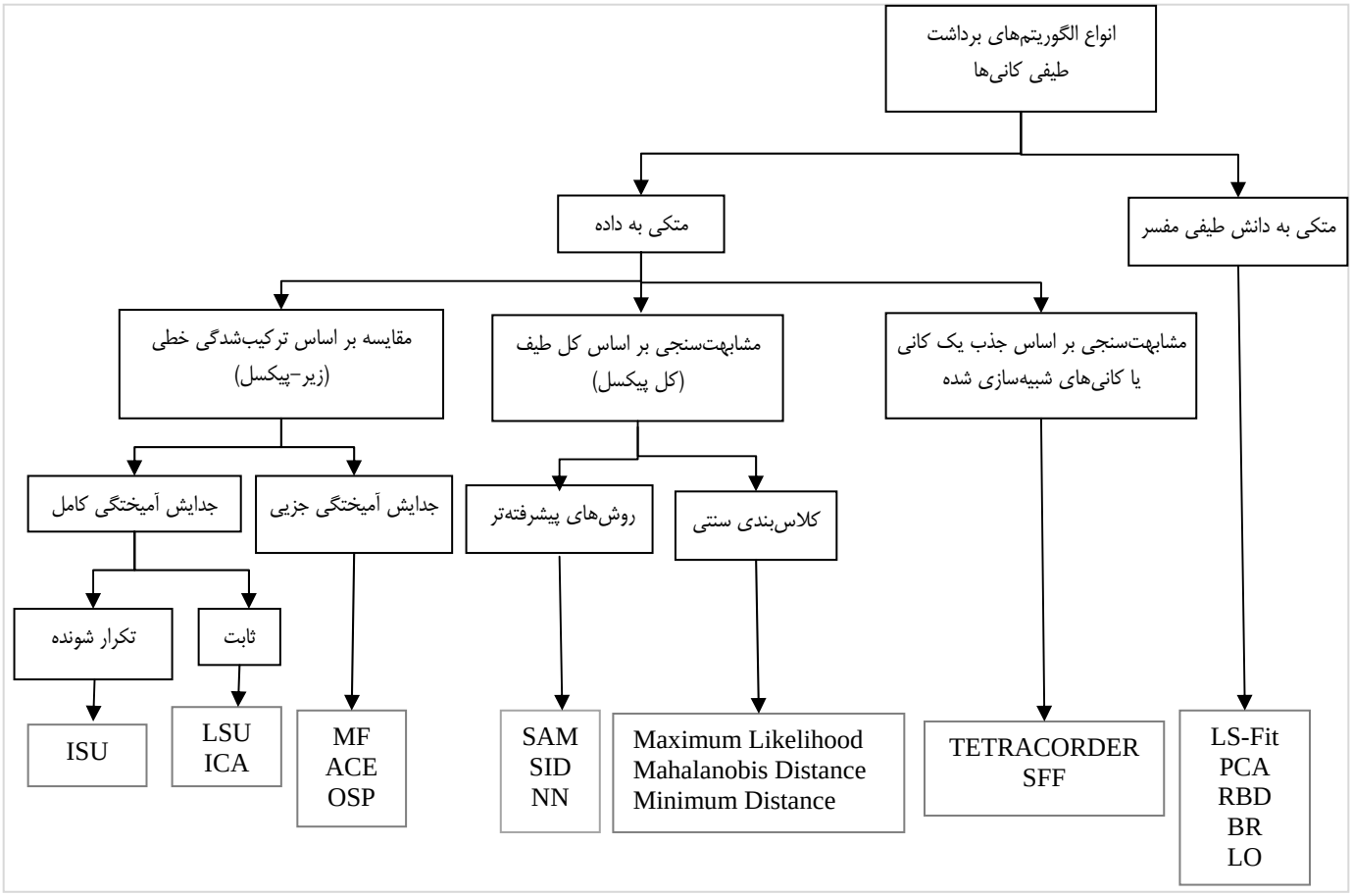
این روش‌ها بر اساس طیف‌های معرف حاصل از داده استواراند. طیف‌های معرف در روش‌های مشابهت‌سنجی (شکل ۴-۴) ممکن است از کتابخانه طیفی وارد شده و یا یک کلاس آموزشی آماری باشند. در سایر مواقع طیف معرف یک سرگروه است که با ترکیب خطی آن‌ها سایر پیکسل‌های مرکب تصویر ساخته می‌شود. سرگروه ممکن است وارداتی به تصویر (طیف آزمایشگاهی یا

1- Inherent dimentionality
2- Minimum noise fraction
3- Noise whitening
4- Data–Driven approach

زمینی) یا برگرفته از تصویر باشد که در حالت دوم با الگوریتم‌های استخراج سرگروه (مثل PPI[1]) انتخاب می‌شود. الگوریتم‌های جدایش خطی آمیختگی طیفی، زیر- پیکسل هستند و حالات جزیی، کامل، ثابت و تکرار شونده دارند. در روش‌های مشابهت‌سنجی کل-پیکسل، پیکسل‌ها تنها به یک سرگروه و در روش زیر-پیکسل، پیکسل‌ها به بیش از یک سرگروه نسبت داده می‌شوند.

پردازش طیفی داده‌های دورسنجی با هر روشی که انجام گیرد باید اهداف زیر را برآورده کند:

- کانی‌های استخراجی با طیف متناظر خود در تصویر (تصحیح شده) همخوانی داشته باشد.
- توزیع پیکسل‌های استخراجی نظم معنادار و ارتباط مکانی داشته باشد.
- همراهی کانی‌ها با هم از لحاظ مدل کانی‌سازی و شرایط زمین‌شناسی معنادار باشد.
- نقشه کانی‌های ارایه شده با واقعیت‌های زمینی، چه کمی/کیفی و چه مکانی مطابقت داشته باشد.



شکل ٤-٤- فلوچارت تقسیم‌بندی انواع روش‌های پردازش طیفی

٤-٣-٤- نقشه فراوانی کانی‌ها

حاصل نقشه‌برداری طیفی کانی‌ها، تجسم داده‌های باندی به تعداد محدودی تصویر موسوم به تصویر فراوانی[1] کانی است. تصویر فراوانی تغییرات در شدت، فراوانی یا شباهت را به صورت تغییرات خاکستری نشان می‌دهد. خروجی‌گیری و تفسیر این تصاویر در

1- Pixel purity index

فصل ۵ مورد بحث قرار می‌گیرد. گاه در تصویر فراوانی، گروهی از پیکسل‌های غیرمرتبط یا جامانده دیده می‌شوند. علت این امر ممکن است وضوح طیفی ناکافی داده‌ها، خطا در انتخاب تعداد و نوع سرگروه‌ها، روش‌های نقشه‌برداری نامناسب، نویز باقی‌مانده در داده‌ها و نیز پیچیدگی رفتار نور در برخورد با محیط‌های زمین‌شناسی باشد. برای رفع خطای جاماندگی استفاده از دو روش زیر توصیه می‌شود:

- تکرار پردازش با اصلاح یک یا همه عوامل خطا
- پس‌پردازش[۲] و تعدیل پیکسل‌های خارج از ردیف

٤-٤- شناسایی تغییرات

شناسایی تغییرات در پی یافتن تغییر یک پدیده مشخص طی توالی زمانی معین است. از آنجایی که زمان در تصاویر دورسنجی منجمد می‌شود، می‌توان با استفاده از تصاویر با تاریخ برداشت مختلف، تغییرات رخ داده بین دو زمان برداشت را شناسایی کرد. در این صورت تصاویر باید متعلق به یک سنجنده بوده و وضوح مکانی، هندسه برداشت، تعداد باند طیفی و ساعت برداشت یکسان داشته باشند. همچنین لازم است که تصاویر مورد استفاده به دقت (بین ½ تا ¼ پیکسل) هم‌مختصات شده باشند. به دلیل تاثیر منفی شرایط محیطی و جوی بر روی نتایج بهتر است تصحیحات اتمسفری و روشنایی نیز بر تصاویر اعمال شود. الگوریتم‌هایی مانند تفریق و نسبت باندی، کلاس‌بندی، تحلیل مولفه اصلی (PCA)، رگرسیون خطی و SAM برای شناسایی تغییرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سری‌های زمانی روند تغییرات به دست آمده از پایش پیوسته یک هدف (مانند سبزینه گیاهان) توسط دورسنجی تحلیل می‌شود.

شناسایی تغییرات در اکتشاف جذابیت و اهمیت چندانی ندارد، اما در مطالعات زیست‌محیطی پیرامون معادن، شناسایی تغییرات و پایش نحوه گسترش و توزیع آلاینده‌های معدنی، به ویژه عوامل کانی‌شناسی با تکنیک دورسنجی قابل اجرا است. در زمین‌شناسی پدیده‌های پویایی مانند حرکات تکتونیکی و زمینلرزه، فعالیت‌های آتشفشانی، خیزش گنبدهای نمکی، فرونشست زمین (در اثر معدنکاری، برداشت هیدروکربن از مخزن یا برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی)، رانش زمین، لغزش پله‌های معادن و نظایر آن‌ها با جابه‌جایی مکانی یا دگرشکلی[۳] زمین همراه هستند. در این موارد، شناسایی میزان جابه‌جایی/ دگرشکلی در طی زمان، شناخت بهتر پدیده را میسر و پیش‌بینی خطرات احتمالی آن را ممکن می‌کند. روش شناخته شده برای این منظور استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (پیوست، شکل ۱۳) و نیز فناوری DGPS است.

1- Abundance image
2- Post-Processing
3- Deformation

٤-٥- تولید و پردازش مدل رقومی ارتفاع

مهم‌ترین روش‌های تولید مدل رقومی ارتفاع به جز پیمایش زمینی، استفاده از فناوری‌های دورسنجی است. به طور کلی سه روش فتوگرامتری تصاویر ماهواره‌ای، تداخل‌سنجی راداری و فناوری LiDAR برای این منظور وجود دارد.

٤-٥-١- فتوگرامتری رقومی تصاویر ماهواره‌ای

دسترسی به زوج تصاویر استریویی[1] ماهواره ای (جدول ۴-۱) موجب جذابیت این داده ها برای تولید DEM شده است. زوج تصویر ماهواره‌ای ممکن است با برداشت استریویی متقاطع با- مسیر حرکت (یا خارج از- مسیر) از دو مدار مجاور هم طی دو زمان مختلف و یا برداشت استریویی هم امتداد با- مسیر (یا در-مسیر حرکت) از یک مدار واحد حاصل شود که البته حالت دوم به دلیل حداقل تغییرات رادیومتری و حداکثر دقت هندسی برتری دارد.

توسعه مدل‌های فتوگرامتری بازنگری شده نظیر مدل مطلق و یا RPC (بند ۳-۱-۲) موجب متداول شدن روش‌های خودکار یا نیمه‌خودکار استخراج DEM از تصاویر ماهواره‌ای شده است. فتوگرامتری رقومی مستقل از سنجنده شامل مراحل زیر است:

- انتخاب چندین نقطه کنترل زمینی (GCPs) و نقاط گره[2] در زوج تصویر
- محاسبه مدل سه‌بعدی بر اساس پارامترهای سنجنده و توجیه تصاویر اولیه به صورت تصاویر epipolar
- انطباق‌یابی[3] پیکسل به پیکسل زوج استریو و محاسبه مختصات کارتوگرافی و ارتفاع پارالاکس[4] در یک شبکه منظم
- تبدیل مختصات DEM حاصل به مختصات واقعی زمین و ویرایش حفره‌ها، بخش‌های ابری و نظایر آن‌ها

کیفیت، دقت و مقیاس DEM تولیدی با یک زوج استریو به عواملی مانند اندازه پیکسلی، نسبت باز به ارتفاع[5] (B/H) (با حالت بهینه بین ۰/۵ تا ۱ است)، کیفیت رادیومتری تصویر، الگوریتم مورد استفاده و در نهایت تعداد و دقت نقاط کنترلی بستگی دارد (جدول ۴-۱). در پیوست شکل ۱۴، نمونه‌های DEM تولیدی با داده‌های ALOS و GeoEye-1 نشان داده شده است.

جدول ٤-١- ویژگی‌های DEM مورد انتظار از داده‌های ماهواره‌ای با قابلیت برداشت تصاویر استریو

ماهواره/سنجنده	وضوح تصویر (m)	وضوح مکانی DEM (متر)	دقت DEM (متر)	مقیاس تقریبی
WorldView-1	۰/۵	۱	۱	۱:۲۰۰۰
WorldView-2	۰/۵	۱	۰/۵	۱:۲۰۰۰
GeoEye-1	۰/۴	۱	۰/۵-۱	۱:۲۰۰۰
ALOS-PRISM	۲/۵	۵	۳-۵	۱:۱۰،۰۰۰

1- Stereo pair imagery
2- Tie points
3- Autocorrelation
4- Parallax
5- Base to height ratio (B/H)

ادامه جدول ٤-١- ویژگی‌های DEM مورد انتظار از داده‌های ماهواره‌ای با قابلیت برداشت تصاویر استریو

ماهواره/سنجنده	وضوح تصویر (m)	وضوح مکانی DEM (متر)	دقت DEM (متر)	مقیاس تقریبی
CARTOSAT-1	۲/۵	۵	۳	۱:۱۰،۰۰۰
IKONOS	۱	۲	۱-۲	۱:۷۰۰۰
SPOT	۱۰	۲۰	۱۰-۲۰	۱:۵۰،۰۰۰
ASTER	۱۵	۳۰	۲۰	۱:۱۰۰،۰۰۰

٤-٥-٢- استفاده از تصاویر راداری SAR [1]

پیکسل‌های تصویر SAR متشکل از یک عدد مختلط است که در آن علاوه بر بزرگا[2] (یا دامنه[3])، اطلاعات فاز سیگنال دریافتی نیز به صورت یک زاویه (رادیان) ثبت می‌شود. بزرگا وابسته به زبری سطح و فاز تابع فاصله آنتن از مجموعه هدف‌های درون پیکسل و خواص دی‌الکتریک آن‌هاست. هر دو پارامتر فوق می‌تواند به ترتیب زیر برای استخراج اطلاعات ارتفاعی به کار رود:

- رادارگرامتری[4] تصاویر استریوی راداری و استفاده از اثر پارالاکس همراه با دامنه سیگنال ثبتی برای تولید DEM
- تداخل‌سنجی و استفاده از تفاوت فاز سیگنال دو تصویر مختلف برای ایجاد اثر استریویی و تولید DEM

در تکنیک تداخل‌سنجی (InSAR یا IfSAR)، تداخل‌سنج با ضرب خارجی پیکسل‌های دو تصویر هم‌مختصات شده (با دقت ۰/۱ پیکسل) تشکیل و سپس فاز واپیچی[5] می‌شود. پس از اعمال برخی اصلاحات از جمله انحنای زمین، آنچه در تداخل‌سنج باقی می‌ماند اثر توپوگرافی است. با انتقال ارتفاع نسبت به یک سطح مبنا و ژئوکد کردن نقشه حاصل، DEM تولید می‌شود. تصاویر دوگانه مورد استفاده در تداخل‌سنجی می‌تواند به شکل عبور منفرد[6] یا عبور هم‌زمان با استفاده از دو آنتن بر روی یک سکوی واحد، عبور چندباره یا تکرار برداشت‌ها با یک آنتن طی دوره‌های تکرار زمانی مشخص با تغییر جزیی زاویه نگاه و عبور دوگانه و هم‌زمان از دو مدار مختلف با ماهواره‌های مشابه تامین شود. از روش نخست طی سال ۲۰۰۰ داده موسوم به SRTM[7] برای محدوده بین عرض ۶۰° شمالی و ۵۶° جنوبی زمین با اندازه پیکسلی ۹۰ و دقت ارتفاعی ۸ متر تولید شده است. در رویه عبور چندباره سنجنده‌های راداری آمده در جدول ۷-۲ می‌توانند برای تولید DEM به کار گرفته شوند. در رویه سوم ماهواره‌های دوقلوی شرکت ASTRUM (یعنی TerraSAR-X و TanDEM-X) از دو مدار مختلف، به طور موازی و هم‌زمان زوج تصویر تداخلی برداشت می‌کنند. با این روش تا سال ۲۰۱۴، DEM کلیه خشکی‌های زمین از قطب تا قطب با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تولید خواهد شد (پیوست، شکل ۱۵).

1- Synthetic aperture radar (SAR)
2- Magnitude
3- Amplitude
4- Radargrammetry
5- Phase unwrapping
6- Single pass
7- Shuttle radar topography mission

٤-٥-٣- فناوری LiDAR[1]

فناوری LiDAR که به آن ارتفاع‌سنجی لیزر یا اسکن لیزری هوابرد نیز می‌گویند، از یک باریکه پرتو لیزر برای تولید اطلاعات ارتفاعی وضوح بالا با ماهیت نقطه‌ای استفاده می‌کند. با معلوم بودن موقعیت دقیق فرستنده و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پالس لیزر ارسالی، می‌توان فاصله اشیا و زمین نسبت به سنجنده را به صورت سه‌بعدی XYZ با دقت بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر تعیین کرد. تراکم بالای ابر نقاط تولید شده بی‌نیاز از درون‌یابی بوده و در نتیجه DTM خروجی فوق‌العاده دقیق است. سرعت در برداشت و آماده‌سازی موجب اقبال بالای این فناوری در بخش‌های مختلف از جمله بخش معدنی شده است. LiDAR می‌تواند بر روی سکوی متحرک هوابرد (هواپیما) یا فضابرد (مثل ماهواره ICESat[2]) و یا بر روی زمین مورد استفاده قرار گیرد.

٤-٥-٤- درون‌یابی نقشه‌های کنتوری

برای تولید DEM از نقشه‌های برداری موجود باید لایه‌های منحنی‌های میزان و نقاط ارتفاعی با الگوریتم‌های مناسب درون‌یابی شوند. وضوح یا اندازه پیکسلی DEM از این روش برابر با نصف فاصله منحنی‌های میزان است.

٤-٦- پردازش داده‌های راداری

در صورتی که در فاصله زمانی برداشت دو تصویر تداخلی SAR، زمین دچار دگرشکلی یا جابه‌جایی شده باشد، این تغییرات در تداخل‌سنج تولیدی منعکس خواهد شد. با دو تصویر با طول خط مبنای کمتر از ۳۰ متر و تکنیک InSAR تشخیص این جابه‌جایی‌ها میسر است، اما لازم است که در ابتدا اثر استریویی توپوگرافی از تداخل‌سنج به یکی از روش‌های دو- عبور (با استفاده از DEM موجود از منطقه) یا سه- عبور (دو تصویر برداشتی نزدیک به هم و فاقد سیگنال دگرشکلی) حذف شود. فاز باقیمانده از هر دوی این روش‌ها معرف میزان دگرشکلی سطحی بوده و با واحد رادیان اندازه‌گیری می‌شود. از آنجا که فاز ماهیتی تناوبی دارد، نتایج به صورت حلقه‌های[3] تکرار شونده ثبت می‌شود و هر کدام نشانگر دوره تناوب 2π است. با تکنیک هموارسازی فاز، میزان جابه‌جایی مطلق زمین برای هر پیکسل تعیین می‌شود. عوامل مختلفی از جمله تغییر هندسه عوارض، خطای هم-مختصاتی، تغییر رطوبت خاک و نوسان میزان عبور اتمسفر موجب نویزی شدن فاز باقیمانده می‌شوند که راه حل استفاده از انواع فیلترها برای تقویت سیگنال فاز است. می‌توان داده‌های SAR را پس از آشکارسازی به صورت یک تصویر سیاه و سفید برای تفسیر پدیده‌های زمین‌شناسی و به ویژه عوارض ساختمانی به کار برد یا آن‌ها را مطابق شکل ۱۶ پیوست با دیگر داده‌ها (از جمله پرتوسنجی) ترکیب و مورد استفاده قرار داد. واضح است که محتوی اطلاعاتی تصویر ترکیبی افزایش خواهد یافت.

1- Light detection and ranging
2- Ice, cloud and land elevation satellite
3- Fringes

٤-۷- پردازش داده‌های ژئوفیزیکی

روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی و پرتوسنجی نه تنها در رویه برداشت، بلکه در رویکرد پردازش نیز مشابه داده‌های دورسنجی (بازتابی/تابشی) هستند و همواره به عنوان مکمل در کنار یکدیگر برای تفسیر بهتر اکتشافی استفاده می‌شوند. روش مغناطیس‌سنجی که مغناطیس باقی‌مانده و القایی سنگ را اندازه‌گیری می‌کند (پیوست، شکل ۱۷)، در تفسیر ساختاری، تفکیک سنگ‌شناسی و بررسی عمق دگرسانی‌ها به کار می‌رود. پردازش داده‌های مغناطیسی سه مرحله دارد:

- درون‌یابی و تبدیل به فرمت رستری
- اعمال فیلترهای برگرداندن به قطب، محاسبه مشتق و سیگنال تحلیلی
- آشکارسازی و تولید داده‌های ۲ یا ۲/۵ بعدی سایه‌دار با آزیموت و ارتفاع مناسب

روش پرتوسنجی، پرتوهای گامای ساطع شده از لایه‌های سطحی سنگ و خاک را غالبا به صورت هوابرد اندازه‌گیری می‌کند و داده‌های حاصل در کنار روش‌های دورسنجی برای تفکیک واحدهای سنگی و گاه شناسایی برخی دگرسانی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (پیوست، شکل ۱۷). پردازش داده‌های پرتوسنجی شامل مراحل زیر است:

- آماده‌سازی، کاهش نویز و درون‌یابی نقاط اندازه‌گیری هر سه عنصر
- آشکارسازی و تولید داده‌های رنگی شده
- ساخت ترکیب سه‌تایی از داده‌های eU,eTh,%K یا تولید نسبت‌های عنصری مانند eTh/K

فصل ۵

استانداردهای ساخت پایگاه داده‌های مکانی، تفسیر و تلفیق اطلاعات

۵-۱- آشنایی

اطلاعات استخراجی از انواع روش‌های دورسنجی معمولا نیازمند تفسیر در راستای هدف زمین‌شناسی- اکتشافی برای کسب شناخت در زمینه پدیده مورد بررسی (در اکتشاف موقعیت، کمیت و کیفیت نهشته یا شواهد کانی‌سازی) است و بهترین ابزار برای رسیدن به این هدف GIS است.

۵-۲- اهمیت و نقش GIS در زمین‌شناسی و اکتشاف

در شکل‌های ۱-۴ تا ۱-۶، جایگاه سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارتباط با برنامه‌های اکتشافی- زمین‌شناسی به روشنی نشان داده شده است. غنای اطلاعاتی داده‌های دورسنجی از یک سو و امکانات بی‌شمار GIS از سوی دیگر موجب پیوند ناگسستنی و نیاز متقابل این دو به هم شده است. به طور کلی GIS در زمین‌شناسی و اکتشاف سه کارکرد اساسی دارد:

- محیطی برای سامان‌دهی، نگهداری، نمایش، ترسیم و ویرایش انواع داده‌ها و اطلاعات
- محیطی برای افزایش دانسته‌های اکتشافی با تفسیر و تلفیق اطلاعات
- محیطی برای کارتوگرافی و تولید انواع نقشه

کارکرد اول و سوم در هر دو زمینه مشترک و کارکرد دوم خاص اکتشاف است. این کارکردهای GIS داده‌هایی با سرشت به ظاهر متفاوت (توصیف/کمی‌کننده الگوهای چهارگانه اکتشافی) در مقیاس‌های مختلف از ناحیه‌ای[1] تا محلی[2] را برای رسیدن به هدف اکتشافی به هم پیوند می‌دهد.

۵-۳- ساخت پایگاه داده مکانی

پایگاه داده‌های مکانی یا زمینی مجموعه منظمی از داده‌های مرتبط با هم به همراه ملزومات حفظ و استفاده از آن‌ها است. یک پایگاه داده باید گویا و قابلیت توسعه، تصحیح و تغییر مقیاس داشته باشد. گام نخست در ساخت پایگاه، انتخاب یا تعریف سیستم مختصاتی متناسب با نوع داده، مقیاس و وسعت محدوده مطالعاتی است. متداول‌ترین سیستم‌های مختصاتی در کشور شامل Lat/long جغرافیایی، UTM با بیضوی WGS84 و اروپایی (European 1950) و نیز سیستم مخروطی لامبرت است.

حد مجاز خطای انواع داده‌های رستری (تصویری) یا برداری وارد یا تولید شده در پایگاه داده (جدول ۵-۱) باید از قبل مشخص باشد که این مهم، از مقیاس تبعیت می‌کند. خطای مجاز داده‌های رستری وابسته به اندازه پیکسلی است و در هنگام تصحیح هندسی تعیین می‌شود (فصل ۳). خطای عوارض برداری به صورت متر بیان می‌شود و باید حداقل نصف اندازه پیکسلی متناسب با مقیاس مطالعات (فصل ۲) باشد.

1- Global
2- Local

جدول ۵-۱- انواع داده‌های رستری و برداری متداول در زمین‌شناسی و اکتشاف

رستری	انواع تصاویر رنگی ماهواره‌ای، نقشه فراوانی کانی‌ها، انواع نقشه‌های اسکن شده و نظایر آن‌ها
برداری	**نقطه** (Point)**:** محل‌های برداشت نمونه، ایستگاه‌های اندازه‌گیری، محل اندیس یا کانسار، نقاط جمعیتی
	خط (Polyline)**:** گسل، راه‌های دسترسی، خطوط تراز، آبراهه، مرزهای سیاسی و نظایر آن‌ها
	سطح (Polygone)**:** واحدهای سنگی، انواع دگرسانی‌ها، محدوده مطالعاتی و نظایر آن‌ها

تصاویر آشکار و بارزسازی شده برای تفسیر و نقشه‌های اسکن و زمین مرجع شده برای تدقیق باید وارد پایگاه داده در GIS شوند. با به کارگیری اصول فتوژئولوژی مطابق شکل ۱-۴، می‌توان فرآیند تفسیر را با امکانات ترسیمی GIS به سهولت به انجام رساند. عوارض تفسیری باید تراکم اطلاعاتی کافی متناسب با مقیاس نقشه داشته باشد. تدقیق نقشه‌های زمین‌شناسی نیازمند رقومی‌سازی عوارض و آنگاه پیاده‌سازی آن‌ها بر روی تصویر با مقیاس متناسب است. خطاهای زیر ممکن است در این نقشه‌ها مشاهده شود:

- خطای تفسیری: نام‌گذاری متفاوت واحدهای سنگ‌شناسی یکسان به ویژه در محل اتصال نقشه‌ها و عدم تفکیک یا تفسیر مناسب واحدهای سنگ‌شناسی و عوارض ساختمانی
- خطای هندسی: جابه‌جایی موقعیت مکانی و مرز واحدها نسبت به محل واقعی خود در زمین

تدقیق معطوف به رفع خطای دوم است ولیکن اصلاح خطای تفسیری که ناشی از نقش بیش از حد سلیقه در تهیه نقشه و یا تکامل و تغییر علم زمین‌شناسی طی زمان است، با عملیات محدود زمینی مرتفع می‌شود.

کاهش مقیاس نقشه‌های زمین‌شناسی یا تعمیم واحدها برای مطالعات فلززایی یا اکتشافی مجاز است ولی عکس آن یعنی افزایش مقیاس نقشه با بزرگنمایی یا زوم بیشتر به هیچ عنوان مجاز نیست.

۵-٤- تفسیر و اعتبارسنجی اطلاعات اکتشافی

آنچه پردازش‌های دورسنجی ارایه می‌دهد، اطلاع از بود (یا نبود) یک پدیده یا عارضه خاص است. تبدیل این اطلاعات به نقشه‌های شاهد[1] کانی‌سازی، نیازمند تفسیر اطلاعات با محور مدل کانی‌سازی است. تفسیر، پیش‌درآمد تلفیق محسوب می‌شود.

۵-٤-۱- تفسیر کانی‌شناسی

در تفسیر نقشه‌های شاهد کانی‌شناسی/ دگرسانی، الگوی توزیع و نظم و ترتیب مکانی کانی‌ها با هم و همچنین ارتباط آن‌ها با سنگ میزبان و کنترل‌کننده‌های ساختاری باید به دقت بررسی شود. نقشه‌های سه‌تایی برای مطالعه همراهی کانی‌ها و تعیین باروری یک سیستم دگرسانی مفید است. کانی‌های شاخص مدل‌های کانی‌سازی معمولا در یک سطح محدود و کانی‌های متداول در

1- Evidence map

گستره‌های وسیع و محیط‌های متنوع یافت می‌شوند. تغییرات فراوانی کانی‌ها در یک سیستم نیز ممکن است با اهمیت باشد. تفسیر کانی‌شناسی را می‌توان هم‌زمان با عملیات پس‌پردازش انجام داد.

۵-٤-۲- تحلیل ساختاری

بیشتر ذخایر معدنی با برخی تغییر شکل‌ها در پوسته زمین مرتبطاند و تکتونیک یا مفاهیم تغییر شکل، جز ثابتی از اکثر تئوری‌های تشکیل و تمرکز کانه‌ها هستند. ساختارها ممکن است از فرآیند تفسیر یا تدقیق تصاویر دورسنجی یا از داده‌های ژئوفیزیکی به پایگاه داده وارد شوند. ارتباط الگوی ساختارها و کانی‌سازی پیچیده است و بررسی آن با دو رویکرد کلی انجام می‌شود:

- رویکرد آماری- محاسباتی: تهیه نمودار گل سرخ، بررسی و مطالعه طول و امتداد، محاسبه نقشه‌های چگالی ساختارها یا تقاطع خطواره‌ها و نظایر آن‌ها
- رویکرد تحلیلی- مکانیسمی: تعیین رژیم تکتونیکی حاکم بر منطقه قبل، هم‌زمان یا پس از کانی‌سازی که این روش نیازمند عملیات زمینی نیز است.

از دیدگاه آماری، کانی‌سازی ممکن است با محیط‌های با تراکم شکستگی بالا، در محل تقاطع گسل‌های کوچک با خطواره‌های ناحیه‌ای یا ساختارهای حلقوی، تقاطع انواع ناحیه‌ای باهم، اطراف و پیرامون ساختارهای حلقوی و غیره همراه باشد. این در حالی است که از دیدگاه تحلیلی، بسته به فاز زمانی، کانی‌سازی نسبت به جهت تنش‌های اصلی در امتداد(های) خاصی قرار خواهد گرفت. به طور مثال بخش‌های خمیده رهایی[1] حاصل از تقاطع گسل‌های امتداد لغز می‌تواند محل مناسبی برای گردش سیالات گرمابی و کانی‌سازی برای تیپ‌هایی مثل مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال باشد (پیوست، شکل ۱۸).

۵-٤-۳- تفسیر سنگ‌شناسی

مدل‌های فلززایی با نقشه‌برداری گسترش انواع ویژه‌ای از سنگ‌ها تعریف شده و جستجو برای اکتشاف یک مدل کانی‌سازی ممکن است بر واحد سنگی ویژه‌ای متمرکز شود. واحدهای سنگ‌شناسی انتخابی ممکن است سنگ میزبان، سنگ منشا و یا منبع حرارتی سیستم‌های کانی‌سازی باشد. این اطلاعات معمولا از نقشه‌های موجود (پس از تدقیق)، از فتوژئولوژی مستقیم تصویر و یا از برداشت‌های زمینی حاصل می‌شوند. پیچیدگی و تنوع واحدهای سنگ‌شناسی که با پارامتر آنتروپی[2] کمی می‌شود نیز ارتباط معناداری با تمرکز کانی‌سازی دارد.

۵-٤-٤- ارتباط دورسنجی با ژئوفیزیک و ژئوشیمی

با وجود غنای اطلاعاتی داده‌های بازتابی/تابشی، محدودیت عدم نفوذ آن‌ها به عمق با تمهیدات زیر مرتفع می‌شود:

- نسبت دادن اطلاعات کانی‌شناسی سطحی به عمق با مدل‌های مفهومی کانی‌سازی
- استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی قابل تعمیم به عمق

1- Releasing bend

2- Entropy

از آنجا که کشور ما در کمربند خشک جهان واقع شده، نقشه‌برداری مستقیم الگوی کانی‌شناسی بسیاری از مدل‌های کانساری (جدول ۱-۱) به طور مستقیم با داده‌های ماهواره‌ای/هوابرد میسر است. تایید این آنومالی‌های کانی‌شناسی با داده‌های ژئوفیزیکی مناسب موجب افزایش احتمال موفقیت اکتشافی می‌شود. در چنین شرایطی، بهتر است نمونه‌برداری‌های ژئوشیمیایی به دنبال پردازش داده‌های ماهواره‌ای- ژئوفیزیکی اجرا شود. مزیت این کار، بهینه‌سازی شبکه و عملیات زمینی، هدایت و تمرکز نمونه‌ها بر روی مناطق مستعد، کاهش تعداد نقاط برداشت و در نتیجه صرفه‌جویی قابل ملاحظه در زمان و هزینه‌ها است.

۵-۵- تلفیق اطلاعات اکتشافی

در صورتی که بر اساس اطلاعات حاصل از یک مجموعه داده به دلیل عدم قطعیت کافی نتوان به تنهایی حضور کانی‌سازی را پیش‌بینی کرد، لازم است اطلاعات حاصل از منابع مختلف با هم تلفیق شوند. حاصل تلفیق اطلاعات، افزایش دانسته‌ها درباره کانی‌سازی است که در قالب نقشه پتانسیل کانی‌سازی نمایش داده می‌شود. تلفیق وابسته به تیپ کانی‌سازی است و در همه موارد نیاز نیست. به طور مثال، محاسبه مطلوبیت معدنی مدل‌های کانی‌سازی مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال با یک مجموعه داده (الگوی کانی‌شناسی- دگرسانی حاصل از داده‌های دورسنجی) میسر است. آنچه در این حالت لازم است ترکیب یا برهم نهی دادن[1] اطلاعات به جای تلفیق است.

افزودن نتایج نمونه‌برداری‌های زمینی به پایگاه داده و یا افزایش مقیاس ممکن است سبب تکرار عملیات تلفیق شود. واضح است که در هر تکرار، تنوع، کیفیت و ارزش اطلاعات تولیدی افزایش، مساحت کاهش و دقت پیش‌بینی نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی افزایش می‌یابد. محاسبه پتانسیل کانی‌سازی، ممکن است داده‌محور یا دانش‌محور باشد. در رویکرد اول، روابط مکانی بین داده‌ها با نقشه‌های پیش‌بینی‌کننده و نقشه‌های واکنشی تخمین زده می‌شود و روش‌های رگرسیون لجستیک[2]، وزن‌های نشانگر[3]، شبکه عصبی و نظایر آن‌ها را شامل می‌شود. در رویکرد دوم، فرد تعیین‌کننده اهمیت این ارتباط است و روش‌های منطق فازی، احتمال بیسین[4] و تئوری دمپر- شفر[5] و نظایر آن‌ها به این رویکرد تعلق دارند. در صورتی که پتانسیل کانی‌سازی از طریق ترکیب شواهد انجام گیرد، فرد می‌تواند بسته به پارامترهایی چون شدت، وسعت، تنوع و همراهی کانی‌های دگرسانی به آنومالی‌های تولیدی، به جای نقشه‌های شاهد، وزن بدهد.

۵-۶- رده‌بندی و انتخاب آنومالی‌های اکتشافی

پس از تلفیق یا ترکیب اطلاعات، باید آنومالی‌های تولید شده رده‌بندی شوند و از میان آن‌ها مناسب‌ترین گزینه‌ها انتخاب شود. امتیاز کسب شده، مساحت، تعدد، راه دسترسی، فاصله، آزاد بودن منطقه/ محدوده، نزدیکی به معادن شناخته شده و در نهایت بودجه

1- Overlay
2- Logistic regression
3- Weights of evidence
4- Bayesin
5- Demper-Shafer belief theory

اکتشافی، در رده‌بندی و انتخاب نقش اساسی دارد. به این ترتیب کار از انتخاب منطقه اکتشافی مساعد شروع شده و با افزایش مقیاس و کاهش مساحت به تعریف هدف و سرانجام تعیین محدوده کانی‌سازی ختم می‌شود.

۵-۷- استانداردهای خروجی‌گیری و نمایش اطلاعات استخراجی

خروجی‌های اصلی حاصل از پردازش و تفسیر داده‌های ماهواره‌ای در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. به جز انواع نقشه‌های رستری و برداری، خروجی‌های مکمل دیگری مانند جداول، نمودارها، شکل‌ها، متون، اسلاید و حتی فیلم نیز ممکن است آن‌ها را همراهی کند. این خروجی‌های متنوع ممکن است به صورت نسخه چاپی و یا الکترونیکی (بر روی لوح فشرده) آماده شود.

۵-۷-۱- نقشه و عکس- نقشه

یک نقشه یا عکس-نقشه چه به صورت الکترونیکی و چه به صورت چاپی باید دارای مقیاس، سیستم مختصاتی، راهنما و سایر اطلاعات توصیفی/توضیحی باشد. نقشه ممکن است برداری (نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی)، رستری (نقشه فراوانی کانی‌ها) یا ترکیبی (نقشه‌های پتانسیل کانی‌سازی) باشد.

فرمت‌های متداول نمایش نقشه‌های رستری، به ویژه نقشه‌های حاصل از پردازش طیفی به صورت زیر است:

- مجموعه‌ای از تصاویر خاکستری برای فراوانی هر کانی
- رنگین کمانی[1] یا قطعه‌بندی شده چگالی آستانه‌دار[2] برای هر کانی با زمینه‌ای تصویری
- ترکیب رنگی یا نمایش سه‌تایی از سه کانی به طور مستقل یا بر روی یک زمینه تصویری
- کدبندی رنگی با تعیین آستانه که هر رنگ آن معرف یک کانی است. نقشه‌های کلاس‌بندی (یا نقشه‌های موضوعی) در این گروه جای دارند (پیوست، شکل ۱۹).

مناسب‌ترین فرمت داده برای خروجی‌گیری به حالت نقشه، Tiff یا PDF است. برای ذخیره یا خروجی‌گیری از داده‌های تصویری حجیم (در حد گیگابایت) فرمت‌هایی چون Mrsid و ECW توصیه می‌شود.

۵-۷-۲- جدول‌ها و متون

جدول یا ستون‌های متصل به لایه‌های برداری در GIS اطلاعات توصیفی و مکانی زیادی را در خود جای می‌دهند. جدول همچنین ممکن است برای معرفی، توصیف و رده‌بندی آنومالی‌ها تولید شود. در این صورت باید مختصات آنومالی، نوع دگرسانی‌ها، مساحت، امتیاز یا اهمیت نسبی و کانی‌سازی مورد انتظار در جدول گزارش شود. نتایج برداشت و کنترل زمینی آنومالی‌ها و دگرسانی‌ها را نیز می‌توان به صورت یک جدول (کمی یا کیفی) ارایه کرد. جداول این چنینی قابلیت اتصال به پایگاه داده‌های مکانی

1- Rainbow coloured
2- Thresholded

در GIS را نیز دارند. در تدوین گزارش فعالیت‌های انجام یافته، باید داده‌های استفاده شده، روش‌های تصحیح و پردازش و نتایج کسب شده واقعی، قابل فهم، شیوا و خلاصه ارایه شود.

۵-۷-۳- خروجی‌های چندرسانه‌ای[1]

خروجی‌های چندرسانه‌ای شامل عکس، اسلاید و فیلم است. عکس ممکن است معرف یک نقشه، نمودارهای طیفی و یا عکس‌برداری‌های زمینی باشد. فیلم در دورسنجی معمولا از فرآیند سه‌بعدی‌سازی و شبیه‌سازی پرواز حاصل می‌شود. شبیه‌سازی پرواز با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، به ویژه فرامکانی و یک DEM مناسب انجام می‌گیرد. این فن در امور اکتشافی و معدنی برای برنامه‌ریزی‌های زمینی و مکان‌یابی نقاط برداشت یا کنترل، مسیریابی و طراحی پروفیل‌های برداشت زمینی و یا نمایش نتایج پردازشی و برداشت‌های زمینی بسیار مفید است. همانند جداول، خروجی‌های چندرسانه‌ای را نیز می‌توان به صورت Hyper-Link به پایگاه داده افزود.

1- Multimedia

فصل ۶

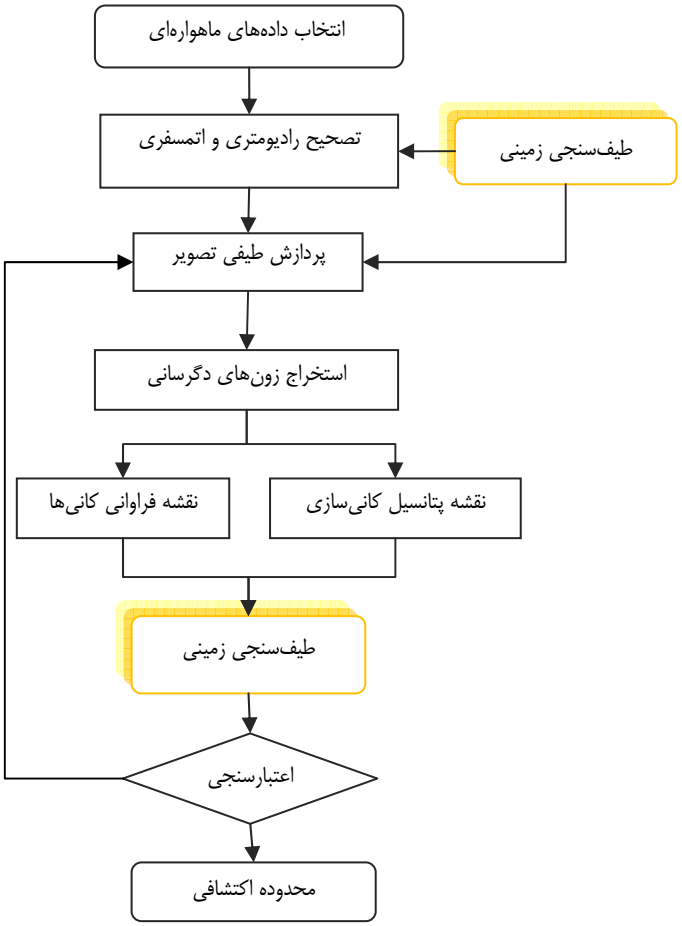
طیف‌سنجی زمینی

٦-١- آشنایی

داده‌های واقعی برداشت زمینی در دورسنجی بازتابی/تابشی برای مقاصد زیر گردآوری می‌شوند:

- برای کمک به پردازش و تفسیر داده‌ها (از طریق ارایه نمودار طیفی کانی‌های تحت بررسی)
- برای واسنجی (کالیبره کردن) سنجنده (موضوع فصل ۳)
- برای اعتبارسنجی اطلاعات استخراجی از فرآیند پردازش طیفی (نقشه‌های کانی‌شناسی)

این داده‌ها از منابعی چون تصاویر با وضوح مکانی-طیفی بیشتر، مشاهدات زمینی، نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، اندازه‌گیری‌های برجای زمینی یا آزمایشگاهی و نظایر آن‌ها حاصل می‌شوند که در این قسمت روش‌های برداشت طیف معرف زمینی ارایه می‌شود. در مناطق اکتشافی دست خورده اندازه‌گیری قبل از پردازش و در مناطق اکتشافی دست نخورده، اندازه‌گیری‌های پس از پردازش رایج است (شکل ۶-۱). اعتبارسنجی نقشه‌های کانی‌شناسی ممکن است همزمان با کنترل کانی‌سازی در مناطق هدف انجام شود.



شکل ٦-١- جایگاه، ترتیب و لزوم اندازه‌گیری‌های طیفی زمینی در یک مطالعه دورسنجی

٦-۲- طیف‌سنجی زمینی

نقطه شروع روش‌های طیفی دورسنجی، ساخت یا بهره‌گیری از کتابخانه‌های طیفی بازتابی/تابشی (فصل ۱) معرف تمامی پدیده‌های جذبی-بازتابی کانی‌ها است. کتابخانه طیفی به عنوان گونه‌ای از داده مرجع در پیوند با مدل کانی‌سازی در مراحل هدف‌گذاری (فصل ۴)، پردازش و تفسیر نتایج طیفی نقش کلیدی دارد. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی این کتابخانه‌ها در شرایط کاملا ایده‌آل (نور و رطوبت) و بر روی نمونه‌های کوچک و خالص انجام می‌شود. با توجه به آنکه داده‌های برداشتی به وسیله سنجنده دورسنجی حاصل بازتاب بزرگ‌مقیاس از کل گستره یک پیکسل است، مرتبط کردن این دو با هم، نیازمند طیف‌سنجی زمینی (شکل ۶-۲) است.

شکل ٦-۲- نمونه‌ای از یک دستگاه طیف‌سنج قابل حمل زمینی در حال اندازه‌گیری طیف یک رخنمون سنگی

در اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی زمینی حضور و اثر پارامترهای زیر لحاظ می‌شود:

- تغییرات طیفی و همراهی کانی‌ها، بافت سنگ‌های در برگیرنده و میزان هوازدگی سطحی
- تغییرات هندسی شامل شیب و آزیموت رخنمون‌ها نسبت به زاویه تابش خورشید
- شرایط محیطی شامل میزان رطوبت، گسترش انواع گیاهان، خزه، گلسنگ[1] و نظایر آن‌ها

به این ترتیب، طیف‌سنجی زمینی در یک پروژه سبب شکل‌گیری بانک اطلاعاتی ویژه یک منطقه می‌شود که نتیجه منطقی آن درک عمیق‌تر کانی‌شناسی سطحی و شناخت بیشتر و بهتر محیط از دیدگاه طیفی است.

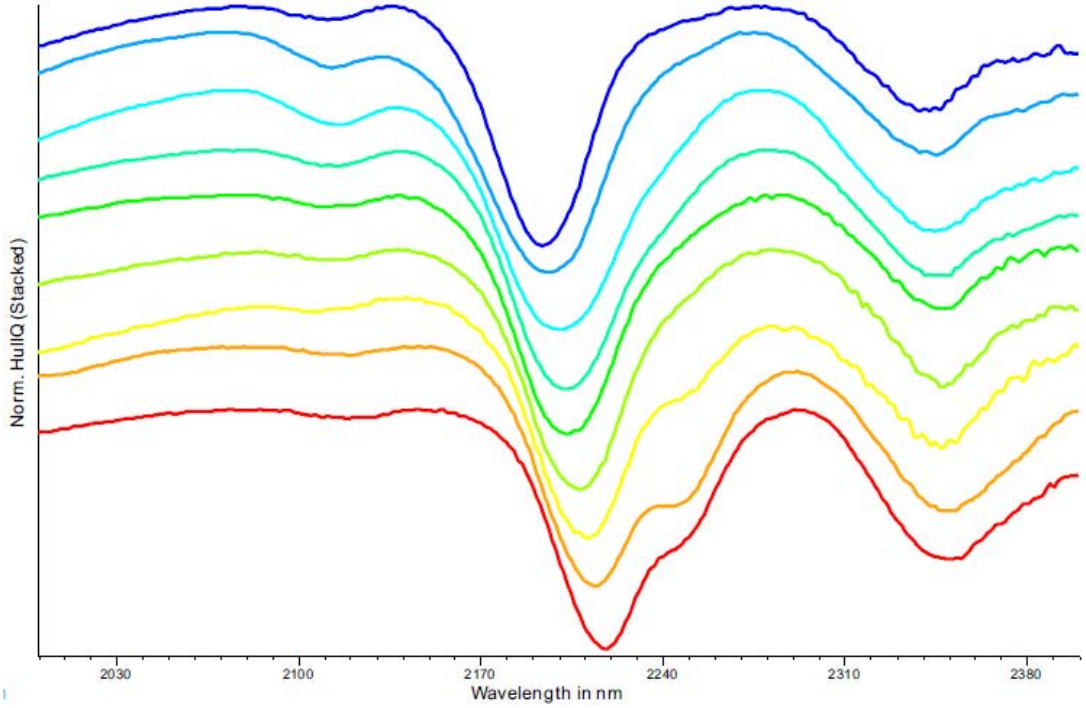
گاهی امکان همراه داشتن طیف‌سنج در زمین مقدور نیست. در این صورت باید از سنگ‌ها و کانی‌های مورد نظر نمونه‌های دستی برداشت و طیف آن‌ها را در آزمایشگاه به وسیله طیف‌سنج اندازه‌گیری کرد. واضح است که در این صورت، دستیابی به پارامترهای مورد نخست امکان‌پذیر است. هنگام اعتبارسنجی نقشه‌های کانی‌شناسی/دگرسانی باید مقیاس، تلفیق و یا مغایرت طیفی کانی‌ها برای هر دو خطای جاماندگی و یا افزودگی (ناشی از فرض نادرست) بررسی شود. فرکانس مکانی هر دو روش نمونه‌برداری، باید از

1- Lichen

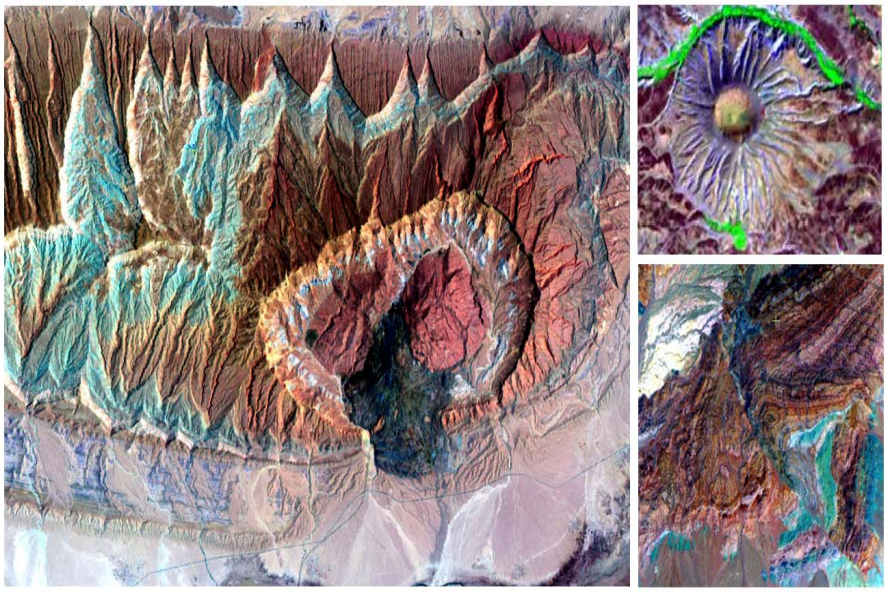
ابعاد آنومالی طیفی یا پدیده اکتشافی/ زمین‌شناسی مورد نظر کمتر باشد. جمع‌آوری داده‌های طیفی مانند دیگر روش‌های نمونه‌برداری با ثبت مختصات محل با GPS، ملاحظات آماری و تعریف طیف میانگین همراه است.

کنترل زمینی در دورسنجی تا اندازه‌ای متفاوت از دیگر برداشت‌های زمینی است. از این رو بهتر است کارشناس دورسنجی وظیفه برداشت زمینی را به عهده گیرد.

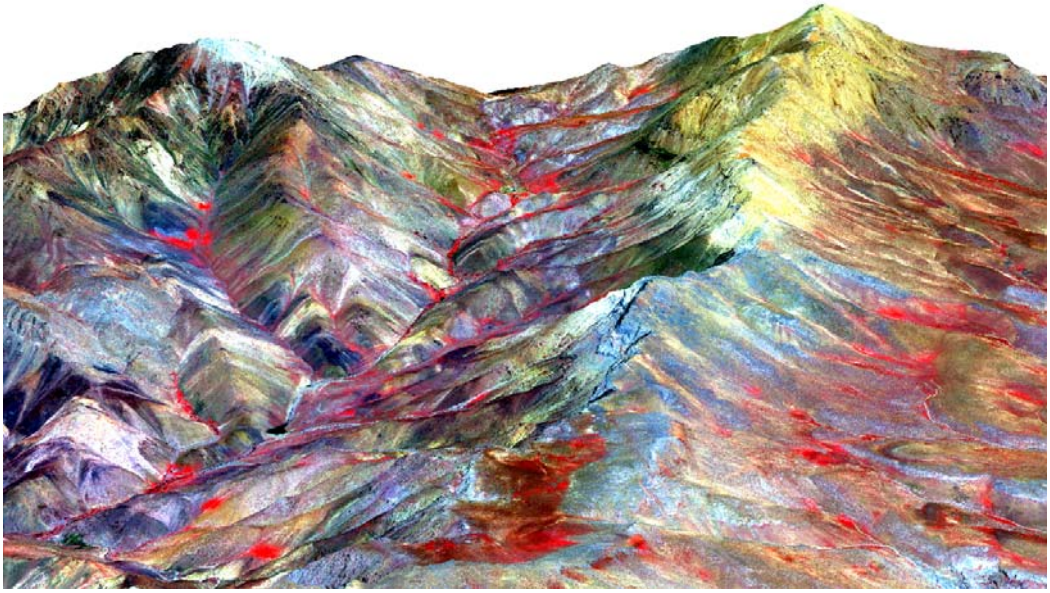
پیوست



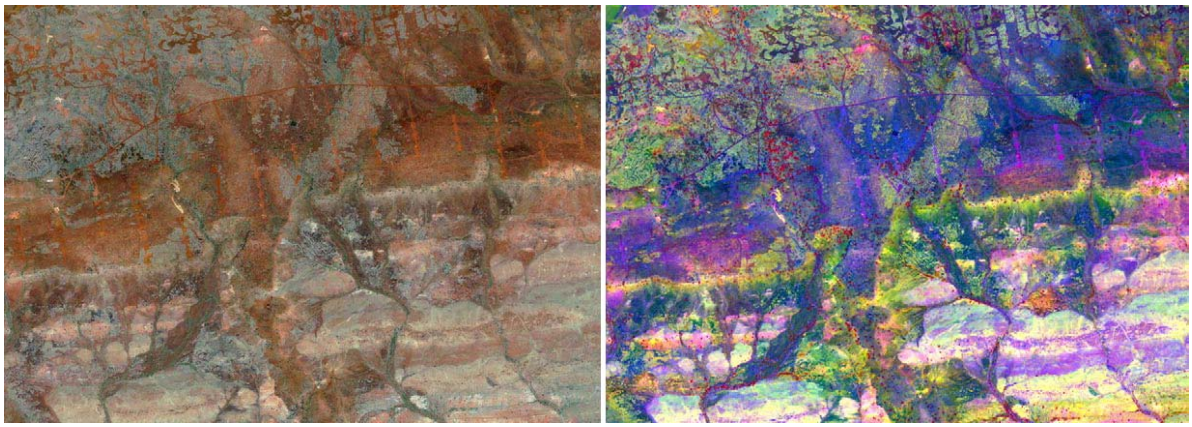
شکل ۱- تغییر در نمودار طیفی بازتابی کانی سریسیت در اثر تغییرات جزیی در ترکیب شیمیایی آن



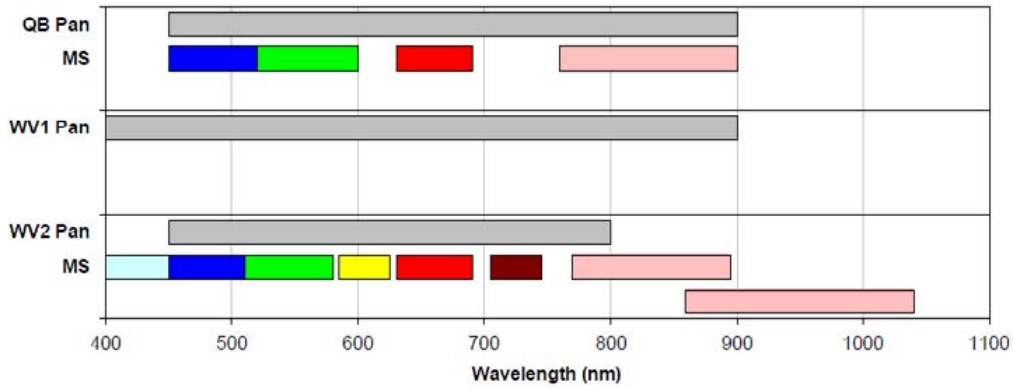
شکل ۲- غنای اطلاعاتی تصاویر ماهواره‌ای در کاربردهای زمین‌شناسی بر اساس فتوژئولوژی



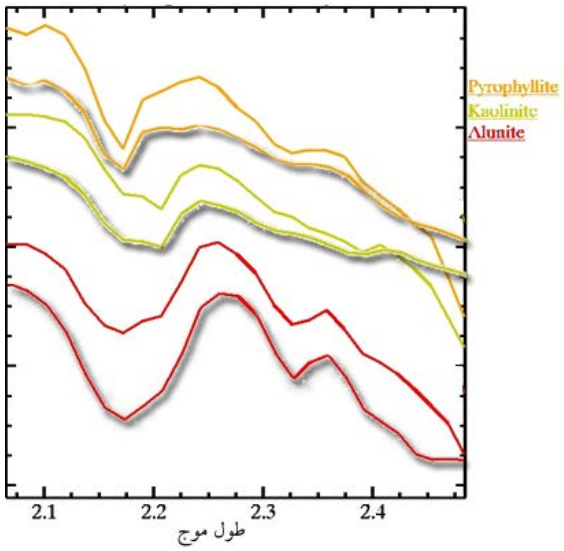
شکل ۳- نمای سه‌بعدی ساخته شده با داده‌های رنگی واضح شده با باند Pan (RGB,431) ماهواره QuickBird و DEM



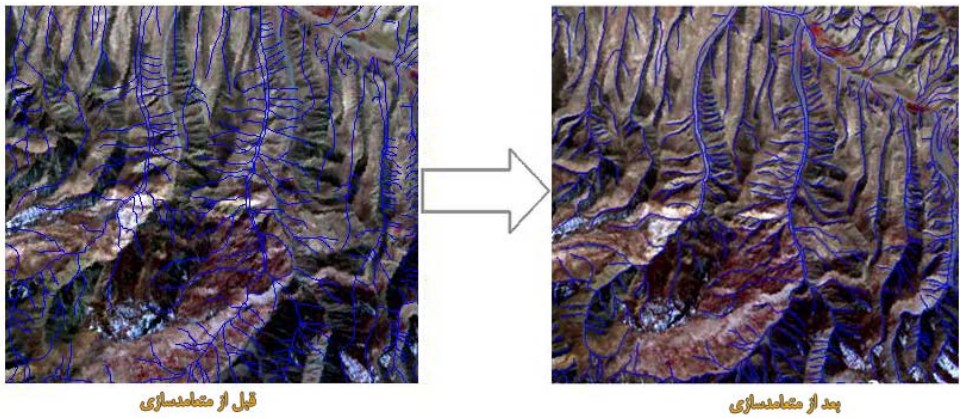
شکل ٤- تصویر رنگی (RGB=532) و بارز شده داده ماهواره WorldView-2 در محدوده یک سازند آهن‌دار



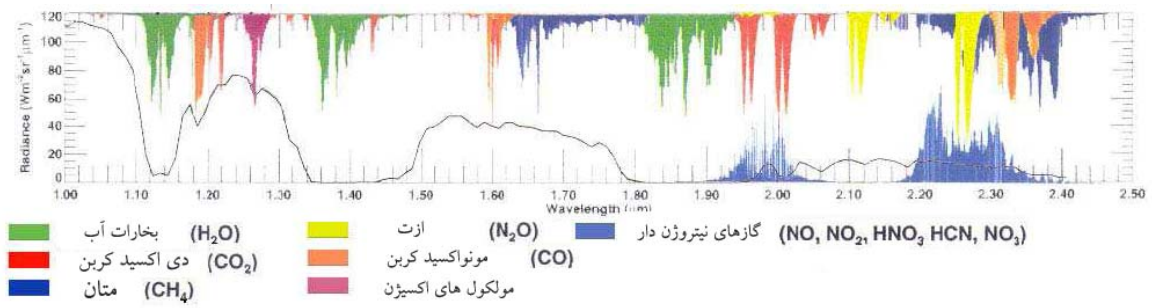
شکل ٥- مقایسه باندهای چندطیفی و Pan سه ماهواره WorldView-1,2 و QuickBird



شکل ٦- مقایسه طیف حاصل از HyMap با داده طیف‌سنج زمینی (سایه‌دار) برای سه کانی پیروفیلیت، کائولینیت و آلونیت

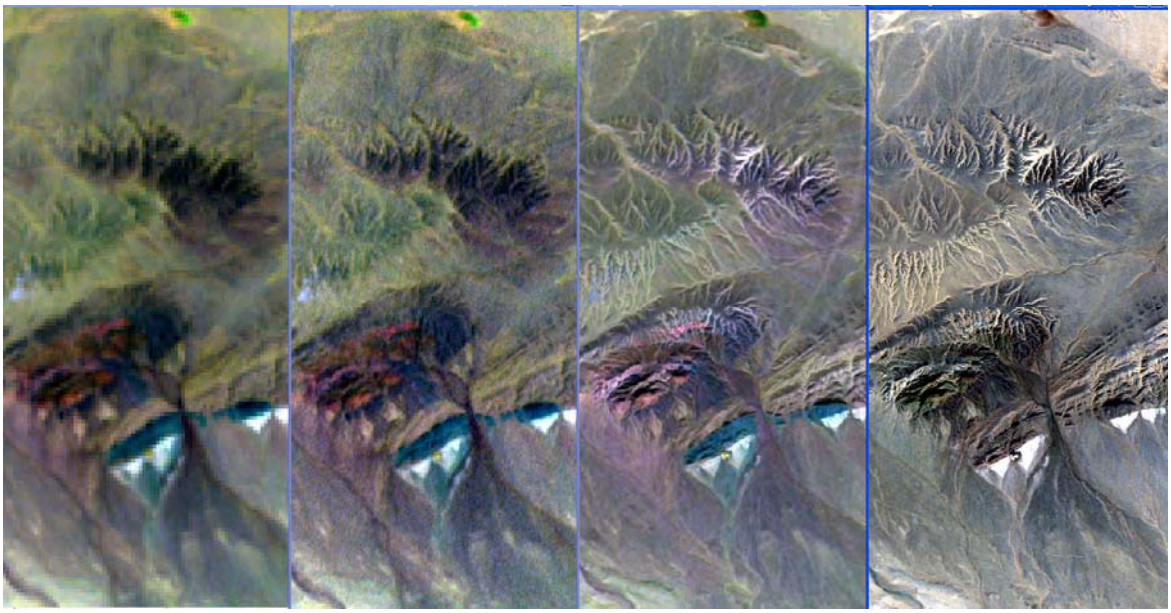


شکل ۷- دقت هندسی تصویر ماهواره‌ای ASTER بر اساس لایه آبراهه‌ها قبل و بعد از عملیات متعامدسازی

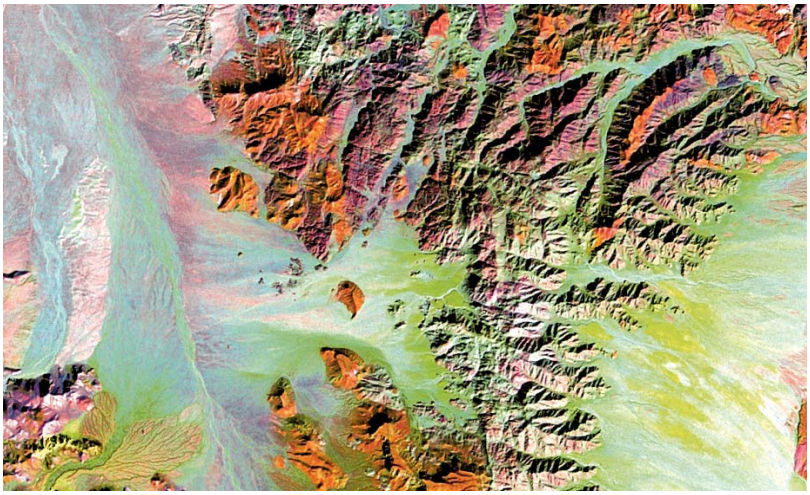


شکل ۸- محدوده طول موجی جذب مهم‌ترین گازهای موجود در اتمسفر

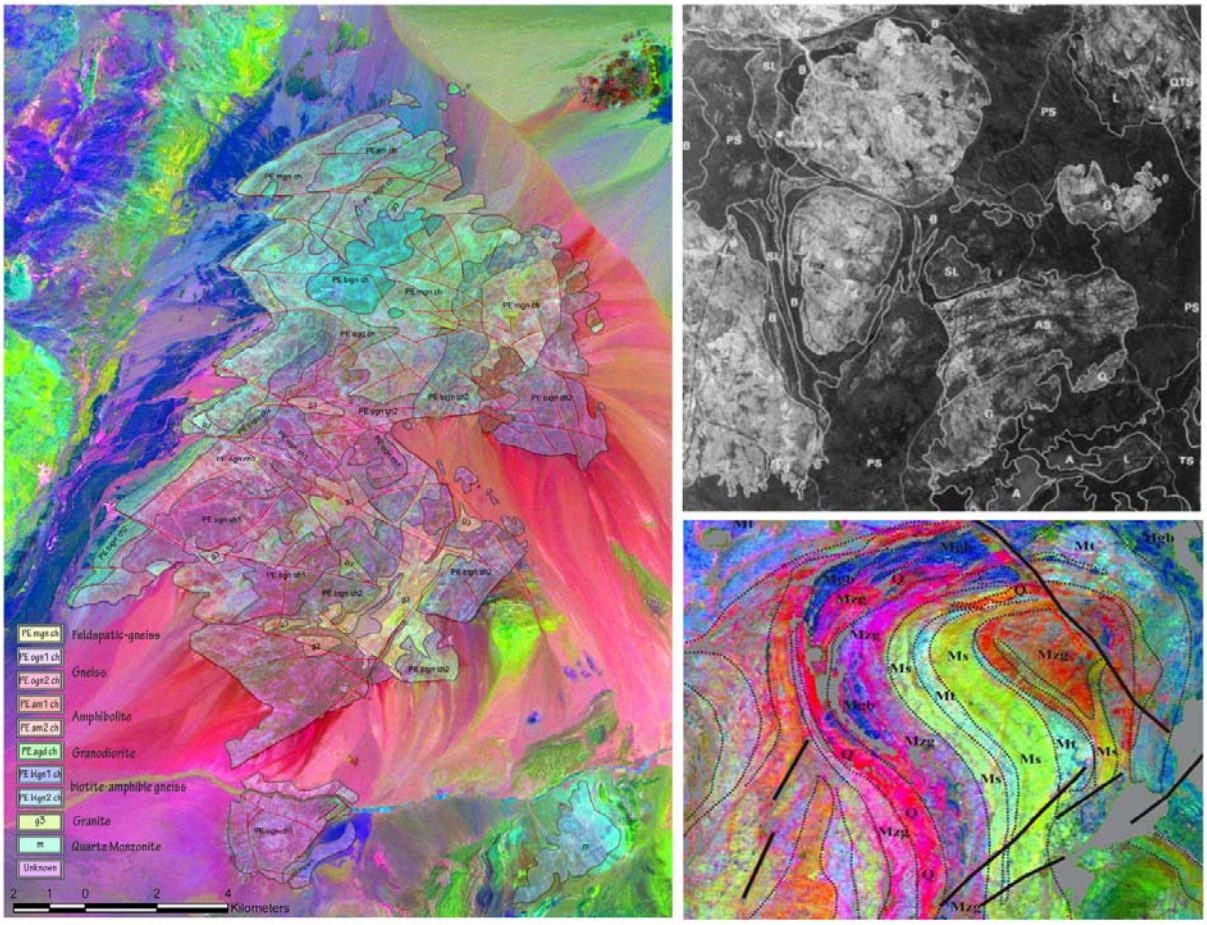
شکل ۹- موزاییک تصاویر ETM ایران و بخش‌هایی از خاورمیانه



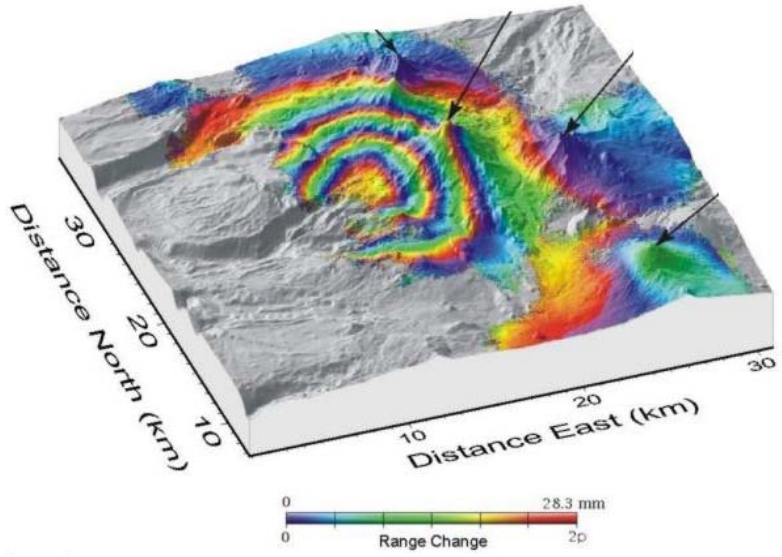
شکل ۱۰- مثالی از داده LANDSAT و ALOS واضح شده از چپ به راست: داده ۳۰ متری لندست (ترکیب رنگی ۷۴۱)، داده واضح شده ۱۵ متری، داده واضح شده با AVNIR با وضوح ۱۰ متر و داده واضح شده ۲/۵ متری AVNIR-2 با PRISM (ترکیب رنگ طبیعی).



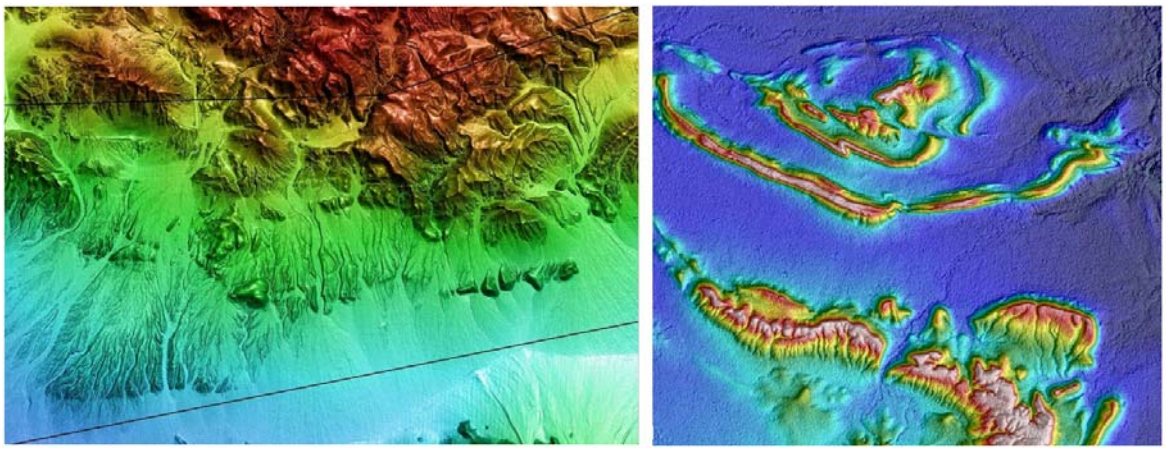
شکل ۱۱- مثالی از تصویر ۲٫۵ بعدی بارز شده حاصل ترکیب داده ماهواره‌ای با داده‌های رقومی ارتفاع



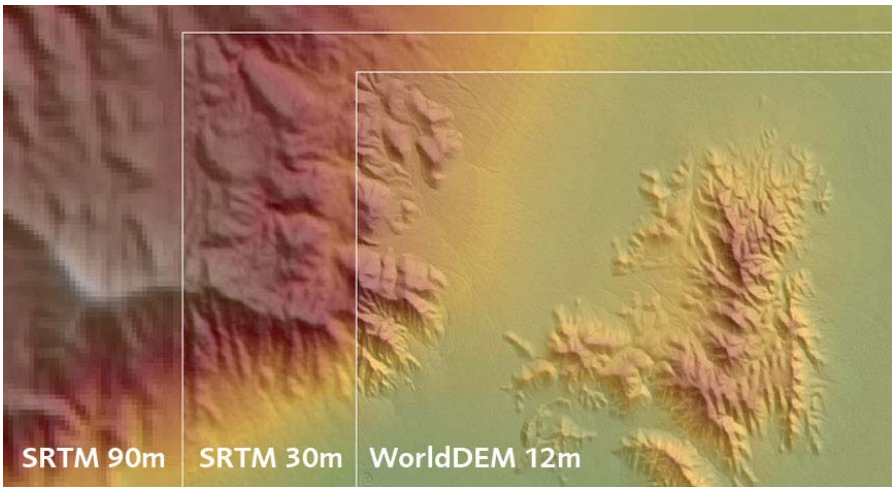
شکل ۱۲- نمونه‌هایی از تفاسیر انجام یافته بر روی تصاویر ماهواره‌ای بر اساس روش‌های فتوژئولوژی



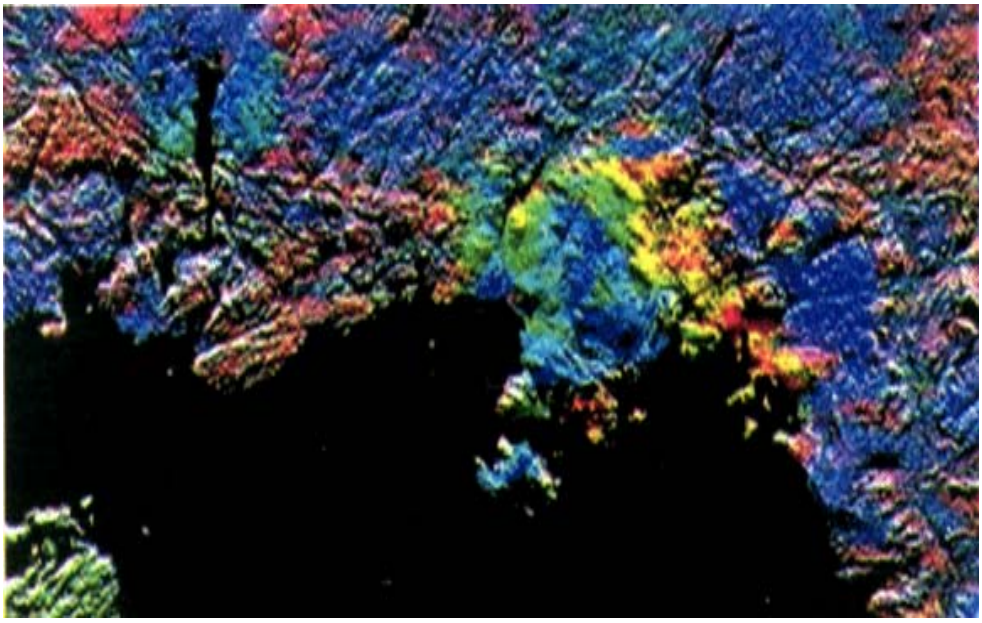
شکل ۱۳- دگرشکلی (بالاآمدگی) یک آتشفشان در اثر تغییر در توزیع عمقی ماگما با روش تداخل‌سنجی



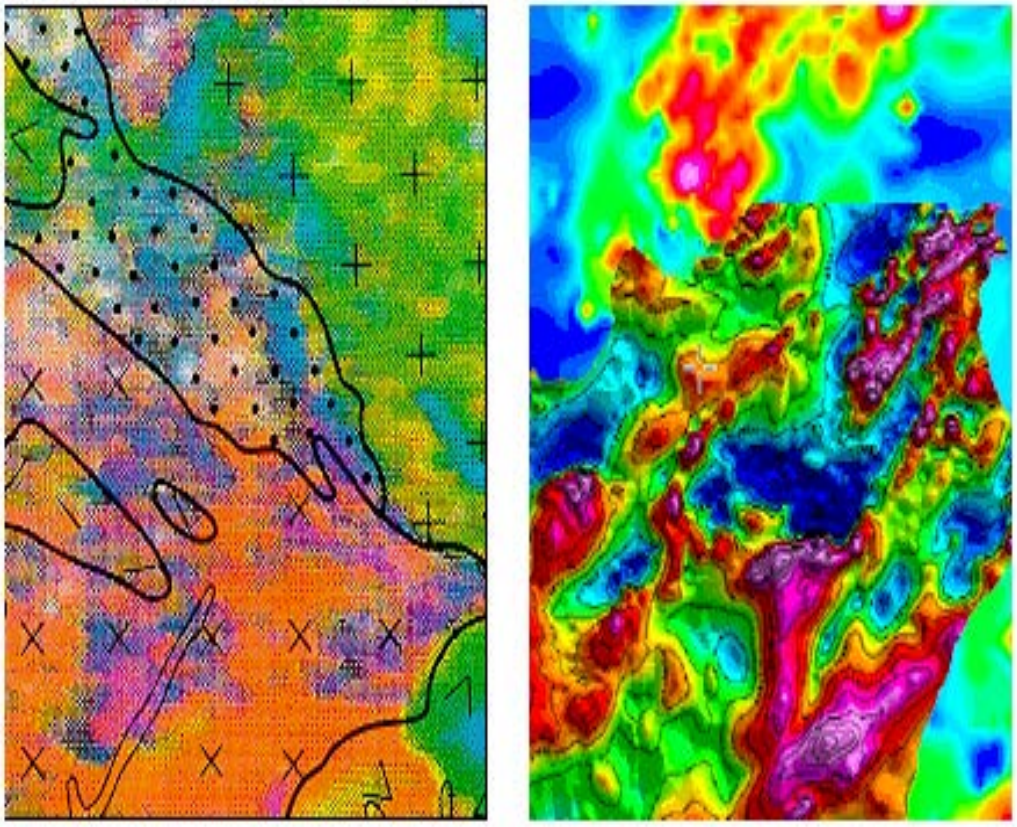
شکل ١٤- تولید DEM با داده‌های ماهواره‌ای، سمت راست تولید شده با ALOS-PRISM و وضوح ۵ و سمت چپ با GeoEye-1 و وضوح ۱ متر



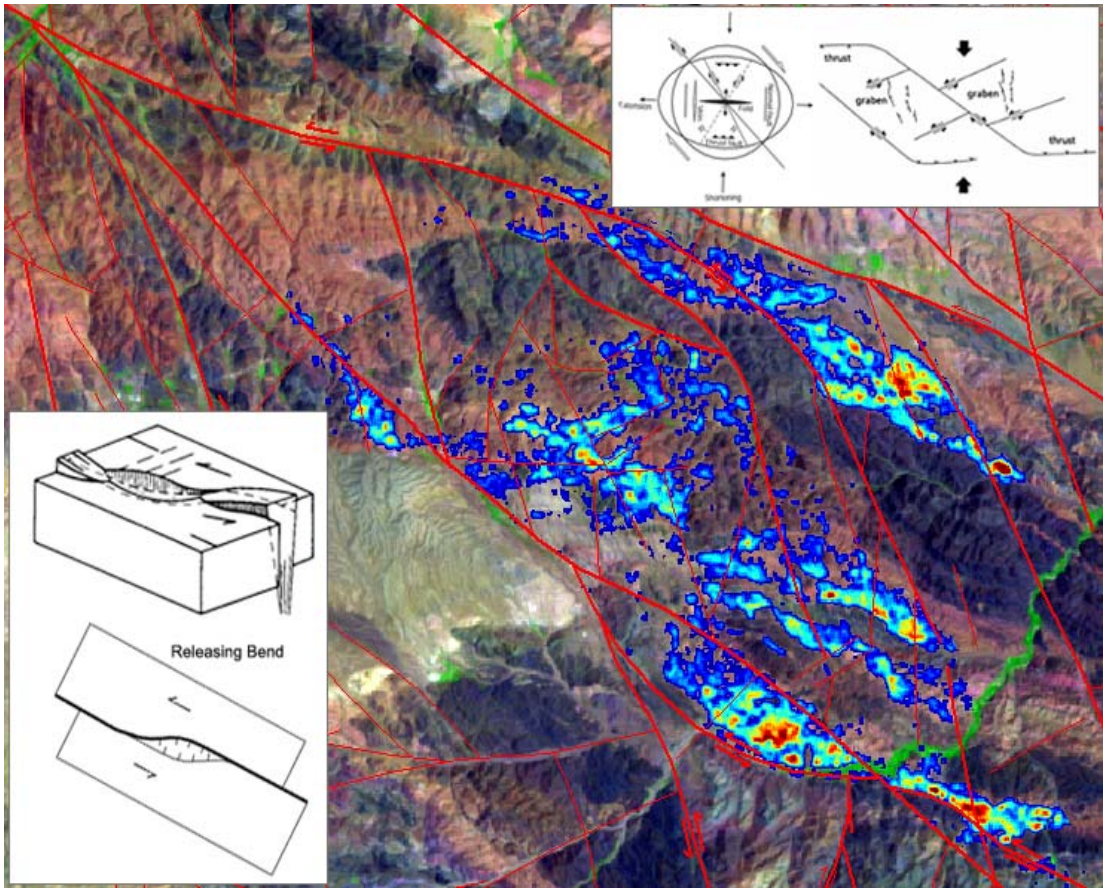
شکل ۱۵- مقایسه WorldDEM حاصل از ماهواره TerraSAR-X با SRTM



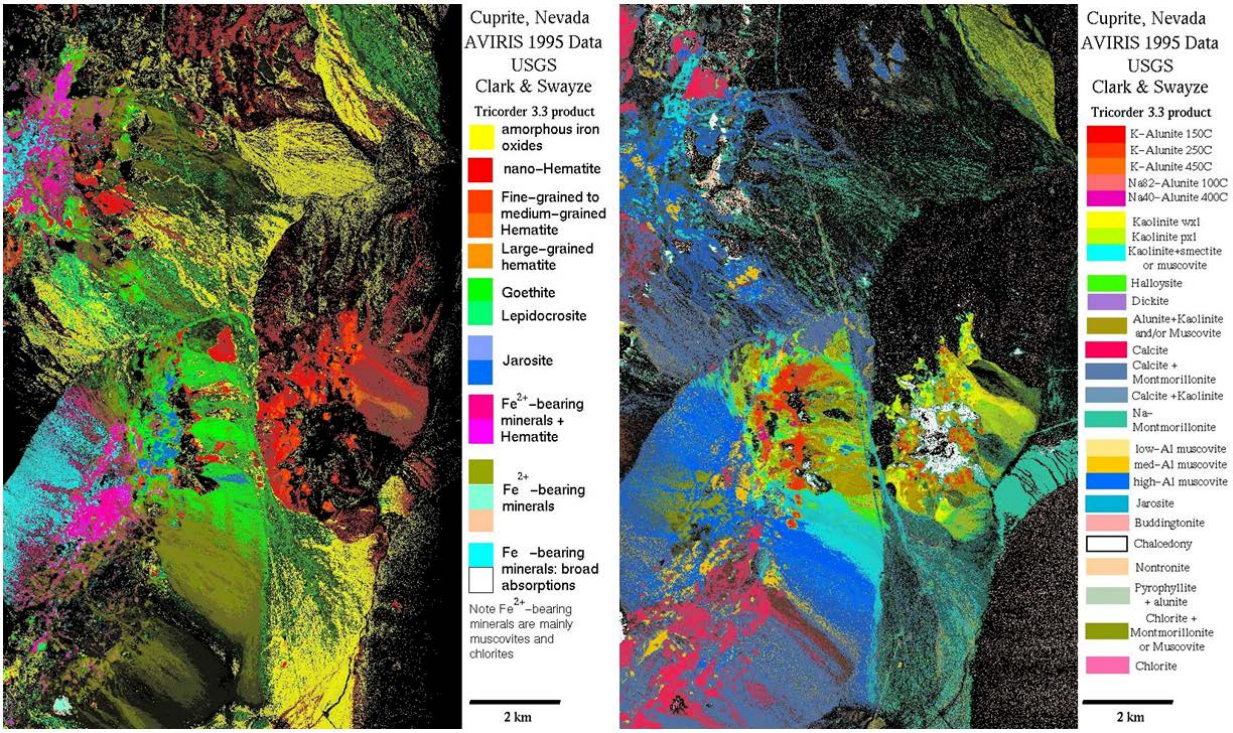
شکل ۱۶- داده‌های پرتوسنجی گاما در ترکیب با داده‌های راداری SAR



شکل ۱۷- نقشه سیگنال تحلیلی شدت کلی میدان مغناطیسی (راست) و ترکیب سه‌تایی پرتوسنجی (چپ)



شکل ۱۸- بخش‌های خمیده رهایی در گسل‌های امتدادلغز محتمل‌ترین نقاط برای شکل‌گیری دگرسانی/ کانه‌سازی در رژیم‌های فشارشی



شکل ۱۹- نمونه‌ای از نقشه‌های کانی‌شناسی تولید شده با داده‌های AVIRIS در نوادا توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریـیس جمهـور، بـا گذشـت بـیش از سـی سـال فعالیـت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیـین‌نامـه، ضـابطه، معیـار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضـر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کـشور و بهبـود فعالیـت‌هـای عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی **nezamfanni.ir** قابل دسـتیابی می‌باشد.

امور نظام فنی

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision

List of Services and Guidelines for Remote Sensing Studies in Mineral Exploration

No.615

Ministry of Industry, Mine and Trade
Deputy of Mine Affairs and Mineral Industries
Office for Mining Supervision and Exploitation
http://mimt.gov.ir

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical Affairs
Nezamfanni.ir

2013

این نشریه

با هدف کمک به بهره‌برداری بهینه از پتانسیل دورسنجی در علوم زمین از طریق تعریف چارچوب‌های نظری و عملی و تبیین الزامات، حدود و راهبردها برای تمامی مراحل به همراه هماهنگی و استانداردسازی زنجیره تهیه، پردازش، تحلیل، تفسیر و اعتبارسنجی داده‌های دورسنجی در اکتشاف مواد معدنی ارایه شده است.