مقاله

حذف چندگانه‌ها در داده‌های لرزه‌ای دریائی به روش SRME به منظور رفع ابهام در تفسیر ساختارهای زمین شناسی

علیرضا قم‌چی
رئیس واحد ژئوفیزیک‌مهندسی

چکیده

بازتاب‌های چندگانه (Multiples) همواره یکی از چالش‌های اساسی در پردازش داده‌های لرزه‌ای دریایی بوده‌اند. این بازتاب‌ها که ناشی از انعکاس‌های مکرر بین سطح آزاد (مانند آب - هوا) و لایه‌های زیرسطحی‌اند، موجب ایجاد اعوجاج، بازتاب‌های کاذب و کاهش کیفیت تصویر زیرسطحی می‌شوند. از میان روش‌های مختلف حذف چندگانه‌ها، حذف چندگانه‌های وابسته به سطح یا SRME (Surface Related Multiple Elimination) جایگاه ویژه‌ای دارد، زیرا بدون نیاز به مدل سرعت و تنها بر اساس داده‌های ثبت شده، قادر است چندگانه‌های سطحی را شناسایی و حذف نماید.

در این مقاله، ابتدا به معرفی اهمیت موضوع و تاریخچه تلاش‌ها برای حذف چندگانه‌ها پرداخته می‌شود. سپس انواع چندگانه‌ها، مبانی نظری و ریاضی SRME، شبیه‌سازی عددی، مقایسه با روش‌های دیگر، کاربردهای صنعتی، توسعه ای نوین، مزایا و محدودیت‌ها، و چشم‌انداز آینده این روش به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مقدمه

کیفیت داده ای لرزه‌ای دریایی به‌طور مستقیم با موفقیت در اکتشاف منابع هیدروکربنی، مطالعات زمین‌ساختی و مدل‌سازی سرعت در ارتباط است. در دهه‌های اخیر، هزینه‌های اکتشاف و توسعه میادین نفت و گاز به شدت افزایش یافته است و کوچک‌ترین خطا در تفسیر داده‌ها می‌تواند به زیان‌های میلیون دلاری منجر شود. (Dragoset, ۲۰۱۶) یکی از مهم‌ترین عوامل افت کیفیت داده‌های لرزه‌ای، حضور بازتاب‌های چندگانه است. چندگانه‌ها برخلاف نویزهای تصادفی، ساختاری منسجم دارند و از نظر زمان و مکان با بازتاب‌های اولیه همپوشانی دارند. این موضوع حذف آن‌ها را بسیار دشوار می‌کند. در گذشته، روش‌های ساده‌ای مانند فیلتر f-k یا دیکانولوشن پیش‌بین مورد استفاده قرار می‌گرفتند(Peacock & Treitel, ۱۹۶۹). این روش‌ها تنها در داده‌های دوبعدی و ساده کارایی داشتند و در محیط‌های پیچیده ناکارآمد بودند.

با معرفی روش SRME توسط Verschuur و همکاران در اوایل دهه ۱۹۹۰، تحولی بزرگ در پردازش داده‌های لرزه‌ای رخ داد. (Verschuur et al,۱۹۹۲) این روش با تکیه بر داده‌های ثبت شده و بدون نیاز به مدل سرعت، توانست

چندگانه‌های سطحی را با دقت مناسبی حذف کند. امروزه SRME و نسخه سه‌بعدی آن به استاندارد صنعتی در پردازش داده‌های دریایی تبدیل شده‌اند.
(Abma & Kabir ;۲۰۰۶, Berkhout & Verschuur ۱۹۹۷)

تاریخچه حذف چندگانه‌ها

اولین تلاش‌ها برای حذف چندگانه ا به استفاده از فیلترهای حوزه زمان و فرکانس بازمی‌گردد. روش‌هایی مانند فیلتر f-k توانستند برخی چندگانه‌ها را بر اساس تفاوت سرعت گروهی آن‌ها از بازتاب ی اولیه جدا کنند.

همچنین دیکانولوشن پیش‌بین[1] معرفی شد که بر پایه پیش‌بینی رخدادهای تناوبی در داده‌ها عمل می‌کرد. (Peacock & Treitel, ۱۹۶۹)

با رشد توان محاسباتی، پژوهشگران به استفاده از روش‌های مبتنی بر مهاجرت و مدل‌سازی گرایش یافتند. کتاب Seismic Migration نوشته Berkhout (۱۹۸۲) از منابع کلیدی این دوره است که مفاهیم مهاجرت و بازتاب چندگانه‌ها را به‌طور نظری بررسی کرد.

نقطه عطف اصلی معرفی مقاله Verschuur, Berkhout & Wapenaar (۱۹۹۲) بود که ایده حذف چندگانه‌ها از طریق کانولوشن داده‌های لرزه‌ای با خودشان را مطرح کرد. این ایده بدون نیاز به مدل سرعت و تنها بر اساس داده خام عمل می‌کرد و در عمل کارایی بسیار بالایی داشت.

با رشد فناوری ثبت داده‌های سه‌بعدی، نیاز به توسعه نسخه‌های سه‌بعدی SRME احساس شد. پژوهشگرانی مانند Abma & Kabir (۲۰۰۶) و Liu et al. (۲۰۱۱) نشان دادند که SRME سه‌بعدی می‌تواند در محیط‌های پیچیده مانند ساختارهای نمکی نیز نتایج قابل قبولی ارائه دهد.

امروزه تمرکز پژوهش‌ها بر روی کاهش هزینه محاسباتی، استفاده از محاسبات GPU، و ترکیب SRME با روش‌های یادگیری ماشین است. پژوهش‌های اخیر مانند Zhang et al (۲۰۲۰) و Hu et al(۲۰۲۲) نشان داده‌اند که استفاده از شبکه‌های عصبی می‌تواند کیفیت پیش‌بینی چندگانه ا را بهبود دهد.

انواع چندگانه‌ها

چندگانه‌های سطحی

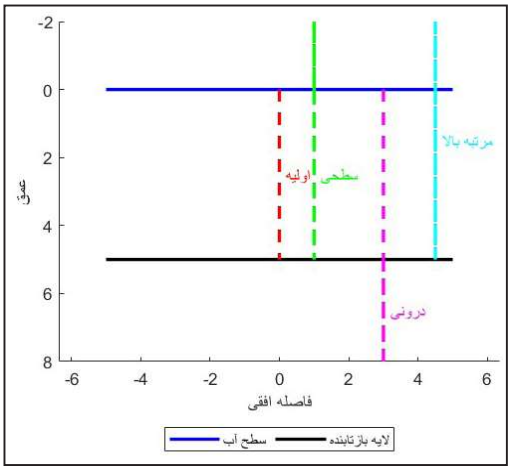
این دسته بیشترین اهمیت را دارند و در محیط‌های دریایی معمولاً از بازتاب‌های مکرر بین سطح آب - هوا و لایه‌های بازتابنده زیرسطحی ناشی می‌شوند. انرژی آن‌ها معمولاً زیاد است و به‌سختی از بازتاب ی اولیه قابل تفکیک‌اند.(Dragoset, ۲۰۱۶)

چندگانه‌های درونی

این نوع در داخل زمین و بین لایه‌های قوی مانند نمک یا رس ایجاد می‌شود. اگرچه انرژی آن‌ها کمتر از چندگانه‌های سطحی است، اما در برخی محیط‌ها می‌توانند مشکلات جدی ایجاد کنند. (Ikelle & Amundsen, ۲۰۰۵)

چندگانه‌های مرتبه بالا

چندگانه‌هایی که بیش از دو یا سه بار بازتاب پیدا می‌کنند. حذف این دسته دشوارتر است و SRME معمولاً در پیش‌بینی دقیق آن‌ها با محدودیت روبه‌روست.



شکل ۱- شبیه‌سازی انواع چندگانه

مبانی نظری و ریاضی روش SRME

ایده اصلی

ایده SRME بر پایه این فرض است که بازتاب‌های

1-Predictive Deconvolution

چندگانه سطحی را می‌توان با کانولوشن داده ای لرزه‌ای با خودشان بازسازی کرد. این ایده به شکل ساده به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M(t,x) = \iint D(t',x') * D(t - t', x - x')\, dt'\, dx$$

که در آن M چندگانه پیش‌بینی‌شده و D داده اصلی است.(Verschuur et al,۱۹۹۲)

مراحل اجرای SRME

- پیش‌بینی چندگانه‌ها از داده خام با استفاده از کانولوشن دوبعدی یا سه‌بعدی.
- مقیاس‌گذاری و هم‌فازسازی تطبیقی با داده اصلی به کمک فیلترهای تطبیق .(Adaptive filters)
- کاهش چندگانه‌ها از داده ثبت‌شده.
- نسخه‌های بهبود یافته
- الگوریتم‌های تکراری (iterative inversion) برای پیش‌بینی دقیق‌تر.
- نسخه سه‌بعدی: توسعه داده‌ها برای محیط‌های پیچیده.

روش‌های ترکیبی با سری معکوس پراکندگی:(ISS) برای حذف چندگانه‌های درونی.(Weglein et al, ۱۹۹۷)

شبیه‌سازی عددی

هدف شبیه‌سازی

برای درک بهتر عملکرد روش SRME، می‌توان داده‌های لرزه‌ای مصنوعی ایجاد کرد و چندگانه‌ها را به صورت عددی شبیه‌سازی نمود. این کار نشان می‌دهد که چگونه بازتاب‌های اولیه و چندگانه در داده‌ها ظاهر می‌شوند و چگونه SRME قادر است آن‌ها را پیش‌بینی و حذف کند.

شکل ذیل یک موجک ریکر[2] را با سری بازتابنده مصنوعی کانولوشن می‌کند تا داده شامل بازتاب اولیه و چندگانه تولید شود.

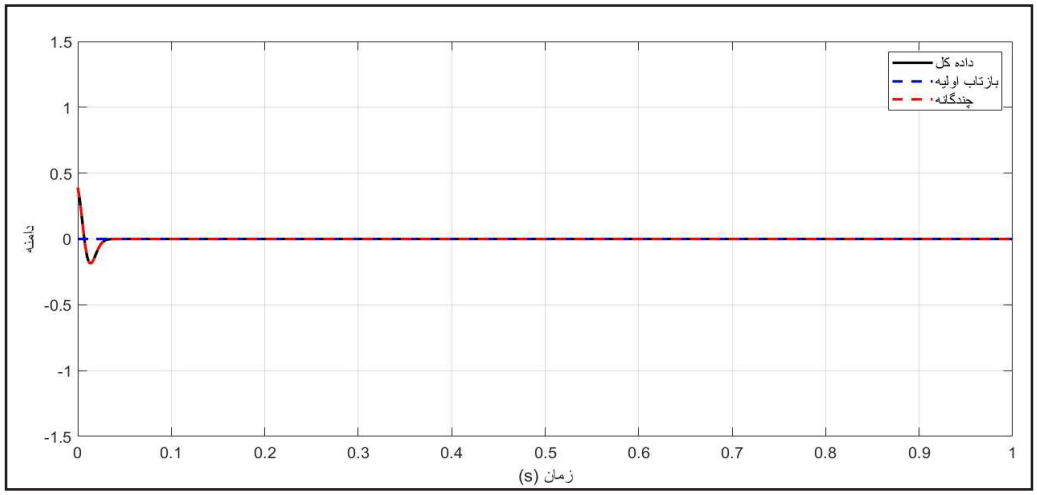
اهمیت شبیه‌سازی

با چنین شبیه‌سازی‌هایی می‌توان عملکرد الگوریتم‌های حذف چندگانه از جمله (SRME) را قبل از پیاده‌سازی روی داده‌های واقعی ارزیابی نمود. در مطالعات اخیر، حتی از شبیه‌سازی‌های پیچیده سه‌بعدی برای آموزش شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی چندگانه‌ها استفاده شده است. (Hu et al, ۲۰۲۲)

مقایسه SRME با سایر روش‌ها

روش‌های کلاسیک

روش‌هایی مانند فیلتر f-k و دیکانولوشن پیش‌بین



شکل ۱- شبیه‌سازی داده لرزه‌ای مصنوعی شامل بازتاب‌های اولیه و چندگانه

2- Ricker wavelet

بیشتر در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ مورد استفاده بودند. این روش‌ها تنها قادر به حذف چندگانه‌های ساده و تناوبی بودند و در داده‌های پیچیده، کارایی خود را از دست می‌دادند. (Robinson & Treitel, ۲۰۰۰)

روش‌های مهاجرتی

با استفاده از مدل سرعت می‌توان چندگانه‌ها را شبیه‌سازی و حذف کرد. اما این روش‌ها به مدل دقیق زمین‌شناسی نیاز دارند و در صورت خطا در مدل، نتیجه نادرست خواهد بود.(Amundsen, ۲۰۰۱)

SRME

SRME بدون نیاز به مدل سرعت و تنها با داده‌های ثبت‌شده کار می‌کند. این مزیت باعث شد SRME به استاندارد صنعتی در داده‌های دریایی تبدیل شود.

مطالعات زمین‌ساختی

وجود چندگانه‌ها باعث می‌شود گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها به‌اشتباه تفسیر شوند. حذف موفقیت‌آمیز چندگانه ا با SRME موجب دقت بیشتر در مطالعات زمین‌ساختی شده است.(Zhou & Greenhalgh, ۲۰۱۴)

بهبود مدل‌سازی سرعت

چندگانه‌ها خطای زیادی در توموگرافی لرزه‌ای وارد می‌کنند. با حذف آن‌ها می‌توان مدل ی سرعت بهتری برای مهاجرت داده‌ها ساخت.(Liu et al, ۲۰۱۱)

داده‌های چهار بعدی (4D Seismic)

در پایش مخازن[3]، داده‌های ۴D به کار می‌روند. در این داده‌ها کوچک‌ترین خطا در حذف چندگانه می‌تواند

جدول ۱- مقایسه روش ای حذف چندگانه (Yilmaz, ۲۰۰۱ ; Dragoset , ۲۰۱۶)

هزینه محاسباتی	کارایی در داده‌های پیچیده	مستقل از زمین ناسی	نیاز به مدل سرعت	روش
پایین	متوسط	کم	ندارد	فیلتر f-k
پایین	ضعیف	متوسط	ندارد	دیکانولوشن پیش‌بین
بالا	خوب	متوسط	دارد	هاجرت معکوس
متوسط	بسیار خوب	بالا	ندارد	SRME

کاربردهای صنعتی SRME

اکتشاف نفت و گاز

در پروژه‌های اکتشافی، وضوح تصویر ساختارهای مخزنی اهمیت بالایی دارد. چندگانه‌ها می‌توانند بازتاب‌های کاذب ایجاد کنند که تفسیر را به خطا می‌برد. استفاده از SRME کیفیت تصویر را به‌طور چشمگیری بهبود داده است.(Wang et al, ۲۰۱۸)

تغییرات مخزن را مخفی کند .SRME ابزار مهمی در این زمینه است .(Hampson & Robinson, ۲۰۱۹)

توسعه‌های نوین SRME

نسخه سه‌بعدی (۳D-SRME)

با رشد داده‌های سه‌بعدی در صنعت نفت و گاز، نسخه‌های سه‌بعدی SRME توسعه یافتند. این نسخه‌ها

3-Reservoir Monitoring

توانایی حذف چندگانه‌ها در محیط‌های بسیار پیچیده مانند حوضه‌های نمکی را دارند (Abma & Kabir, ۲۰۰۶).

محاسبات موازی و GPU

SRME سه‌بعدی به‌طور طبیعی محاسبات سنگینی دارد. استفاده از GPU باعث کاهش قابل توجه زمان اجرا شده است (Ferber et al, ۲۰۱۳).

یادگیری ماشین

ترکیب SRME با شبکه‌های عصبی عمیق در حال توسعه است. این روش‌ها می‌توانند الگوهای پیچیده چندگانه‌ها را بهتر شناسایی کنند.

(Zhang et al., ۲۰۲۰; Hu et al, ۲۰۲۲)

روش‌های ترکیبی

ادغام SRME با روش‌های سری معکوس پراکندگی (ISS) و دیکانولوشن چندبعدی برای حذف هم‌زمان چندگانه‌های سطحی و درونی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Weglein et al., ۱۹۹۷; Ikelle & Amundsen, ۲۰۰۵).

مزایا و محدودیت‌های SRME

مزایا

- عدم نیاز به مدل سرعت.
- توانایی حذف در محیط‌های پیچیده.
- قابلیت کاربرد در داده‌های دوبعدی و سه‌بعدی.
- استاندارد صنعتی پذیرفته‌شده در داده‌های دریایی.

محدودیت‌ها

- هزینه محاسباتی بالا در داده‌های سه‌بعدی.
- حساسیت به داده‌های ناقص یا نویز شدید.
- دشواری در حذف کامل چندگانه‌های مرتبه بالا.
- نیاز به فیلتر تطبیقی مناسب برای جلوگیری از حذف بازتاب‌های اولیه.

نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

SRME طی سه دهه اخیر به یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین روش‌های حذف چندگانه در داده‌های لرزه‌ای تبدیل شده است. مزیت اصلی آن مستقل از مدل زمین‌شناسی و توانایی حذف چندگانه‌ها در محیط‌های پیچیده است.

چشم‌انداز آینده این روش را می‌توان در چند محور خلاصه کرد:

- **ترکیب با یادگیری ماشین**: برای بهبود پیش‌بینی چندگانه‌ها.
- **کاهش هزینه محاسباتی:** از طریق الگوریتم‌های موازی و سخت‌افزارهای جدید.
- **گسترش به داده‌های ۴D:** برای پایش دقیق مخازن نفت و گاز.

روش‌های ترکیبی: برای حذف هم‌زمان چندگانه‌های سطحی و درونی.

با توجه به روند پژوهش‌ها، انتظار می‌رود در دهه آینده SRME همچنان به‌عنوان استاندارد صنعتی باقی بماند اما در کنار روش‌های نوین مبتنی بر هوش مصنوعی تکامل یابد.

منابع

- Hu, H., et al. (2022). Deep-learning-based multiple prediction in marine seismic data. *Geophysical Prospecting*, 70(5), 1043–1058.
- Sun, J., et al. (2021). Hybrid SRME and machine learning. *Interpretation*, 9(3), SE1–SE13.
- Chen, H., et al. (2020). Efficient 3D SRME for deep-water surveys. *Geophysics*, 85(4), V355–V368.
- Zhang, C., et al. (2020). Machine learning-assisted SRME. *Geophysical Prospecting*, 68(7), 1894–1910.