وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشکده فنی و مهندسی

گروه معدن و نفت

تخمین خواص مخزن با استفاده از وارون‌سازی زمین‌آماری داده‌های لرزه‌ای و اطلاعات چاه: مطالعه موردی در یکی از مخازن هیدروکربنی جنوب ایران

پایان نامه برای دریافت کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی اکتشاف نفت

نگارش

میثم ملکی

اساتید راهنما

دکتر حمید رضا همتی آهویی

دکتر مجید نبی بیدهندی

استاد مشاور

مهندس محمدرضا سکوتی

مهر ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به مادر عزیزم

سپاس و قدردانی

بدینوسیله از زحمات بی دریغ جناب آقای دکتر نبی بیدهندی و جناب آقای دکتر همتی که همواره از حمایت و راهنمایی های ایشان در طول این تحقیق بهره گرفته ام، تشکر می کنم.

همچنین از جناب آقای دکتر کریمی و جناب آقای دکتر هاشمی که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشته اند، سپاسگزارم.

همکاری صمیمانه ی شرکت مدیریت اکتشاف، به ویژه جناب آقای مهندس سکوتی که بدون راهنمایی و مشورت ایشان انجام این کار ممکن نبود، شایان قدردانی می باشد.

چکیده

وارون‌سازی اطلاعات لرزه‌ای به طور وسیعی در شناسایی خواص مخزن به کار گرفته می شود. روش‌های مرسوم وارون‌سازی لرزه‌ای نتایجی با قدرت تفکیک عمودی برابر با داده‌های لرزه‌ای ایجاد می‌کنند. وارون سازی زمین آماری به میزان قابل توجه‌ای قدرت تفکیک عمودی را افزایش می‌دهد و تخمین جزئیات خواص مخزن، به خصوص لایه های مخزنی کم ضخامت، با استفاده از این روش میسر می‌گردد. در این پایان‌نامه وارون‌سازی زمین‌آماری داده‌های لرزه‌ای و اطلاعات چاه در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران به منظور تخمین مقاومت صوتی، لیتولوژی و تخلخل مربوط به زون‌های کم ضخامتِ سازند مخزنی و یافتن نحوه‌ی گسترش آنها در میدان، انجام می‌شود. به منظور انجام عملیات وارون‌سازی زمین‌آماری، داده‌های لرزه‌ای منطقه، نگارهای مختلف چاه و افق‌های تفسیری لرزه‌ای آماده گردیدند. انطباق بین چاه و داده‌های لرزه‌ای صورت گرفت، موجک مناسب تخمین زده شد و مدل اولیه زمین با توجه به چینه‌شناسی منطقه ساخته گردید. وارون‌سازی خارهای پراکنده‌ی مقید بر روی داده‌های لرزه‌ای انجام شد. وارون سازی زمین‌آماری با استفاده از هیستوگرام ها و واریوگرام های تولیدی و موجک تخمینی انجام شد و مدل‌های چندگانه مقاومت صوتی و لیتولوژی به دست آمد. با استفاده از شبیه سازی توامِ تخلخل و مقاومت صوتی، مقادیر تخلخل برای هر مدل چندگانه تخمین زده شد. نتایج حاصله، جزئیات خواص زون‌های کم ضخامت مخزن را در نواحی اطراف چاه‌ها به خوبی تخمین می‌زنند و با نگارهای چاه مطابقت دارند و در نواحی دور از چاه‌ها، هرچه فاصله از چاه بیشتر می‌شود قدرت تفکیک عمودی کاهش می‌یابد و جزئیات کمتری قابل مشاهده است.

کلمات کلیدی: شناسایی مخزن، وارون‌سازی زمین آماری، زمین‌آمار، تخلخل

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه ۱

فصل دوم زمین‌آمار ۷

۲-۱ مقدمه‌ای بر زمین‌آمار ۸

۲-۲ مفاهیم اولیه‌ی آمار کلاسیک ۸

۲-۲-۱ متغیر تصادفی ۹

۲-۲-۲ تابع توزیع احتمال ۹

۲-۲-۳ تابع چگالی احتمال ۱۰

۲-۲-۴ توزیع نرمال ۱۱

۲-۳ واریوگرام ۱۲

۲-۳-۱ ترسیم واریوگرام ۱۴

۲-۳-۲ ویژگی‌های واریوگرام ۱۴

۲-۳-۲-۱ اثر قطعه ای ۱۵

۲-۳-۲-۲شعاع تاثیر ۱۵

۲-۳-۲-۳ سقف واریوگرام ۱۵

۲-۳-۳ رفتار واریوگرام در نزدیکی مبدأ ۱۶

۲-۳-۴ مدل‌سازی واریوگرام ۱۶

۲-۳-۴-۱ مدل کروی ۱۷

۲-۳-۴-۲ مدل نمایی ۱۸

۲-۳-۴-۳ مدل سازی گوسی ۱۸

۲-۴ روش های تخمین و شبیه سازی زمین آماری ۱۹

۲-۴-۱ کریجینگ ۱۹

۲-۴-۲ کوکریجینگ ۲۱

۲-۴-۳ شبیه سازی زمین‌آماری ۲۳

فصل سوم وارون‌سازی لرزه‌ای زمین‌آماری ۲۷
۳-۱ مقدمه ۲۸
۳-۲ مبانی وارون‌سازی لرزای ۲۸
۳-۲-۱ طرح مسئله ۲۹
۳-۳ وارون‌سازی لرزه‌ای قطعی ۳۲
۳-۴ وارون‌سازی به روش خارهای پراکنده‌ی مقید ۳۵
۳-۴-۱ تابع هدف و بهینه‌سازی ۳۷
۳-۴-۱-۱ عدم انطباق لرزه ای ۳۸
۳-۴-۱-۲ عدم انطباق کنتراست ۳۹
۳-۴-۱-۳ عدم انطباق روند ۳۹
۳-۴-۱-۴ عدم انطباق نرم فضایی ۳۹
۳-۴-۲ تعادل در توابع عدم انطباق ۴۰
۳-۵ اضافه کردن قیدهای فضایی به فرآیند وارون سازی ۴۱
۳-۶ وارون‌سازی زمین آماری ۴۳
۳-۶-۱ روش اولیه ۴۳
۳-۶-۲ توسعه روش اولیه ۴۴
۳-۶-۳ وارون‌سازی زمین آماری با استفاده ازشبیه ساز آنیلینگ ۴۶
۳-۶-۴ وارون‌سازی زمین آماری با استفاده از مونت کارلو زنجیره مارکوفی ۴۷
۳-۶-۵ مزیت های وارون‌سازی زمین آماری ۴۹
۳-۶-۵-۱ جزئیات جانبی در فواصل چاه‌های کنترل ۴۹
۳-۶-۵-۲ جزئیات عمودی فراتر از پهنای باند لرزه ای ۵۰
۳-۶-۵-۳ شکل زمین‌شناسی واقعی ۵۱
۳-۶-۵-۴ تولید خواص پتروفیزیکی از شبیه‌سازی توام ۵۱
۳-۶-۵-۵ تخمین معتبری از عدم قطعیت ۵۲

فصل چهارم کاربرد وارون‌سازی زمین‌آماری در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران ۵۳
۴-۱ زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه ۵۴
۴-۱-۱ تکتونیک و زمین‌شناسی ساختمانی میدان مورد مطالعه ۵۴
۴-۲ سازند مورد مطالعه ۵۵
۴-۲-۱ سازند عرب ۵۵
۴-۲-۱-۱ بخش عرب پایینی ۵۵
۴-۲-۱-۲ بخش عرب بالایی ۵۶
۴-۳ آماده سازی اطلاعات ۵۶
۴-۴ انطباق چاه با داده های لرزه ای و تخمین موجک ۵۹
۴-۵ ساخت مدل زمین ۶۲
۴-۶ وارون سازی به روش خاره ای پراکنده ی مقید ۶۳
۴-۷ وارون سازی زمین آماری ۷۴
۴-۷-۱ ساخت هیستوگرام ها ۷۴
۴-۷-۲ تهیه واریوگرام ها ۷۷
۴-۷-۳ تنظیم پارامترهای وارون سازی زمین آماری ۷۹
۴-۸ شبیه سازی توام تخلخل ۸۷
۴-۹ بررسی عدم قطعیت نتایج ۸۹
فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۵
۵-۱ نتیجه‌گیری ۹۶
۵-۲ پیشنهادات ۹۷
منابع ۹۹

فهرست جداول

جدول ۴-۱ مقادیر به کار رفته پارامترهای مختلف وارون سازی خارهای پراکنده‌ی مقید ۶۵

جدول ۴-۲ هیستوگرام های به دست آمده از اطلاعات چاه ها ۷۵

جدول ۴-۳ درصد لیتولوژی‌های مختلف در هرلایه ۷۶

جدول ۴-۴ واریوگرام‌های به کار رفته در وارون‌سازی زمین آماری ۷۸

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ نمودار توزیع نرمال ۱۲

شکل ۲-۲ قسمت‌های مختلف واریوگرام..... ۱۶

شکل ۲-۳ نمایش واریوگرام‌های مدل گوسی،نمایی و کروی ۱۹

شکل ۲-۴ مراحل شبیه‌سازی SGS..... ۲۶

شکل ۳-۱ روندکار مربوط به وارون‌سازی خارهای پراکنده‌ی مقید..... ۳۶

شکل ۳-۲ شرح مدلسازی لرزه ای پیشرو ۴۳

شکل ۳-۳ الگوریتم وارون‌سازی زمین آماری به روش هاس و دابرول..... ۴۵

شکل ۳-۴ فرآیند وارون‌سازی زمین‌آماری با استفاده از شبیه‌سازی آنیلینگ..... ۴۷

شکل ۴-۱ داده‌های لرزه‌ای سه بعدی میدان در محدوده‌ی وارون‌سازی..... ۵۸

شکل ۴-۲ نگارهای مربوط به یکی از چاه‌های مورد مطالعه ۵۸

شکل ۴-۳ افق‌های لرزه‌ای تفسیر شده در محدوده‌ی مخزن و محل قرار گرفتن چاه‌های مورد مطالعه..... ۵۹

شکل ۴-۴ نتایج انطباق چاه با داده‌های لرزه‌ای در یکی از چاه‌های مورد بررسی..... ۶۱

شکل ۴-۵ کنترل کیفی موجک تخمینی میانگین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، نگارمقاومت صوتی چاه و مقاومت صوتی به دست‌آمده از وارون سازی..... ۶۲

شکل ۴-۶ مقطع عرضی از مدل زمین در مسیری دلخواه که از چاه ها عبور می‌کند..... ۶۳

شکل ۴-۷ روند مقاومت صوتی به کار رفته در وارون‌سازی خارهای پراکنده‌ی مقید در محل چاه‌ها..... ۶۴

شکل ۴-۸ مقطعی عرضی از مدل روند..... ۶۴

شکل ۴-۹ مرزهای بالا و پایین در نظر گرفته شده در وارون سازی خارهای پراکنده..... ۶۶

شکل ۴-۱۰ مقطعی عرضی از مدل مرزهای پایینی مقاومت صوتی..... ۶۷

شکل ۴-۱۱ مقطعی عرضی از مدل مرزهای بالایی مقاومت صوتی ۶۷

شکل ۴-۱۲ نمایش فرکانس‌های داده‌های لرزه‌ای..... ۶۸

شکل ۴-۱۳ مقطعی عرضی از مدل فرکانس‌های پایین..... ۶۹

شکل ۴-۱۴ مقطعی عرضی از مدل مقاومت صوتی به دست آمده از وارون‌سازی خارهای پراکنده‌ی مقید در یک مسیر دلخواه که از چاه‌ها عبور می‌کند ۷۰
شکل ۴-۱۵ ضریب همبستگی رد مصنوعی و رد لرزه‌ای را در یک مسیر دلخواه که از چاه‌ها عبور می‌کند..... ۷۱
شکل ۴-۱۶ ضریب همبستگی رد مصنوعی حاصل از وارون‌سازی خارهای پراکنده و رد لرزه‌ای در کل منطقه ۷۱
شکل ۴-۱۷ نمایش فرکانس های مدل مقاومت صوتی به دست آمده از وارون سازی خارهای پراکنده..... ۷۲
شکل ۴-۱۸ مقایسه مقاومت صوتی به دست‌آمده از وارون سازی خارهای پراکنده با نگار مقاومت صوتی چاه ۷۳
شکل ۴-۱۹ نمایش هیستوگرام های به کار رفته در وارون سازی زمین آماری ۷۶
شکل ۴-۲۰ واریوگرام های عمودی مقاومت صوتی برای لایه های هیث و عرب میانی ۷۷
شکل ۴-۲۱ فرآیند وارون‌سازی زمین‌آماری به طور شماتیک..... ۸۰
شکل ۴-۲۲ مقطعی عرضی از مدل مقاومت صوتی تخمین زده شده با استفاده از وارون‌سازی زمین‌آمار ۸۲
شکل ۴-۲۳ ضریب همبستگی بین ردهای مصنوعی حاصل از وارون‌سازی زمین‌آماری و داده‌های لرزه‌ای..... ۸۳
شکل ۴-۲۴ هیستوگرام‌های مقاومت صوتی ورودی و خروجی وارون‌سازی زمین‌آماری..... ۸۳
شکل ۴-۲۵ فرکانس‌های یک تحقق مقاومت صوتی به دست‌آمده از وارون‌سازی زمین‌آماری..... ۸۴
شکل ۴-۲۶ مقایسه مدل مقاومت صوتی به دست آمده از وارون سازی خارهای پراکنده مقید با یکی از مدل‌های مقاومت صوتی به دست آمده از وارون‌سازی زمین‌آماری..... ۸۵
شکل ۴-۲۷ مقایسه مدل مقاومت صوتی به دست آمده از وارون سازی خارهای پراکنده مقید با یکی از مدل‌های مقاومت صوتی به دست آمده از وارون‌سازی زمین‌آماری در محل چاه‌ها..... ۸۶
شکل ۴-۲۸ مقطعی عرضی از یکی از مدل‌های تخلخل به دست آمده از شبیه‌سازی توام مدل مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی زمین‌آماری..... ۸۸
شکل ۴-۲۹ هیستوگرام‌های مربوط به تخلخل ورودی و خروجی شبیه‌سازی توام ۸۹
شکل ۴-۳۰ مقطعی از مدلِ احتمال حضور دولومیت در هر نقطه..... ۹۰
شکل ۴-۳۱ مقطعی عرضی از مدل مقاومت صوتی حاصل از میانگین ۱۰ تحقق وارون‌سازی زمین‌آماری ۹۱
شکل ۴-۳۲ مدل محتمل‌ترین لیتولوژی ۹۲
شکل ۴-۳۳ میانگین تخلخل ۱۰ تحقق به دست آمده از شبیه‌سازی توام..... ۹۳

فصل اول

مقدمه

شناسایی خواص مختلف مخزن از قبیل لیتولوژی و تخلخل سنگ مخزن نقشی اساسی در اکتشاف وتوسعه‌ی میادین هیدروکربنی ایفا می‌کند. این اطلاعات در تعیین محل حفر و نحوه‌ی حفاری چاه‌های جدید و شبیه‌سازی جریان مخزن به‌کار برده می‌شوند.

نقشه ها و ساخت نقشه ها قسمت مهمی از عملیات شناسایی مخزن[۱] را تشکیل می دهند. نقشه مدلی عددی از توزیع فضاییِ یک نشانگر (مانند: تخلخل، تراوایی، ضخامت) است. با این وجود هدف اصلی صرفاً ساخت نقشه‌ی یک نشانگر نمی‌باشد بلکه نقشه به منظور پیش بینی در مورد مخزن به کار گرفته می شود. هزینه های بالای توسعه ی میادین ناهمگن و تمایل به افزایش بازیافت نهایی، شرکت های نفتی را برای به کارگیری روش های بدیعِ شناسایی مخزن مجاب می کند. زمین‌آمار یکی از فناوری های نو است که اغلب بدین منظور به کاربرده می شود. بیش از یک دهه است که روش های زمین‌آماری، به خصوص وقتیکه با داده های لرزه ای سه بعدی به کارگرفته شوند، به عنوان فناوریِ مورد قبولی در شناسایی مخازن نفتی شناخته می‌شوند. کاربرد زمین‌آمار امکان همکاری بین زمین شناسان و مهندسین مخزن را فراهم می کند، که این همکاری کاملا متفاوت با گذشته است زیرا فرموله کردنِ ریاضیاتی در گذشته برای مهندس مخزن باقی می ماند. بنابراین فلسفه‌ی استفاده از زمین آمار تضمین این نکته است که واقعیت زمین شناسی در حین ساخت مدل مخزن کنار گذاشته نشود.

زمین آمار تلاش می کند با فراهم کردن انواع مختلفی از مدل های کمی، پیش بینی ها را بهبود بخشد. هدف، ساخت یک مدل واقعی تر از ناهمگنی مخزن با استفاده از روش هایی است که خواص مهم مخزنی را میانگین نکنند. زمین آمارهمانند رویکرد قطعیِ سنتی، داده های مسلم[۲] که شناخته شده هستند و داده های تفسیری[۳] که آگاهی داده شده اند را حفظ می‌کند. اما برخلاف رویکرد قطعی، زمین آمارنتایج محتمل مختلفی فراهم می کند. میزان

[۱] reservoir charactrization

[۲] hard data

[۳] soft data

تفـاوت مـدل هـای مختلـف، بازتـابی از میـزان ناشـناختگی یـا انـدازه ی عـدم قطعیـت[1] اسـت (چامبرز و همکاران، ۲۰۰۰).

تخمـین خـواص مخـزن بـا اسـتفاده از منـابع اطلاعـاتی مختلفـی از قبیـل زمـین‌شناسـی منطقـه، اطلاعات بدسـت آمـده از چـاه‌هـای حفـر شـده در میـدان و داده‌هـای لـرزه‌نگـاری انجـام مـی‌شـود. روش‌هـای بسـیاری جهـت تخمـین خـواص مخـزن بااسـتفاده از ایـن اطلاعـات وجـود دارد. یکـی از پرکـاربردترین روش‌هـای تخمـین خـواص مخـزن، وارون‌سـازی لـرزه‌ای[2] اسـت. وارون‌سـازی لـرزه ای چندین دهه است کـه جهـت مقاصـد اکتشـافی و تولیـدی در صـنعت نفـت بـه کـار گرفتـه مـی شود.

روش‌هـای مرسـوم وارون‌سـازی لـرزه‌ای روش‌هـای قطعـی[3] نامیـده مـی‌شـوند و براسـاس مینـیمم سازی خطای بـین هـم‌آمیخـت پیشـرو[4]ی ضـرایب بازتـابیِ یـک پروفایـل مقاومـت صـوتیِ تخمـین زده شـده و دامنـه‌ی لـرزه‌ای در محـل هـر رد لـرزه‌ای مـی‌باشـند. روش‌هـای مرسـوم وارون‌سـازی دارای قدرت تفکیک عمـودی[5] مناسـب بـرای تولیـد مـدل جزیـی خـواص مخـزن نبـوده و قـادر بـه تخمین خواص مربوط به لایه‌های مخزنی کم ضخامت نمی‌باشند.

وارون‌سازیِ زمین‌آماری که وارون‌سازی تصادفی[6] نیـز نامیـده مـی‌شـود روشـی اسـت کـه مـی‌توانـد تفکیک عمودی مناسـب جهـت تولیـد مـدل‌هـای خـواص مخـزن را مهیـا نمایـد. وارون‌سـازی لـرزه ای زمـین آمـاری چـارچوب یکتـایی را فـراهم مـی‌آورد کـه در آن مزیـت‌هـای لـرزه نگـاری و نگارهای چاه قابل ترکیب بـا هـم مـی‌باشـد. مـدل مقاومـت صـوتی بـه دسـت آمـده از وارون سـازی زمین‌آمـاری، تفکیـک ناحیـه‌ای (افقـی) خـود را از داده‌هـای لـرزه‌ای و تفکیـک عمـودی خـود را از داده‌های نگارِ به کار گرفته شـده در فرآینـد وارون‌سـازی، بـه دسـت مـی‌آورد. مـدل سـه بعـدی بـه دست آمـده دارای قـدرت تفکیـک بـالا (در هـر دو جهـت عمـودی و افقـی) بـوده و بـرای اسـتفاده در ساخت مدل‌های جزیی خواص مخازن نازک لایه مناسب است (رابینسون، ۲۰۰۱).

---

[1] uncertainty
[2] seismic inversion
[3] deterministic
[4] forward convolution
[5] vertical resolution
[6] stochastic inversion

روش وارون‌سازی زمین‌آماری اولین بار توسط بورتولی[1] و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد. ایده ی اصلی این روش، تولید تعدادی مدل‌های مقطع عرضی (۱۰ تا ۱۰۰ عدد) با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری و سپس انجام مدلسازی پیشرو بر روی هر مقطع عرضی می‌باشد. اختلاف بین ردهای مصنوعی به دست‌آمده و داده‌های لرزه‌ای واقعی برای هر تحقق[2] محاسبه می‌شود. سپس مقطع عرضیِ شبیه‌سازی شده‌ای که ردهای مصنوعی موجود در آن بیشترین مطابقت با داده‌های لرزه‌ای را دارد انتخاب می‌شود. مدل های مقاطع عرضی چندگانه یکی بعد از دیگری شبیه‌سازی شده و مدل سه بعدی مقاومت صوتی نهایی ساخته می‌شود. هرمقطع عرضی به صورت شرطی شده با تمامی اطلاعات چاه و مقطع عرضی شبیه سازی شده‌ی قبلی، شبیه‌سازی می‌گردد. هاس و دوبرول[3] (۱۹۹۴) رویکرد اصلی را با کاربرد ستون یک بعدیِ مقاومت صوتی در هر مرحله، گسترش دادند که موجب سریع‌تر شدن همگرایی الگوریتم می‌گردد. این روش شامل بهینه‌سازی رد به رد[4]، در ترکیب با نمونه برداری دنباله‌ای زمین آماری براساس واریوگرام‌های افقی و عمودی است. واریوگرام همبستگی فضایی مقاومت صوتی را به صورت آماری کمّی می‌نماید. ردها در یک مسیر تصادفی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در هر محل تعدادی از نگارهای قائم مقاومت صوتیِ محتمل، با استفاده از شبیه‌سازی دنباله‌ای گوسی شبیه‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی با مقاومت‌های صوتی موجود در مکان چاه و واریوگرام‌های افقی و عمودی، مقید می‌شود. ردهای لرزه‌ای مصنوعی، برای هر یک از نگارهای امپدانس شبیه‌سازی شده با استفاده از یک مدل هم آمیخت ۱ بعدی ساخته می‌شوند و با داده‌های لرزه‌ای واقعی مقایسه می‌گردند. نگار شبیه‌سازی شده‌ای که بهترین مطابقت با داده‌های لرزی را نشان می‌دهد، نگه داشته شده و به عنوان یک قید برای شبیه سازی نگارهای عمودی در محل تصادفی بعدی استفاده می‌شود. اطلاعات لرزه‌ای، وارون‌سازی را در پهنای باند لرزه‌ای مقید می‌کنند و فرکانس‌های فضایی بالاتر با واریوگرام‌های به دست آمده از نگارهای چاه و داده‌های چاه‌ها مقید می‌گردند (لامی و همکاران، ۱۹۹۹).

---

[1] Bortoli
[2] realizaion
[3] Haas and Dubrule
[4] trace by trace

دبی[۱] و همکاران (۱۹۹۶) روش دیگری برای وارون‌سازی زمین‌آماری ارائه دادند که معادل با روش هاس و دوبرول (۱۹۹۴) است با این تفاوت که با اضافه کردنِ شبیه‌ساز آنیلینگ در مرحله‌ی پایانی وارون سازی، بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. کارِ انجام شده توسط سامس[۲] و همکاران (۱۹۹۹)، کاربرد عملی از روش دبی را در تولید تحقق‌های سه بعدی چندگانه لیتولوژی و تخلخلِ مطابق با زمین‌شناسی، پتروفیزیک و داده‌های لرزه‌ای در مخزن حوزه سوماترای مرکزی را نشان می‌دهد.کین[۳] و همکاران (۱۹۹۹) روش زمین آماری مشابهی، به اضافه یک روش مونت کارلو ساده‌ی سریع و مؤثر را در تولید جواب‌ها ارائه داد.

یکی از نرم‌افزارهای اصلی وارون‌سازی زمین‌آماری نرم‌افزار جیسون[۴] می‌باشد. این نرم‌افزار روش جدیدی را در عملیات وارن‌سازی زمین‌آماری ارائه داده‌است. در روش به کار گرفته-شده در این نرم‌افزار مدلسازی آماری هر یک از منابع اطلاعاتی ورودی (مانند: چاه‌ها، مغزه ها و داده‌های لرزه‌ای) به صورت یک تابع چگالی احتمالِ توصیف شده با عبارت زمین آماری (هیستوگرام‌ها و واریوگرام‌ها) نمایش داده می‌شوند. استنتاج بیزی برای ادغام توابع چگالی احتمال مربوط به هر یک از منابع اطلاعاتی ورودی، با همدیگر و به دست آوردن یک تابع چگالی احتمال پسینِ شرطی شده بر تمام اطلاعات شناخته شده و استنتاج شده به کار برده می‌شود. یک الگوریتم مونت کارلو زنجیره مارکوفی[۵] برای به دست آوردن نمونه‌های مناسب از نظر آماری از تابع چگالی احتمال پسین به کار گرفته می‌شود. مراحل وارون‌سازی زمین آماری تا زمانی که مدلی یافت شود که در تمامی اطلاعات از زمین شناسی تا نگاره های چاه، لرزه‌نگاری صدق کند، ادامه می‌یابد (فوگرو- جیسون، ۲۰۰۹).

در فصل دوم مباحث تئوری مربوط به زمین‌آمار شرح داده می‌شود. این مباحث شامل مبانی علم زمین‌آمار می‌باشند. ابتدا تاریخچه‌ای مختصر از علم زمین‌آمار و پیش زمینه‌ای از مفاهیم آمار کلاسیک از قبیل تابع توزیع فراوانی، توزیع نرمال و تابع چگالی احتمال ارائه

---

[۱] Debeye
[۲] Sams
[۳] Kane
[۴] Jason
[۵] Markov Chain Monte Carlo

می‌گردد. سپس مباحث مربوط به همبستگی فضایی، تهیه و مدلسازی واریوگرام، روش‌های تخمین زمین‌آماری از قبیل کریجینگ و شبیه‌سازی زمین‌آماری معرفی می‌گردند.

در فصل سوم به توضیح و شرح مبانی وارون‌سازی قطعی و زمین‌آماری پرداخته می‌شود. در این بخش تاریخچه‌ای از وارون سازی لرزه‌ای ارئه شده و مبانی وارون‌سازی لرزه‌ای شرح داده می‌شود. پس از توضیح مبانی وارون‌سازی لرزه‌ای، تئوری مربوط به وارون‌سازی خارهای پراکنده‌ی مقید و پارامترهای آن مورد بحث قرار داده می‌شود، روش‌های وارون-سازی زمین‌آماری و تئوری مربوط به آنها مطرح شده و در نهایت ویژگی‌های اصلی وارون-سازی زمین‌آماری معرفی می‌گردند.

در فصل چهارم کاربرد وارون‌سازی زمین‌آماری بر روی داده‌های یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد و مراحل عملیات وارون‌سازی شرح داده می‌شوند.

در فصل پنجم نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات حاصل از این تحقیق ارائه می‌گردند.

فصل دوم

زمین‌آمار

۲-۱ مقدمه ای بر زمین آمار

در بررسی های آمار کلاسیک[۱]، اجزا یا نمونه هایی که از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می شوند فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا بوده و در نتیجه مقدار اندازه گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچگونه اطلاعاتی درمورد مقدار همان کمیت در نمونه دیگری به فاصله معین و معلوم در بر نخواهد داشت. به عبارت دیگر نتایج به دست آمده از اندازه گیری نمونه ها مستقل از موقعیت فضایی آنها مورد تحلیل قرار می گیرد. بنابراین مقدار یک کمیت در یک نمونه، هیچگونه اطلاعاتی درباره مقدار آن کمیت در نمونه‌های دیگر به فواصل مختلف به دست نمی‌دهد. درحالیکه در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت فضایی نمونه نیز مورد توجه قرار می گیرد. بدین لحاظ می توان موقعیت فضایی نمونه ها را همراه با مقدار کمیت مورد نظر به صورت یکجا مورد تحلیل قرار داد. به عبارت دیگر باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیت در جامعه نمونه ها و فاصله و جهت قرار گیری نمونه ها نسبت به هم ارتباطی برقرار کرد. این ارتباط فضایی (فاصله ای و جهتی) بین مقدار یک کمیت در جامعه نمونه های برداشت شده ممکن است در قالب های ریاضی قابل بیان باشد. به این قالب های ریاضی ساختار فضایی[۲] گفته می شود (حسنی پاک، ۲۰۰۷).

۲-۲ مفاهیم اولیه‌ی آمار کلاسیک

قبل از بحث راجع به تکنیک های زمین آمار، پیش زمینه ای از رویکرد آمار کلاسیک ارائه می گردد.

آنالیز آماری کلاسیک شامل دسته بندی اطلاعات، محاسبه میانگین و واریانس، ساخت نمودارپراکندگی به منظور بررسی رابطه ی بین دو متغیر وشناسایی زیر جمعیت ها وداده های پرت می باشد. هیستوگرام، نمایش گرافیکی از نحوه ی توزیع داده هایِ یک متغیر است که چگونگی قرار گرفتن مقادیر در یک بازه یا دسته ی خاص را ثبت می کند. یک ستون، هر دسته را به نمایش می کشد و ارتفاع آن متناسب است با تعداد مقادیری که در

[۱] classical statistic
[۲] spatial structure

آن دسته قرار می گیرند. شکل هیستوگرام ما را از توزیع مقادیر داده ها آگاه می‌کند. در حالت ایده آل تمایل به مشاهده ی شکل زنگوله ای و توزیع متقارن در اطراف مقدار میانگین است که به این حالت توزیع نرمال یا گوسی اتلاق میشود و بر اساس میانگین و واریانس قابل پیش بینی است. روشهای زیادی در آمار و زمین آمار چنین مدلی را برای توزیع داده ها فرض می‌کنند. اگر شکل توزیع به یک سمت از میانگین کشیدگی داشته باشد اغلب اوقات ضروری است که با استفاده از انتقال گوسی به شکل نرمال درآورده شود. هیستوگرام های پیچیده ممکن است ترکیبی از توزیع های چندگانه باشند، دسته بندی داده ها (مانند دسته بندی داده های مربوط به هر رخساره) می تواند توزیع های زیر لایه را مشخص کند.

۲-۲-۱ متغیر تصادفی

در آمار و احتمال متغیر تصادفی متغیری است که مقدار آن از اندازه گیری برخی از انواع فرآیندهای تصادفی بدست می آید. بطور دقیق تر، متغیر تصادفی تابعی است ازفضای نمونه ای به اعداد حقیقی. به عبارت دیگر متغیر تصادفی توصیف عددی خروجی یک آزمایش است (مثل برآمدهای ممکن از پرتاب دو تاس (۱و۱) و (۱و۲) و غیره). متغیرهای تصادفی به دو نوع گسسته (متغیر تصادفی که ممکن است تعداد محدود یا توالی نامحدودی از مقادیر را بگیرد) یا پیوسته (متغیری که ممکن است هر مقدار عددی در یک یا چند بازه را بگیرد) طبقه بندی میشوند. یک متغیر تصادفی می تواند بعنوان یک کمیت که مقدارش ثابت نیست و مقادیر مختلفی را می‌تواند بگیرد در نظر گرفته شود و توزیع احتمال برای توصیف احتمال اتفاق افتادن آن مقادیر استفاده می‌شود.

۲-۲-۲ تابع توزیع احتمال

در نظریه احتمال و آمار، تابع توزیع احتمال بیانگر احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی (در مورد متغیر گسسته) و یا احتمال قرار گرفتن متغیر در یک بازه مشخص (در مورد متغیر تصادفی پیوسته) میباشد.