

## پیشنهاد الگوریتمی برای مدل‌سازی و تفسیر داده‌های سائیزموالکتریک

میرستار مشین‌چی اصل<sup>۱\*</sup> و هومن لطیفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تالش، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۰/۷، دسترسی برخط: ۱۳۸۹/۱۲/۲۵)

### چکیده

به طور کلی روش سائیزموالکتریک، روشی اکتشافی براساس امواج لرزه‌ای و الکترومغناطیسی است. امواج لرزه‌ای ایجاد شده با یک چشمه لرزه‌ای در مرز جدایی دو محیط، حرکت نسبی سیال-جامد را به وجود می‌آورد که در اثر تقابل خواص کشسانی محیط با سیال اشباع‌کننده ایجاد می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر میدان الکتریکی جریان DC روی انتشار امواج ارتعاشی به روش حوزه زمانی شبه‌طیفی (pseudo spectral time domain) است که در اصطلاح کلی‌تر، تاثیر اتصال سائیزموالکتریک نامیده می‌شود. در این تحقیق از معادلات پروالاستودینامیک برای امواج ارتعاشی و معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیسی استفاده شده و میزان تاثیر اتصال سائیزموالکتریک با چگالی بار الکتریکی، قابلیت رسانایی الکتریکی، تابع قابلیت نفوذ دی‌الکتریک، گران‌روی سیال و پتانسیل زتا تعیین شد. تغییر میدان الکتریکی با جریان الکتریکی DC اعمال شده با نتایج آزمایش فیزیکی در محیط مدل‌سازی شده مقایسه شد و نتایج روشن ساخت که میدان الکتریکی DC به طور قابل توجهی روی انتشار انرژی کشسانی از راه اتصال سائیزموالکتریک در محدوده وسیعی از پهنای بسامد ارتعاشی تاثیر می‌گذارد. همچنین به کمک مولفه افقی میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی، مرز لایه‌های زیر سطح زمین مشخص شد.

واژه‌های کلیدی: میدان الکتریکی، حوزه زمانی شبه‌طیفی، محیط پروالاستیک، اتصال سائیزموالکتریک، فشار منفذ

## An algorithm for the modeling and interpretation of Seismoelectric data

Mirsattar Meshinchi.As1<sup>1\*</sup>, and Hooman Latifi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Islamic Azad University, Talesh, Iran

(Received: 07 June 2010, accepted: 28 December 2010, available online: 16 March 2011)

### Summary

Seismoelectric modeling is a prospecting method, based on seismic electromagnetism in which seismic sources are used to generate this phenomenon. When seismic waves are released within a fluid-saturated sedimentary material, a small amount of fluid-solid relative motion is induced. The seismic force causes this effect through a combination of relative gradient acceleration fluid and the pressure of seed waves. Most of the surface grain, in contact with a liquid electrolytes, are chemically bound to the surface load. The

\*Corresponding author:

m\_meshin@yahoo.com

\*نگارنده رابط:

thin layer of charged fluid around each grain is balanced with a scattered distribution of mobile ions with opposite charges. The scattered ions in this layer are free to move through the fluid so that seismic waves create an electrical current flow. This induced seismic current flow acts as a current source in Maxwell's equations, which is the base of electromagnetic wave coupling with a seismic wave. The peaks and troughs that accumulate are P-type waves. The electric field is produced inside the wave (seismic), which is vertical on the wave sinciput. This flow creates convection. In a homogeneous substance, the current flow is equal to convection so that the overall flow is zero; no magnetic or electromagnetic fields are created independently., Hence, the electric field that exists within the wave moves as a part of the reaction without spreading outside the wave. Therefore, a simple pair of electrodes can act as a geophone to measure the electric field inside the P-wave when it passes through them. The S shear wave does not separate charges in a homogeneous substance without divergence, so they cause no fluid repletion. The relative motion of fluid to solid is due to seed accelerations. The induced current flow creates magnetic fields that, in turn, produce a small electric field. Thus, for S waves in a porous and homogeneous environment, a magnetic field is produced that moves as a part of the material reaction. Effluent but electromagnetic waves are not produced independently. Supposedly, a magnetic detector (which is insusceptible to mechanical vibration) can serve as a selector geophone on shear wave action and measure the magnetic field N-S wave when the magnet passes the gauge. The effect of a direct current (DC) electric field on the propagation of seismic waves is modeled in this study by means of the pseudospectral time domain (PSTD) method, based on a set of governing equations for poroelastic media. This study focuses on the more general concept of the siesmoeletric coupling effect and the application of poroelastodynamics and Maxwell's equation to seismic and electromagnetic waves. In this project, the magnitude effects of seismoelectric coupling are found to be characterized by charge density, electric conductivity, dielectric permittivity, fluid viscosity and zeta potential. The simulated poroelastic wave propagation and electric field vary with an existing background. A physical experiment was carried out in an oilfield using a DC electric field and the results were compared with those of the simluation. Estimations for solutions of differential equations are based on the function (or a number of separate estimates for this function) defined by a certain relationship between its various derivatives on a given place or time range along the boundary conditions of this area. Overall, this is a serious problem and only a formula for this solution was analyzed. An alternate method with finite derivatives was used to replace the differential equation. The results show that the seismoelectric coupling in a wide range of the seismic frequency bands generated through a DC electric field can significantly affect the propagation of elastic energy.

**Key words:** Electric field, pseudospectral time domain, poroelastic media, seismoeletric coupling, pore pressure

را القا می کند. این پالس لرزه ای در اثر عبور از یک محیط، نبود توازن در شارش این جریان الکتریکی ایجاد می کند که نتیجه آن به صورت آشفتگی های الکترومغناطیسی در سطح زمین قابل اندازه گیری هستند. تامسون (۱۹۳۶) پیشنهاد کرد که از جفت شدگی بین موج لرزه ای و الکتریکی در حکم ابزاری اکتشافی، می توان

## ۱ مقدمه

در یک محیط متخلخل اشباع از سیال، آشفتگی های مکانیکی و الکترومغناطیسی با یکدیگر جفت می شوند. این جفت شدگی در اصل همان پدیده الکتروسینتیک است. امواج لرزه ای حرکت نسبی سیال-جامد را به وجود می آورد. این حرکت به نوبه خود جریان شارشی الکتریکی

روش Pseudospectral Time Domain برای حل مشتقات فضایی و همچنین عرضه الگوریتم مورد نظر برای مدل‌سازی و تفسیر داده‌های سائزموالکترونیک عرضه می‌شود. در نهایت به بحث در مورد پیشنهاد مدلی برای بررسی الگوریتم PSTD و کاربرد آن و تفسیر روی داده‌های حاصل از نمودارهای مربوط پرداخته شده است.

## ۲ معرفی روش سائزموالکترونیک

اثرهای سائزموالکترونیک در اصل، سیگنال‌های الکترومغناطیسی هستند که وقتی موج لرزه‌ای به مواد زمین تنش وارد می‌کند، ایجاد می‌شوند. سه مورد از این اثرها اهمیت زیادی دارند (باتلر و همکاران، ۱۹۹۶):

الف- اثرهای الکتروستاتیکی القا شده از امواج لرزه‌ای که مشابه پتانسیل‌های شارشی هستند. از این اثرها به منظور تعیین مرز لایه در زیر سطح کم عمق در سازندهای نفوذپذیر استفاده می‌شود. مزیت اصلی این روش تعیین لایه‌های نازک در زیر سطح است که به کمک روش‌های دیگر ژئوفیزیکی آشکارسازی آنها مشکل و در برخی از موارد ناممکن است. این مسئله به آن علت است که طول موج امواج الکترومغناطیسی که به منظور تعیین مرز لایه‌ها به کار می‌رود به مراتب کوچک‌تر از طول موج امواج لرزه‌ای است. همچنین از این روش می‌توان برای سرشت‌نمایی نواحی نفوذپذیر استفاده کرد.

ب- اثر پیزوالکترونیک: از این اثر برای آشکارسازی و پیدا کردن رگه‌های کوارتز و توده‌های پگماتیته شامل طلا و کانی‌های تجارتهی دیگر استفاده می‌شود.

ج- اثرهای غیرخطی: این اثرها در طی پاسخ‌های لحظه‌ای در محدوده بسامدهای رادیویی و بالای شنوایی در یک توده سولفیدی تولید می‌شوند. از این اثرها به منظور اکتشاف توده‌های سولفیدی استفاده می‌شود. تفکیک پذیری زیاد موجک لرزه‌ای و تفاوت زیاد خواص

استفاده کرد. برخی از دانشمندان همچون ایوانو (۱۹۴۰) بین سال‌های ۱۹۳۰-۱۹۴۰ اندازه‌گیری‌های صحرائی از پدیده سائزموالکترونیک را در مواد رسوبی گزارش کردند و یک سازوکار الکتروستاتیکی را برای این تبدیل پیشنهاد دادند. این سیگنال‌ها هر وقت که جبهه موج لرزه‌ای به نزدیکی حس‌گر دوقطبی متصل به زمین می‌رسد، مشاهده می‌شوند. تأخیر بین لحظه انفجار و رسیدن یک پاسخ سائزموالکترونیک به فاصله انفجار تا محل گیرنده بستگی داشته و به فاصله نقطه انفجار تا سطح مشترک و یا به هدف مورد نظر بستگی ندارد. از زمان ایوانو به بعد گزارش‌های متعدد دیگری از ثبت اثرهای سائزموالکترونیک در صحرا که به پدیده الکتروستاتیکی مربوط می‌شوند گزارش شده است. دانشمندان دیگری همچون مارتنر و اسپارکس (۱۹۵۹) پاسخ‌های سائزموالکترونیک واضحی را از سطح لایه هوازده به ثبت رساندند. همچنین اندازه‌گیری‌های درون‌چاهی پارخومونکو و گاسکارو (۱۹۷۱) نشان داد که پاسخ‌های سائزموالکترونیک در سنگ‌های آهکی قوی‌تر از پاسخ‌های مشاهده شده در خاک رس است. کپک و همکاران (۱۹۹۵) دریافت‌اند که پاسخ‌های پیزوالکترونیک از یک رگه کوارتز با پاسخ‌های دیگری که از رسوب‌های اطراف و سنگ میزبان ناشی شده همراه است. گزارش آزمایش‌های صحرائی بزرگ‌مقیاس که تامسون و گیت (۱۹۹۳) به انجام رساندند، روشن ساخت که می‌توان تبدیل‌های الکتروستاتیکی را از مرز سنگ‌های غیرقابل نفوذ و ماسه‌های اشباع از آب نفوذپذیر در اعماق ۳۰۰ متری آشکارسازی کرد. گارامبوس و دیتریچ (۲۰۰۱) میدان‌های الکترونیک گذرای تولید شده با یک تحریک لرزه‌ای را نشان دادند. در این مقاله ابتدا اکتشافات زیرسطحی به روش سائزموالکترونیک مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس به بررسی مبانی نظری این روش، نحوه اجرا و کاربرد آن پرداخته می‌شود. همچنین روش Finite-Difference Time Domain برای شبکه‌بندی محیط و

عرضه شده است. این مدل سازی براساس معادلات الکترومغناطیسی و کشسانی جفت شده، برای یک محیط متخلخل اشباع از سیال است (پراید، ۱۹۹۴). همچنین از جفت شدگی معادلات بیوت (۱۹۶۲) و ماکسول با معادلات انتقالی شار- نیرو استفاده می شود که در آن فرض بر این است که انتشار امواج کشسان در محیط با معادلات بیوت برای یک محیط متخلخل اشباع از سیال کنترل می شود. در حوزه بسامدی داریم:

$$\bar{\nabla} \bar{T} = -\omega^2 [\rho \bar{U} + \rho_f \bar{\omega}], \quad (1)$$

$$\bar{T} = [K_G \bar{\nabla} \bar{U} + C \bar{\nabla} \bar{\omega}] \underline{I} + G [\bar{\nabla} \bar{U} + \bar{\nabla} \bar{U}^T - \frac{2}{3} \bar{\nabla} \bar{U} \underline{I}]', \quad (2)$$

$$-p = C \bar{\nabla} \bar{U} + M \bar{\nabla} \bar{\omega}, \quad (3)$$

که T استرس بالک در محیط، P فشار در سیال حفره‌ای،  $\bar{U}$  جابه‌جایی قسمت جامد،  $\bar{\omega}$  حرکت نسبی سیال جامد است. علامت  $\rho$  چگالی بالک محیط و  $\rho_f$  چگالی سیال را نشان می‌دهد.  $K_G$ ، C، G، M مدول بیوت و سختی‌های محیط و I تانسور همانی است. اثرات الکترومغناطیس در محیط با معادلات ماکسول بیان می‌شود. این معادلات در مقیاس دانه‌ای و شرایط مرزی برای فازهای سیال و جامد مطرح می‌شوند، سپس از این معادلات میانگین حجمی گرفته می‌شود تا معادلات ماکروسکوپی مورد نظر به دست آید. انتگرال‌های متعدد عرضه شده در معادلات ماکروسکوپی انتقالی، نیازمند مربوط شدن میدان‌های محلی شارش سیالی و الکتریکی در فضای حفره‌ها به میدانهای ماکروسکوپی تولید کننده‌شان هستند، بنابراین، مسائل مقدار مرزی کنترل کننده میدان‌های مقیاس حفره‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند و سپس انتگرال‌های باقی مانده محاسبه می‌شوند تا ضرایب انتقالی ماکروسکوپی به دست آید. برای مواد متخلخل دو فاز (سیال و جامد)،  $K_G$

الکتروسایز میکی سنگ‌ها، دورنمایی از تعیین جزء به جزء توده‌های معدنی به دست می‌دهد.

۳ نظریه اثر الکتروسینتیک القا شده از امواج لرزه‌ای وقتی امواج لرزه‌ای در یک ماده رسوبی اشباع از سیال منتشر می‌شوند به میزان کمی حرکت نسبی سیال- جامد القا می‌شود. نیروی ایجاد کننده این جریان نسبی، ترکیبی از گرادیان‌های فشار سیالی و شتاب‌های دانه‌ای ایجاد شده از این موج است. اغلب روی سطوح دانه‌ای که در تماس با یک سیال الکترولیتی هستند، بارهای سطحی مقید شیمیایی جمع می‌شوند که با یک توزیع پراکنده از یون‌های متحرک با بارهای مخالف در یک لایه سیالی نازک در اطراف هر دانه، به حالت تعادل در می‌آیند. یون‌های مخالف در این لایه پراکنده آزادند تا اگر سیال حرکت کرد، حرکت کنند و به این ترتیب امواج لرزه‌ای جریان‌های الکتریکی شارشی را تولید می‌کنند که به صورت یک چشمه در معادلات ماکسول عمل می‌کند و اساس ترکیب موج الکترومغناطیسی با موج لرزه‌ای است (پراید و هارتسن، ۱۹۹۶). امواج لرزه‌ای حاصل از یک فعل و انفعال مکانیکی در اثر عبور از محیط الکتروشیمیایی، جریانی متغیر با زمان را ایجاد می‌کنند که نتیجه آن جدایش بار الکتریکی منطقه‌ای در دو طرف سطح مشترک است. همان‌طور که اشاره شد، جدایش بار فقط زمانی ایجاد می‌شود که این موج لرزه‌ای از سطح مشترک عبور کند و به منزله منبع مستقل امواج الکترومغناطیس منتشر شونده، عمل کند (هارتسن و پراید، ۱۹۹۷).

۴ معادلات حاکم بر پدیده سائزموالکتریک برای انتشار موج سائزموالکتریک در محیط متخلخل لایه لایه و اشباع از سیال یک تکنیک مدل سازی جبهه موج

$$K_G = \frac{k_{fr} + \phi k_f + (1 + \phi)k_s D}{1 + D}, \quad (4)$$

$$C = \frac{k_f + k_s F}{1 + D}, \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{\phi} \frac{k_f}{1 + D}, \quad (6)$$

که در این معادلات  $D$  عبارت است از:

$$D = \frac{k_f}{\phi k_s^2} [(1 - \phi)k_s - k_{fr}], \quad (7)$$

که در آن  $\phi$ ، تخلخل و  $G$ ، مدول برشی چارچوب دانه‌ها است که می‌تواند هم به صورت تجربی و هم از مدل‌های نظری برآوردی برای حفره خاص یا هندسه خاص دانه‌ای تعیین شود. به منظور راحتی بیشتر، با سختی  $H$  به جای مدول گاسمن که به صورت زیر تعریف می‌شود کار می‌کنیم.

$$H = K_G + 4G/3, \quad (8)$$

۵ بررسی معادلات ماکسول برای تحقیق در میدان الکترومغناطیسی در شرایط ایستایی (استاتیک) و محاسبه میدان الکتریکی موج بازتاب شده با توجه به اینکه بسامد امواج الکترومغناطیسی ناشی از لرزه که کمتر از ۱۰۰ هرتز است، می‌توان شرایط را ایستا در نظر گرفت و در نتیجه معادلات ماکسول به صورت زیر در خواهد آمد:

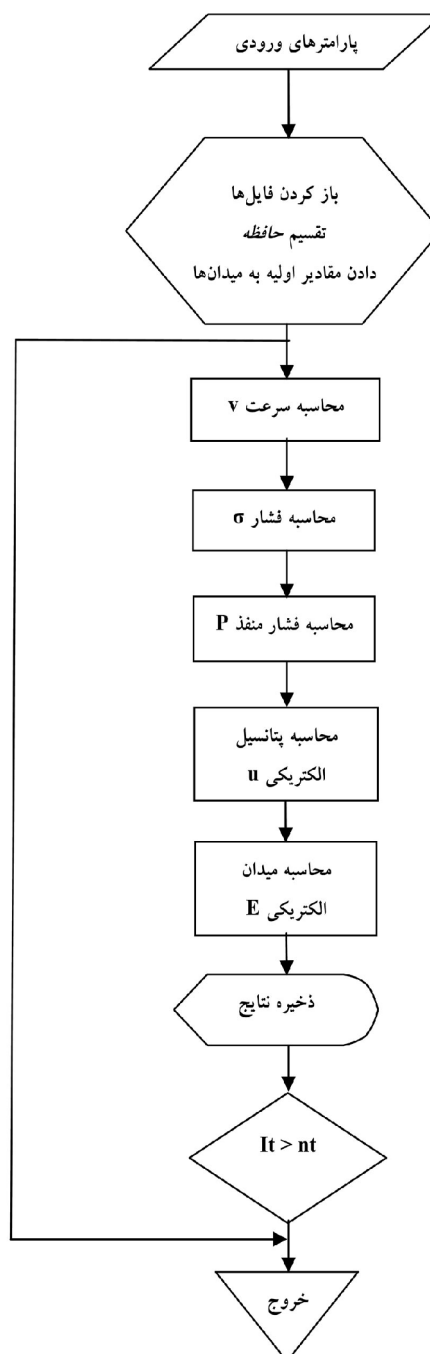
$$\nabla \times E = 0, \quad (9)$$

$$\nabla \times H = j, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0, \quad (11)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon E) = \rho_e, \quad (12)$$

(مدول بالک گاسمن)،  $C$  و  $M$  را می‌توان به مدول‌های بالک فازهای جامد و سیال  $(K_s, K_f)$  و مدول بالک چارچوب دانه‌ها  $(K_{fr})$ ، به صورت روابط زیر بیان کرد.



شکل ۱. الگوریتم پیشنهاد شده برای مدل‌سازی و تفسیر داده‌های سائزموالکترونیک

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \\ - (1 - C') \frac{\partial P}{\partial x} + \rho_e E_x + S_x \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} \\ - (1 - C') \frac{\partial P}{\partial y} + \rho_e E_y + S_y \end{array} \right. , \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \end{array} \right. , \quad (16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -D \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right), \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial y} \right) = \frac{\varepsilon \zeta}{\eta} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{\partial j_{0x}}{\partial x} + \frac{\partial j_{0y}}{\partial y} \right), \quad (18)$$

#### ۴-۵ حل PSTD برای میدان‌های پرو الاستیک

برای حل عددی مناسب معادلات فوق از روش تفاضل متناهی (Finite-difference) استفاده می‌کنیم. برای استفاده از این روش ابتدا نیاز داریم که فضای مدل خود را به سلول‌های محدودی که هر سلول در نقطه  $(i, j)$  و به ابعاد  $\Delta x$  و  $\Delta y$  واقع است، تقسیم کنیم. همه اجزای میدان ویژگی‌های محیط در مرکز هر سلول محاسبه می‌شود و از همه سلول‌های حاصل میانگین‌گیری می‌کنیم. مشتقات فضایی معادلات ذکر شده را می‌توان با روش PSTD محاسبه کرد که با اعمال این روش معادلات (۱۵)، (۱۶)،

#### ۱-۵ سازوکار جفت‌شدگی سائزموالکتریک

به دلیل خاصیت جفت‌شدگی یک جریانی ناشی از جفت شدن میدان کشسانی در فضاها متخلخل به وجود می‌آید و در نتیجه چگالی جریان الکتریکی کل از حاصل جمع چگالی ناشی از میدان الکتریکی و چگالی ناشی از جفت شدن میدان کشسانی حاصل شود:

$$j = \sigma E + j_s, \quad (13)$$

#### ۲-۵ بررسی سائزموالکتریک در حضور میدان الکتریکی خارجی

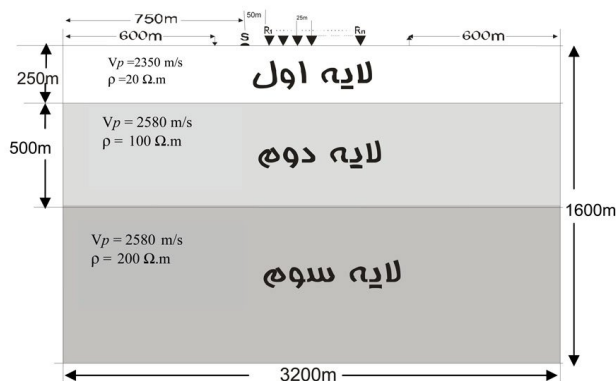
در حالت عادی، تشخیص سیگنال بسیار ضعیف اثر سائزموالکتریک از سیگنال‌های الکترواستاتیکی بسیار دشوار است. این مشکل فنی، کاربرد سائزموالکتریک را برای اهداف آزمایشی به تاخیر می‌اندازد. لذا یک راه حل برای غلبه بر این مانع فنی، افزایش میدان الکتریکی زمینه از راه تزریق یک جریان مستقیم برای ایجاد یک میدان الکتریکی زمینه موقتی است. اگر یک میدان الکتریکی خارجی اعمال شود، چگالی جریان نهایی که در رابطه (۴-۲۲) بدان اشاره شده، با یک  $J_0$  که مربوط به چگالی چشمه جریان خارجی است، جمع می‌شود.

$$j = \sigma E + j_s + j_0, \quad (14)$$

که در این حالت E شامل چشمه جریان خارجی نیز است.

#### ۳-۵ الگوریتم عددی

حال برای اینکه روابط محاسبه شده در قسمت قبل را بتوانیم مجدداً بازنویسی کنیم و مبنای کدنویسی قرار دهیم، از این الگوریتم عددی استفاده خواهیم کرد. به کمک این الگوریتم همه روابط قبلی به صورت زیر بازنویسی خواهد شد.



شکل ۲. مدل لایه‌ای برای مدل‌سازی انتشار موج ارتعاشی تحت تاثیر جریان الکتریکی DC.

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{xx}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) &= \sigma_{xx}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \\ &+ \Delta t [(\lambda + 2\mu) \bar{D}_x (v_x^{(n)}(i, j)) \\ &+ \lambda \bar{D}_y (v_y^{(n)}(i, j))] \end{aligned} \right. \quad (17), (18) \text{ به صورت روابط زیر تغییر می‌کنند:}$$

سرعت حاصل عبارت است از:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{yy}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) &= \sigma_{yy}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \\ &+ \Delta t [(\lambda + 2\mu) \bar{D}_y (v_y^{(n)}(i, j)), \\ &+ \lambda \bar{D}_x (v_x^{(n)}(i, j))] \end{aligned} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} v_x^{(n+1)}(i, j) &= v_x^{(n)}(i, j) \\ &+ \frac{\Delta t}{\rho} [\bar{D}_x \left( \sigma_{xx}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right) \\ &+ \bar{D}_y \left( \sigma_{xy}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right) \\ &- (1 - C') \bar{D}_x \left( P^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right) \\ &+ \rho_e E_x^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) + S_x(i, j)] \end{aligned} \right.$$

فشار منفذ عبارت است از:

$$\left\{ \begin{aligned} P^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) &= P^{(n-\frac{1}{2})}(i, j) \\ &- \Delta t D [\bar{D}_y (v_x^{(n)}(i, j)) \\ &+ \bar{D}_x (v_y^{(n)}(i, j))] \end{aligned} \right. \quad (21)$$

در روابط فوق هر مرحله محدوده زمانی  $\Delta t$  و در  $\Delta t$  آمین بازه زمانی محاسبه شده و همچنین  $D_x$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial W(i, j)}{\partial x} &= \bar{D}_x (W(i, j)) \\ &= F_x^{-1} (ik_x F_x (W(i)))_j \end{aligned} \right. \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{aligned} v_y^{(n+1)}(i, j) &= v_y^{(n)}(i, j) \\ &+ \frac{\Delta t}{\rho} [\bar{D}_x \left( \sigma_{xy}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right) \\ &+ \bar{D}_y \left( \sigma_{yy}^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right) \\ &- (1 - C') \bar{D}_y \left( P^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right), \\ &+ \rho_e E_y^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) + S_y(i, j)] \end{aligned} \right. \quad (19)$$

تنش حاصل عبارت است از:

۶ مدل سازی برای الگوریتم عرضه شده و پردازش و تفسیر داده های به دست آمده

با کاربرد الگوریتم به دست آمده، می توان انتشار موج الاستیک در محیط پروالاستیک تحت تاثیر میدان الکتریکی DC را شبیه سازی کرد. در اینجا از یک مدل سه لایه (جدول ۱) برای مدل سازی انتشار موج ارتعاشی تحت تاثیر جریان الکتریکی DC استفاده می شود.

جدول ۱. پارامترهای به کاررفته در مدل سازی،  $V_p$  سرعت موج p در هر لایه،  $\rho$  مقاومت ویژه در هر لایه، Z عمق هر لایه

مشخصات لایه	$V_p(m/s)$	$(\Omega.m) \rho$	Z(m)
لایه اول	۲۳۵۰	۲۰	۲۵۰
لایه دوم	۲۵۸۰	۱۰۰	۵۰۰
لایه سوم	۲۵۸۰	۲۰۰	۸۵۰

مدل فوق،  $3/2$  کیلومتر پهنا و  $1/6$  کیلومتر عمق دارد. فاصله الکترودها در مدل مورد نظر برابر با ۲۰۰۰ متر است. منبع به کاررفته از نوع کشسان است و گیرنده بین دو الکتروده قرار می گیرد. این منبع به کاررفته از الکتروده مثبت فاصله دارد. بسامد سیگنال منبع کشسان موج ضربه ای ۱۰ هرتز است. ۶۰ گیرنده در سمت راست منبع با فاصله فضایی ۲۵ متر قرار داده شده اند. فاصله زمانی یک هزارم ثانیه با ۱۵۰۰۰ مرحله زمان کلی است. جریان DC از الکتروده ۲ به مدل از صفر تا ۲۵ آمپر در ۱۰۰ مرحله زمانی تزریق می شود. منبع با فشار همسانگرد (ایزوتروپ) ۱۰۰۰ پاسکال در ۵۰ متری الکتروده مثبت در  $0.2$  ثانیه منفجر می شود.

حال به کمک این مدل عرضه شده که در شکل ۲ آمده است، همه روابط مربوط به الگوریتم پیشنهاد شده از

حال برای محاسبه پتانسیل U ابتدا فواصل بین الکترودها را تعیین می کنیم و سپس با استفاده از رابطه فوق به محاسبه U می پردازیم.

$$U = \rho I / 2\pi(1/r_1 - 1/r_2), \quad (23)$$

برای به دست آوردن میدان الکتریکی حاصل از پاسخ سطح مشترک، ابتدا اختلاف پتانسیل بین دو سطح را محاسبه می کنیم و با تعیین فواصل  $\Delta x$  به محاسبه میدان الکتریکی می پردازیم.

$$E_x^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) = -\bar{D}_x \left( U^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right), \quad (24)$$

$$E_y^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) = -\bar{D}_y \left( U^{(n+\frac{1}{2})}(i, j) \right), \quad (25)$$

## ۵-۵ کاربرد عددی

در این تحقیق از الگوریتم بازه زمانی شبه طیفی (PSTD) برای شبیه سازی میدان پروالاستیک و روش بازه زمانی تفاضل متناهی برای حل کردن میدان الکتریکی استفاده شد. برای هر مرحله زمانی، الگوریتم عددی حاصل به ترتیب زیر است:

۱. محاسبه میدان های سرعت V با معادله (۱۹)
۲. محاسبه میدان های فشار  $\sigma$  با معادله (۲۰)
۳. محاسبه فشار منفذ P با معادله (۲۱)
۴. حل معادلات (۲۳) برای به دست آوردن پتانسیل الکتریکی U
۵. محاسبه میدان های الکتریکی E از پتانسیل الکتریکی با معادله (۲۴) و (۲۵)

۶. نتایج خروجی

نمودار گردشی (فلو چارت) برنامه در شکل ۱ فرایند را در جزئیات بیشتر نمایش می دهد.



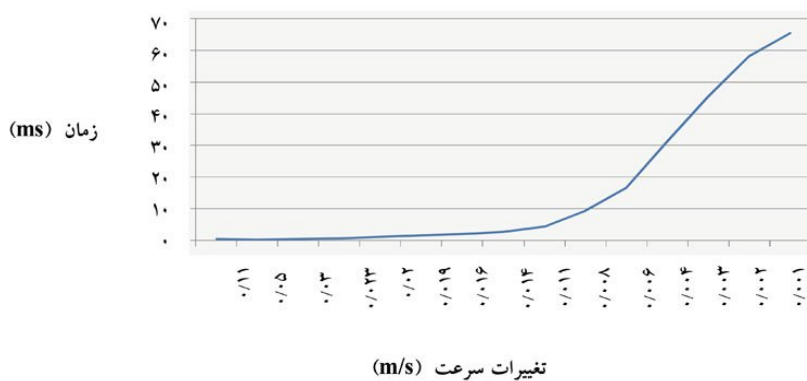
الکترودی متفاوت به محاسبه پتانسیل در مرز بین دو لایه می‌پردازیم و سپس از روی رابطه ذکر شده، میدان افقی الکتریکی برحسب تغییرات فاصله را محاسبه و نمودارش را رسم می‌کنیم. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله میدان کاهش پیدا می‌کند.

حال با قرار دادن شکل ۳ و ۴ روی هم شکل ۵ حاصل می‌شود که یک نمودار زمان برحسب فاصله است و به خوبی تغییرات میدان الکتریکی القا شده بین دو لایه را نمایش می‌دهد. این نمودار نمایانگر پاسخ سطح مشترک بین لایه دوم و سوم است که خود می‌تواند در حکم یکی از منابع مهم ایجاد سیگنال‌های الکتریکی القایی عمل کند.

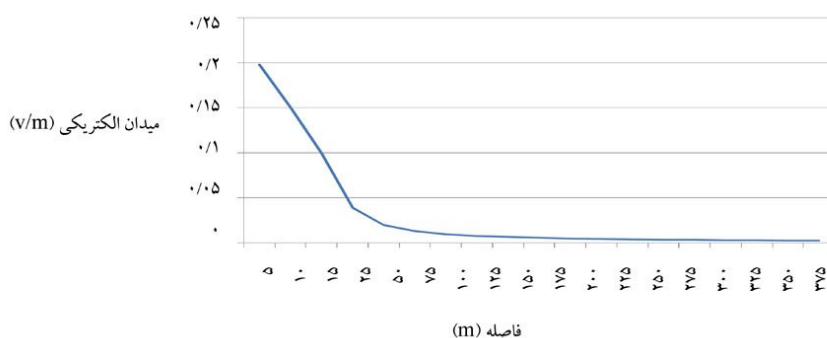
راه برنامه‌نویسی محاسبه، و نتایج به صورت نمودار نمایش داده می‌شود.

شکل ۳ تغییرات سرعت بین لایه دوم و سوم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با تغییر فاصله بین گیرنده و الکتروود مثبت سرعت موج در برخورد به سطح مشترک لایه‌ها، در زمان‌های متفاوت تغییر می‌کند و چون فواصل رو به افزایش است، لذا سرعت موج نیز رفته‌رفته افزایش می‌یابد.

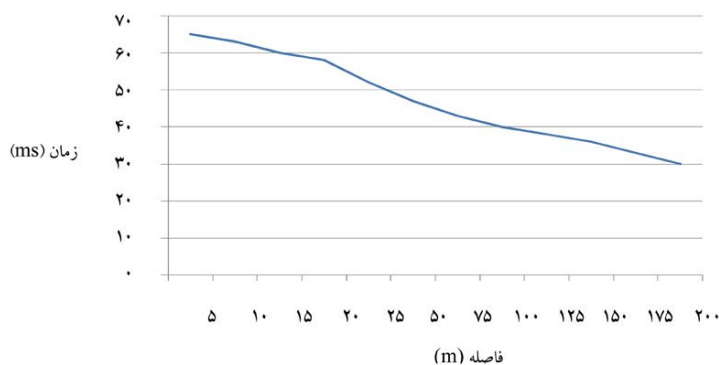
در شکل ۴ به بررسی تغییرات میدان الکتریکی در مرز بین دو لایه (دوم و سوم) می‌پردازیم. با توجه به رابطه میدان افقی الکتریکی  $E_x = -\bar{D}_x U$  ابتدا در فواصل



شکل ۳. تغییرات سرعت برحسب زمان بین لایه دوم و سوم.



شکل ۴. تغییرات میدان الکتریکی در جهت X برحسب فاصله.



شکل ۵. تغییرات میدان الکتریکی در سطح مشترک بین لایه دوم و سوم.

## ۷ نتیجه گیری

روش سائزموالکتريک قبلاً در بررسی سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران برای دو لایه مورد بررسی قرار گرفته بود که مدل سازی داده ها براساس روش ماتریس بازتاب و انتقال تعمیم داده شده و تبدیل معکوس در حوزه زمان - فضا صورت گرفته و پردازش داده های حاصل با روش تفریق سینوسی صورت گرفته بود. روشی که در این مقاله عرضه شده است، بررسی روش سائزموالکتريک برای ساختارهای بیش از دو لایه است و با استفاده از روش های تفاضل متناهی (FD) برای حل معادلات دیفرانسیلی و محاسبه میدان الکتریکی تولید شده و روش شبه طیفی (PSTD) برای محاسبه مشتقات متغیر در حوزه فوریه، که حداقل به دو گره در هر طول موج برای دادن راه حل های دقیق نیاز است، بیان می شود. پس از محاسبه این روابط و بررسی پدیده سائزموالکتريک در حضور میدان الکتریکی خارجی، الگوریتم مورد نظر پیشنهاد، و یک مدل حقیقی سه لایه براساس این الگوریتم مدل سازی و نتایج حاصل به صورت نمودار بیان شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر است: مدل سازی پاسخ سطح مشترک بین لایه ها (به ویژه لایه های

آب دار)، خود به منزله یک منبع مهم سیگنال های الکتریکی القایی عمل می کند.

با مدل پیشنهاد شده به راحتی می توان پاسخ سطح مشترک را به صورت سیگنال های الکتریکی القایی مشاهده کرد.

در این تحقیق مجموعه هایی از معادلات شامل معادله سرعت، تنش، فشار منفذ، پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی برای اتصال سائزموالکتريک در محیط پروالاستیک به منظور شبیه سازی انتشار موج کشسان در محیط متخلخل با اعمال میدان الکتریکی DC محاسبه شد و روشن شد که در باند بسامدی امواج ارتعاشی، میدان های الکترومغناطیسی را می توان با میدان الکتریکی ثابت برآورد کرد.

شبیه سازی عددی انتشار موج کشسان در محیط پروالاستیک با میدان های الکتریکی قوی DC به طور موفقیت آمیزی روشن ساخت که میدان DC به صورت قابل توجهی روی انتشار امواج ارتعاشی موثر است.

همچنین روشن شد که (به این علت که طول موج امواج الکترومغناطیسی بیشتر از امواج مکانیکی است) بسامد مرکزی امواج سائزموالکتريک (بین ۱۱۰ تا ۱۲۰ هرتز) بیشتر از داده های لرزه ای (۳۰ تا ۴۰ هرتز) است.

- Ivanov, A. G., 1940, The electroseismic effect of the second kind: *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.*, **5**, 699-727.
- Kepic, A. W., Maxwell, M., and Russell, R. D., 1995, Field trials of a seismoelectric method for detecting massive sulfides: *Geophysics*, **60**, (2), 365-373.
- Martner, S. T., and Sparks, N. R., 1959, The electroseismic effect: *Geophysics*, **24**, 297-308.
- Pride, S., 1994, Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media: *Physical Review*, **50**, (21), 15678-15696.
- Pride, S. R., and Haartsen, M. W., 1996, Electroseismic wave properties: *J. Acoust. Soc. Am.*, **100**, 1301-1315.
- Parkhomenko, E. I., and Gaskarov, I. V., 1971, Borehole and laboratory studies of the seismoelectric effect of the second kind in rocks: *Izv. Akad Nauk SSSR, Physics of the Solid Earth*, **9**, 88-92.
- Thompson, A., and Gist, G., 1993, Geophysical applications of electrokinetic conversion: *The Leading Edge*, **12**, 1169-1173.
- Thompson, R., 1936, The seismic-electric effect: *Geophysics*, **1**, 327-335.

### تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم که از آقای دکتر محمد علی ریاحی به خاطر کمک‌ها و پیشنهادات مفیدشان در طول کار تشکر کنیم. همچنین، از داوران محترم که با پیشنهادات ارزنده خود باعث بهبود این مقاله شدند قدردانی می‌کنیم.

### منابع

- Biot, M. A., 1962, Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media: *J. Applied Phys.*, **33**, 1482-1498.
- Butler, K. E., Russel, R. D., Kepic, A. W., and Maxwell, M., 1996, Measurement of the seismoelectric response from a shallow boundary: *Geophysics*, **61**, 1769-1778.
- Garambois, S., and Dietrichz, M., 2001, Seismoelectric wave conversions in porous media: Field measurements and transfer function analysis: *Geophysics*, **66**, (5), 1417-1430.
- Haartsen, M. W., and Pride, S. R., 1997, Electroseismic waves from point sources in layered media: *J. Geophysics. Res.*, **102**, 24745-24769.