

## بررسی اثر تغییرات درجه‌ی اشباع بر سرعت انتشار موج فشاری در محیط‌های سنگی و خاکی

مختار الیاسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه رازی

مهنوش بیگلری (نویسنده مسئول)، عضو هیئت‌علمی، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی،

m.biglari@razi.ac.ir

ایمان عشایری، عضو هیئت‌علمی، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

**چکیده:** اولین لرزه‌های زمین موجب وارد شدن نیروی فشاری به زمین می‌شود و این نیرو جنبشی ایجاد می‌کند که در آن ذرات در راستای انتشار موج به جلو و عقب جابه‌جا می‌شوند به این نوع موج طولی موج فشاری ( $p$ ) گفته می‌شود. انتشار امواج در سنگ بستر و محیط‌های خاکی لایه‌بندی شده و نحوه‌ی رفتار این امواج در این محیط‌ها یکی از مباحثی است که در مهندسی زلزله، لرزه‌شناسی و ژئوفیزیک مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. شناخت امواج و به تبع آن سرعت انتشار آنها ما را به درک درست‌تری از تشکیلات زمین و نحوه‌ی رفتار آنها در اثر عبور این امواج می‌رساند. همچنین سرعت انتشار امواج با تغییر محیط انتشار تغییر می‌کند. عوامل متعددی می‌تواند بر سرعت انتشار موج فشاری در یک محیط مؤثر باشد از قبیل مدول الاستیسیته، مدول برشی، دانسیته، درجه‌ی اشباع، تخلخل، ضریب پواسون و فشار همه‌جانبه. در این مقاله به‌طور اخص به تأثیر تغییرات درجه‌ی اشباع بر سرعت موج فشاری در سنگ و خاک پرداخته می‌شود. بررسی‌ها نشان داده‌اند که تغییر درجه‌ی اشباع محیط باعث تغییر سرعت انتشار موج فشاری می‌شود. این تغییرات در سنگ‌ها و خاک‌ها متفاوت است. در محیط‌های خاک به‌طور معمول با افزایش درجه‌ی اشباع کاهش در سرعت انتشار موج فشاری تا درجه‌ی اشباع حدود ۹۹ درصد مشاهده می‌شود و بعد از آن افزایش ناگهانی در سرعت رخ می‌دهد. در محیط‌های سنگی عموماً با افزایش درجه‌ی اشباع، افزایش در سرعت موج فشاری مشهود است.

**واژگان کلیدی:** سرعت موج  $p$ ، درجه‌ی اشباع، پوکی، فراصوت.

### ۱- مقدمه

حجم و شکل اولیه‌ی خود پس از عبور موج باز می‌گردند. بنابراین به چنین موج‌هایی، موج‌های الاستیک می‌گویند. در محیط الاستیک تک فاز دو موج حجمی شامل یک موج فشاری و یک موج برشی منتشر می‌شوند. در محیط سه فاز (غیر اشباع) چهار موج حجمی شامل سه موج فشاری و یک موج برشی انتشار می‌یابد. اولین لرزه‌ها موجب وارد شدن یک

رویداد زمین‌لرزه موجب آزاد شدن انرژی می‌شود که به‌صورت یک جبهه‌ی ضربان دگرشکلی در زمین حرکت خواهد کرد. این ضربان به صورت موجی است که در آن ذرات در مسیر حرکت جابه‌جا شده و انرژی خود را در محیطی کروی به فضا منتقل می‌نمایند [۱]. اگر انرژی موج سبب جابه‌جایی در مواد زمین در محدوده‌ی رفتار الاستیک گردد، ذرات به

سرعت امواج لرزه‌ای در اغلب موارد با افزایش فرکانس افزایش می‌یابند. بیو امواج فشاری را از لحاظ سرعت انتشار به دو نوع تند و کند تقسیم کرد. در حالت موج فشاری تند حرکتی که در محیط ایجاد می‌کند به این صورت است که بخش جامد و مایع هم‌فاز با هم متراکم می‌شوند یعنی هر دو با هم متراکم یا منبسط می‌شوند و در موج فشاری کند مایع و جامد غیر هم‌فاز می‌شوند به عبارتی وقتی جامد متراکم می‌شود مایع از داخل آن خارج شده و وقتی جامد منبسط می‌گردد مایع متراکم شده و به داخل جامد می‌رود.

بر اساس تئوری بیو-گاسمن در فرکانس‌های بالا و پایین روابطی برای تعیین سرعت امواج فشاری ارائه شده است.

## ۲-۱- انتشار موج فشاری در محیط متخلخل اشباع در فرکانس پایین

وقتی فرکانس پایین است هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سیال و جامد وجود ندارد در چنین شرایطی سرعت موج فشاری عبارت است از:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق،  $V_p$  سرعت موج فشاری،  $K$  مدول بالک،  $G$  مدول برشی و  $\rho$  چگالی حجمی محیط انتشار می‌باشد. مدول بالک نیز خود تابع پارامترهایی از محیط انتشار است که رابطه‌ی آن به شکل زیر می‌باشد:

$$K = K_{sk} + \frac{\left(1 - \frac{K_{sk}}{K_s}\right)^2}{\left(\frac{n}{K_f} + \frac{1-n}{K_s} - \frac{K_{sk}^2}{K_s^2}\right)} \quad (2)$$

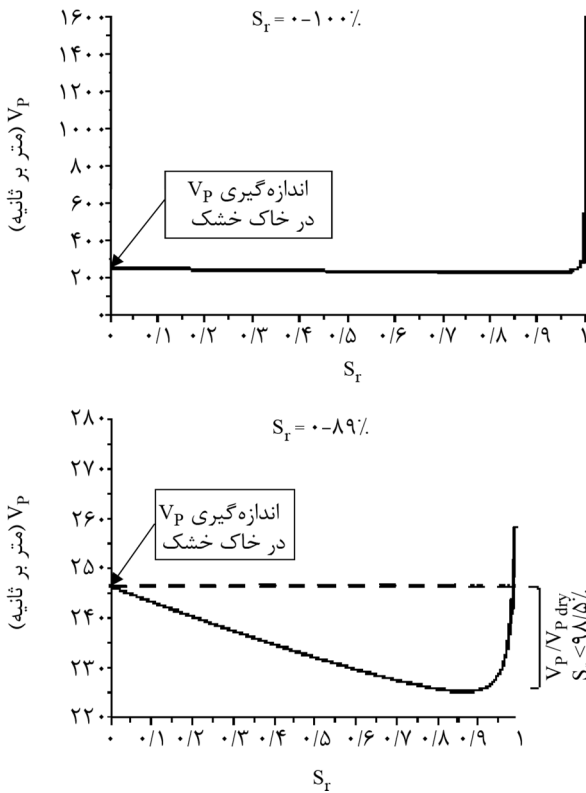
$K_{sk}$ ،  $K_s$ ،  $K_f$  و  $n$  به ترتیب برابر مدول بالک دانه‌های خاک (در حالت خشک)، مدول بالک بافت خاک در حالت طبیعی، مدول بالک سیال داخل حفره‌ها و پوکی می‌باشد. معادله‌ی فوق با این فرضیات ساخته شده است که محیط ایزوتروپ و همگن است، داخل حفره‌ها توزیع آب‌وهوا یکنواخت بوده، فرکانس پایین است، جریان سیال محدود نبوده و تغییرات فشار داخل حفره‌ها قابل توسعه نیستند.

نیروی فشاری به مواد می‌شود. این نیرو باعث ایجاد یک جنبش موج می‌گردد که در آن ذرات در راستای انتشار با حرکت به جلو و عقب جابه‌جا خواهند شد، به این موج‌های طولی موج فشاری یا اولیه ( $P$ ) می‌گویند. دلیل این نام‌گذاری این است که موج‌های اولیه سریع‌تر از سایر امواج الاستیک حرکت می‌کنند و سریع‌تر از سایر موج‌ها به دستگاه‌های ثبت زلزله خواهند رسید. شکل موج  $P$  زمین‌لرزه‌ها بسیار شبیه به موج‌هایی است که از انفجار در معدن‌ها یا انفجارهای هسته‌ای ثبت می‌شوند با این تفاوت که بر روی نگاشت حاصل از انفجار معمولاً دامنه‌ی موج  $P$  بلندترین دامنه است. در نگاشت زمین‌لرزه‌ها، دامنه‌ی موج‌های بعدی ( $S$  موج) و موج‌های سطحی) معمولاً بلندتر است. شناخت امواج و به تبع آن سرعت انتشار آنها ما را به درک درست‌تری از تشکیلات زمین و نحوه‌ی رفتار آنها در اثر عبور این امواج می‌رساند. عوامل متعددی می‌تواند روی سرعت انتشار موج  $P$  در یک ماده مؤثر باشد از قبیل مدول الاستیسیته، مدول برشی، دانسیته، درجه‌ی اشباع، تخلخل، ضریب پواسون و فشار همه‌جانبه که در ادامه با مرور کوتاهی بر روابط سرعت موج فشاری و تأثیر بعضی از عوامل یاد شده بر سرعت این موج، به‌طور ویژه به تأثیر تغییرات درجه‌ی اشباع روی سرعت موج  $P$  در محیط‌های سنگی و خاکی پرداخته می‌شود.

## ۲- معادله‌ی انتشار امواج فشاری (در محیط دو فاز) اشباع

همان‌گونه که در مقدمه بیان شد سرعت انتشار امواج فشاری به عوامل متعددی بستگی دارد که این عوامل نیز به مشخصات محیط انتشار وابسته است.

فرکانس انتشار امواج عامل مؤثری در سرعت انتشار امواج است. گاسمن در سال ۱۹۵۱ [۲] به بررسی تغییرات سرعت انتشار موج فشاری به‌صورت تابعی از مدول‌های الاستیک خاک در فرکانس‌های پایین پرداخته است. در سال ۱۹۵۶، بیو [۳-۴] به بررسی سرعت انتشار امواج الاستیک در محیط دو فاز اشباع در دو بخش فرکانس‌های پایین و بالا پرداخت.



شکل (1): ارزیابی تئوری معادله‌ی انتشار موج P بر روی ماسه‌ی هاستون S28 [4].

$$f_c = ng / 2\pi k \quad (5)$$

که در این رابطه،  $g$  شتاب گرانش و  $k$  ضریب نفوذپذیری است که توسط قانون دارسی مشخص می‌شود. در فرکانس بالاتر از فرکانس مشخصه ( $f_c$ ) و با فرض

$$K_{sk} \ll K_s$$

نسبت سرعت موج فشاری در فرکانس بالا به سرعت موج فشاری در فرکانس پایین را می‌توان توسط معادله‌ی ارائه شده توسط بیو [4] به صورت زیر تعیین کرد:

$$\frac{V_{p\infty}}{V_{po}} = \sqrt{\frac{[n\alpha + n^2(\beta - 2) - n^3(\beta - 1)][\beta(1 - n) + n]}{\alpha\beta n(1 - n) + n^2(\alpha - 1)}} \quad (6)$$

که در آن  $\alpha$  انحنا و  $\beta$  نسبت چگالی حجمی دانه به چگالی حجمی سیال می‌باشد.

$$\beta = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (7)$$

برای فرکانس‌های مجاور  $f_c$  رابطه‌ی فوق توسط گیرتسما و اسمیت [7] توسعه داده شده است و به‌طور تقریبی می‌توان نوشت:

$K_f$  نیز خود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_f = \left( \frac{S_r}{K_w} + \frac{1 - S_r}{K_a} \right)^{-1} \quad (3)$$

که در این معادله  $S_r$  درجه‌ی اشباع و  $K_w$  و  $K_a$  به ترتیب مدول بالک هوا و سیال داخل حفره‌ها است.  $\rho$  نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho = n(S_r \rho_w + (1 - S_r) \rho_a) + (1 - n) \rho_s \quad (4)$$

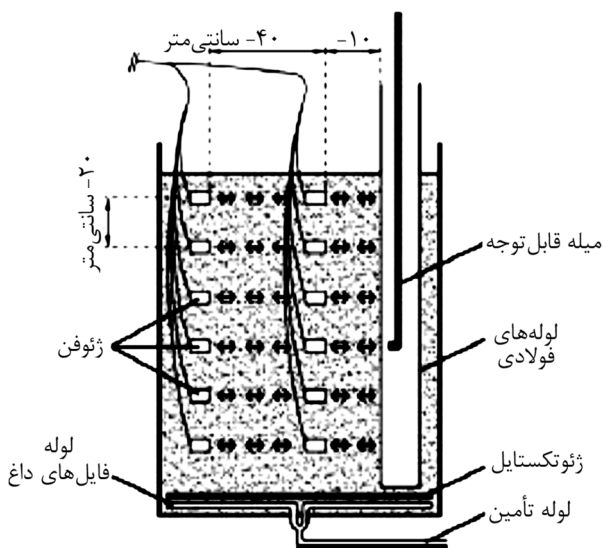
که به ترتیب  $\rho_w$ ،  $\rho_a$  و  $\rho_s$  چگالی حجمی آب، هوا و دانه‌های ماده می‌باشد؛ و در وایت مدول برشی تحت تأثیر نوع سیال داخل یا به عبارت دیگر درجه‌ی اشباع ماده قرار نمی‌گیرد. با دقت در معادلات ارائه شده می‌توان به نقش کلیدی درجه‌ی اشباع در سرعت موج فشاری پی برد و مدول بالک و مدول حجمی با افزایش درجه‌ی اشباع افزایش می‌یابند [5]. باچراچ و همکاران در سال ۱۹۹۸ تغییرات سرعت  $V_p$  را بر اساس این تئوری مورد بررسی قرار داد و نشان داد که تغییرات ناگهانی  $V_p$  در نزدیکی درجه‌ی اشباع ۹۹ درصد رخ می‌دهد و کاهش تدریجی در سرعت موج فشاری با افزایش درجه‌ی اشباع از صفر تا ۹۰ درصد وجود دارد [6]. این بدان معنی بوده که در مطالعه‌ی مذکور مدول برشی که ثابت بوده و آهنگ افزایش مدول حجمی تا درجه‌ی اشباع حدود ۹۹ درصد بیشتر از آهنگ افزایش مدول بالک بوده است. این موضوع در شکل (۱) نمایش داده شده است.

## ۲-۲- انتشار موج فشاری در محیط متخلخل اشباع در فرکانس‌های بالا

وقتی فرکانس افزایش می‌یابد نیروی اینرسی سبب حرکت نسبی سیال نسبت به اسکلت خاک می‌شود، در نتیجه معادلات گاسمن معتبر نخواهد بود. در این حالت با توجه به تئوری ارائه شده توسط بیو [3] باید یک فرکانس (برای جسم جامد) مشخص کرد که توسط آن مرز عبور فرکانس بالا از فرکانس پایین تعیین شود. با توجه به این موضوع می‌توان رابطه (۵) را نوشت:

اشباع از ۱۰۰٪ تا حدود ۷۰٪ سرعت موج فشاری کاهش می‌یابد و بین ۷۰٪ تا ۱۰٪ تقریباً ثابت می‌ماند و زیر ۱۰٪ قابل تغییر است [۸]. گرگوری در سال ۱۹۷۶ [۹] به بررسی تأثیر اشباع‌شدگی به‌وسیله‌ی آب، نفت و گاز و مخلوطی از این سیالات بر روی دانسیته، سرعت، ضریب بازتاب و مدول الاستیسیته‌ی سنگ‌های رسوبی تحکیم یافته در آزمایشگاه به‌وسیله‌ی روش انتشار امواج التراسونیک پرداخت. او دریافت اثر اشباع‌شدگی بر روی سرعت انتشار امواج در سنگ‌های با پوکی کمتر، بیشتر از سنگ‌های با پوکی بیشتر است.

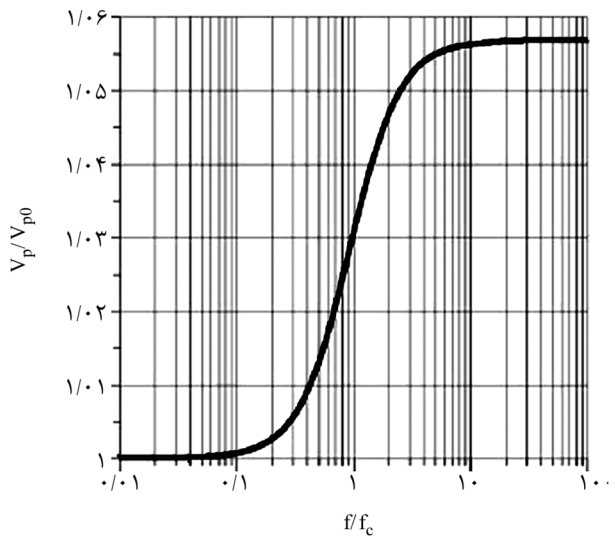
در سال ۲۰۰۶ نیز [۵] با انجام آزمایش درون چاهی متقاطع به بررسی عملی رابطه‌ی بیو-گاسمن پرداخت و سرعت انتشار امواج فشاری را در دو حالت خشک و اشباع در یک نوع خاک ماسه‌ای اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق جهت انجام آزمایش از یک سیلندر استوانه‌ای شکل به عمق ۱/۵ متر و قطر ۱/۲ متر استفاده شده که چندین حس‌گر ژئوفون (Geophone) در اعماق مختلف و در راستای افقی یکسان کار گذاشته شده است و با یک میله در راستای حس‌گر در اعماق مختلف جهت ایجاد موج به سیلندر وارد شد. در شکل (۳) جزئیات تجهیزات مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل (۳): آزمایش درون چاهی متقاطع جهت بررسی تغییرات سرعت امواج با تغییر درجه‌ی اشباع [۵].

$$V_p^2 = \frac{V_{p0}^4 + V_p^4 \left( \frac{f_c}{f} \right)^2}{V_{p0}^2 + V_p^2 \left( \frac{f_c}{f} \right)^2} \quad (۸)$$

با استفاده از معادلات فوق در فرکانس‌های مجاور و بالاتر از  $f_c$  برای ماسه‌ی هاستون S28 نموداری مطابق شکل (۲) ارائه شده است.



شکل (۲): ارزیابی نسبت  $V_p/V_{p0}$  در فرکانس‌های مجاور  $f_c$  برای ماسه‌ی هاستون ( $V_{p0} = 1600$  متر بر ثانیه و  $\alpha = 1/9$ ,  $\beta = 0.4$ ).

### ۳- تغییرات سرعت موج فشاری با تغییر درجه‌ی اشباع (درصد رطوبت) محیط انتشار

مطالعات صورت گرفته در این خصوص بیشتر بر روی سنگ بوده و قسمت اندکی بر روی خاک است که آن نیز بیشتر به خاک ماسه محدود می‌شود. یکی از روش‌های بررسی سرعت انتشار امواج فشاری در سنگ و خاک روش آزمایش فراصوت است که در گروه روش‌های غیر مخرب قرار می‌گیرد. این روش هم در آزمایشگاه و هم در محل قابل استفاده است. تعدادی از محققین توسط این روش به بررسی تغییرات سرعت امواج در اثر تغییر درجه‌ی اشباع پرداخته‌اند.

ویلی و همکاران در سال ۱۹۵۶ [۸] به بررسی تغییرات سرعت در ماسه سنگ برحسب تابعی از درجه‌ی اشباع با روش التراسونیک پرداختند. او نشان داد با کاهش درجه‌ی

جدول (۱): تغییرات سرعت موج فشاری در حالت خشک و تر و مقادیر پوکی سنگ‌های مورد آزمایش [۱۰].

شماره نمونه‌ها	سرعت موج فشاری در حالت خشک (کیلومتر بر ثانیه)	سرعت موج فشاری در حالت مرطوب (کیلومتر بر ثانیه)	اختلاف سرعت (کیلومتر بر ثانیه)	پوکی (درصد)
۱ <sup>a</sup>	۴/۲۳	۵/۶۰	۱/۴	۹/۹۰
۲	۴/۳۱	۵/۸۹	۱/۶	۶/۱۴
۳ <sup>a</sup>	۴/۹۸	۶/۹۲	۱/۹	۲/۸۵
۴	۴/۲۶	۵/۶۵	۱/۴	۱۳/۰۵
۵	۵/۶۳	۷/۶۵	۲/۰	۰/۳۵
۶	۵/۳۴	۶/۷۲	۱/۴	۰/۲۹
۷	۴/۵۷	۵/۷۷	۱/۲	۱۳/۴۴
۸	۵/۴۰	۶/۷۲	۱/۳	۲/۴۸
۹	۴/۷۸	۶/۲۶	۱/۵	۱۵/۵۱
۱۰ <sup>a</sup>	۴/۵۶	۶/۵۵	۲/۰	۱/۸۵
۱۱	۵/۱۱	۶/۵۷	۱/۵	۱/۳۸
۱۲	۵/۴۵	۷/۲۲	۱/۸	۰/۲۱
۱۳ <sup>a</sup>	۵/۲۴	۷	۱/۸	۱/۱۶
۱۴	۴/۶۷	۶/۲۴	۱/۶	۱/۴۰
۱۵	۴/۸۵	۶/۲۵	۱/۴	۱/۷۸
۱۶	۴/۹۹	۶/۹	۱/۹	۰/۱۸
۱۷	۵/۵۸	۷/۹۱	۲/۳	۰/۱۹
۱۸	۳/۴۴	۵/۷۳	۲/۳	۰/۳۴
۱۹	۴/۹۸	۷/۱۲	۲/۱	۰/۲۳
۲۰	۴/۶۰	۶/۸۸	۲/۳	۰/۲۶
۲۱	۳/۸۱	۶/۲۳	۲/۴	۰/۳۷
۲۲	۴/۷۱	۷/۵۲	۲/۸	۰/۴۳
۲۳	۴/۵۵	۶/۸۶	۲/۳	۰/۴۱
۲۴	۳/۴۰	۵/۵۲	۲/۱	۰/۲۴
۲۵	۵/۵۰	۷/۵۶	۲/۱	۰/۶۵
۲۶	۵/۱۵	۷/۱۷	۲	۰/۳۹
۲۷ <sup>a</sup>	۴/۰۱	۵/۹۸	۲	۰/۴۶
۲۸ <sup>a</sup>	۳/۷۳	۵/۶۱	۱/۹	۱/۰۵
۲۹ <sup>a</sup>	۳/۴۲	۵/۲۸	۱/۹	۰/۹۸
۳۰	۵/۴۶	۷/۱۷	۱/۷	۰/۲۷
۳۱	۵/۵۹	۷/۴۳	۱/۸	۰/۶۹
۳۲	۴/۷۶	۶/۵۱	۱/۸	۰/۷۱
۳۳	۴/۹۴	۶/۸۵	۱/۹	۰/۶۲
۳۴	۴/۳۸	۶/۰۴	۱/۷	۰/۴۷
۳۵	۴/۳۸	۶/۱۵	۱/۸	۲/۱۰
۳۶	۵/۱۲	۶/۴۶	۱/۳	۵/۲۰
۳۷	۴/۱۱	۵/۹۰	۱/۸	۳/۲۰
۳۸	۴/۷۹	۶/۵۴	۱/۸	۰/۳۵
۳۹	۳/۸۷	۵/۸۲	۲	۱/۰۱
۴۰	۴/۲۰	۵/۷۴	۱/۵	۳/۵۹
۴۱	۴/۷۴	۶/۲۶	۱/۵	۰/۹۸

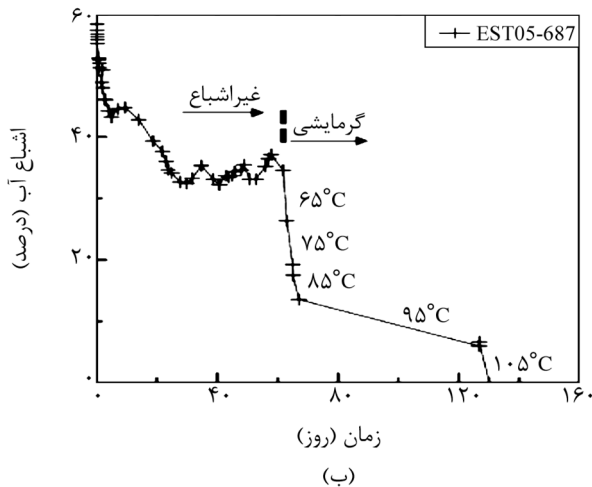
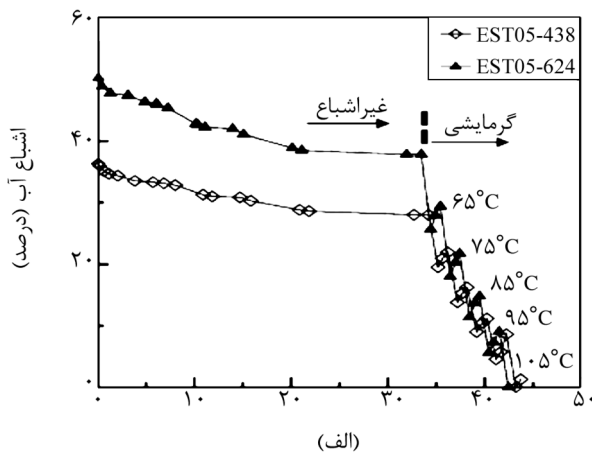
a: سنگ‌های غیر ایزوتروپیک. اندازه‌گیری‌های التراسونیک عمود بر صفحه بستر یا تورق انجام شده است.

تمام نمونه‌ها از ماسه‌ی هاستون در شرایطی ساخته شدند که در کل استوانه همگن و دارای شرایط تراکمی یکسانی باشند. ارزیابی‌های ژئوفیزیکی که توسط آزمایش فوق انجام شد به نتایجی مشابه پیش‌بینی‌های تئوری بیو-گاسمن رسید. در این مورد مشاهده شد که حساسیت موج فشاری در درجه‌ی اشباع بالا ( $S_r > 99$ ) خیلی بیشتر است و افزایشی سریع دارد. فرکانس ارتعاش با توجه به تئوری بیو نقش کلیدی ایفا می‌کند [۵].

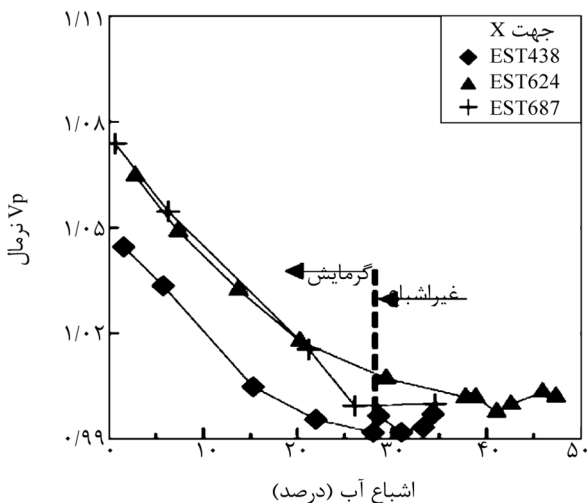
کاهرامان در سال ۲۰۰۷ [۱۰] رابطه‌ی بین سرعت موج فشاری در حالت خشک و اشباع در سنگ‌ها را توسط روش انتشار امواج التراسونیک مورد مطالعه قرار داد. او بر روی ۴۱ نمونه متفاوت سنگ آزمایش انجام داد که ۱۱ نوع آن سنگ گرانیت، ۱۵ نوع آن سنگ رسوبی و ۱۵ نمونه سنگ دگرگونی بود. این سنگ‌ها به‌وسیله‌ی نمونه‌گیری از مناطق مختلف ترکیه تهیه شده بودند. از فرکانس ۱ مگاهرتز برای عبور امواج استفاده شده بود. در ابتدا نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب اشباع شدند. بعد از اندازه‌گیری وزن سرعت موج فشاری اندازه‌گیری شد و سپس اجازه داده شد نمونه‌ها در هوا در یک بازه‌ی ۳۲ ساعته خشک شوند و در زمان‌های ۲، ۴، ۸، ۱۶ و ۳۲ ساعت بعد از اشباع شدن و در حین خشک شدن، سرعت عبور امواج اندازه‌گیری گردید. بعد از این مرحله نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد خشک شدند و در نهایت سرعت عبور امواج در حالت خشک اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها پوکی با توجه به وزن اشباع و خشک نمونه‌ها تعیین می‌شود. سرعت‌های موج فشاری اندازه‌گیری شده در حالت تر و خشک همراه با پوکی در جدول (۱) نشان داده شده است.

دیده می‌شود اشباع‌شدگی در سنگ‌های مورد مطالعه باعث افزایش سرعت موج فشاری شده است. او علاوه بر این نتایج نشان داد که بین درجه‌ی اشباع ( $SD_p$ ) و اختلاف بین سرعت موج فشاری ( $\Delta V_p$ ) در دو حالت خشک و تر رابطه‌ای می‌توان برقرار کرد.

بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود. این نتایج خلاف تئوری بیو-گاسمن است هرچند که در این مطالعه فشار همه‌جانبه اندک می‌باشد و نیز شرایط خشک‌شدگی سریع بوده است.

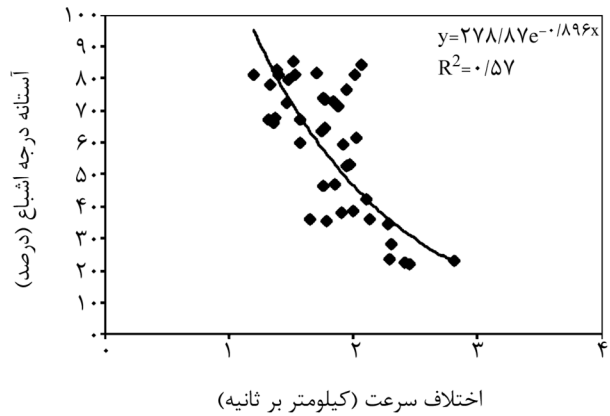


شکل (۵): شرایط خشک‌شدگی نمونه‌های مورد آزمایش [۱۰].



شکل (۶): تغییرات سرعت موج فشاری با تغییر درجه‌ی اشباع [۱۱].

یک رابطه‌ی نمایی بین درجه‌ی اشباع و  $\Delta v_p$  وجود داشت که در شکل (۴) نشان داده شده است. مقدار  $SD_t$  با افزایش  $\Delta v_p$  کاهش می‌یابد.



شکل (۴): نمودار تغییرات درجه‌ی اشباع در مقابل اختلاف سرعت موج فشاری در حالت تر و خشک [۱۰].

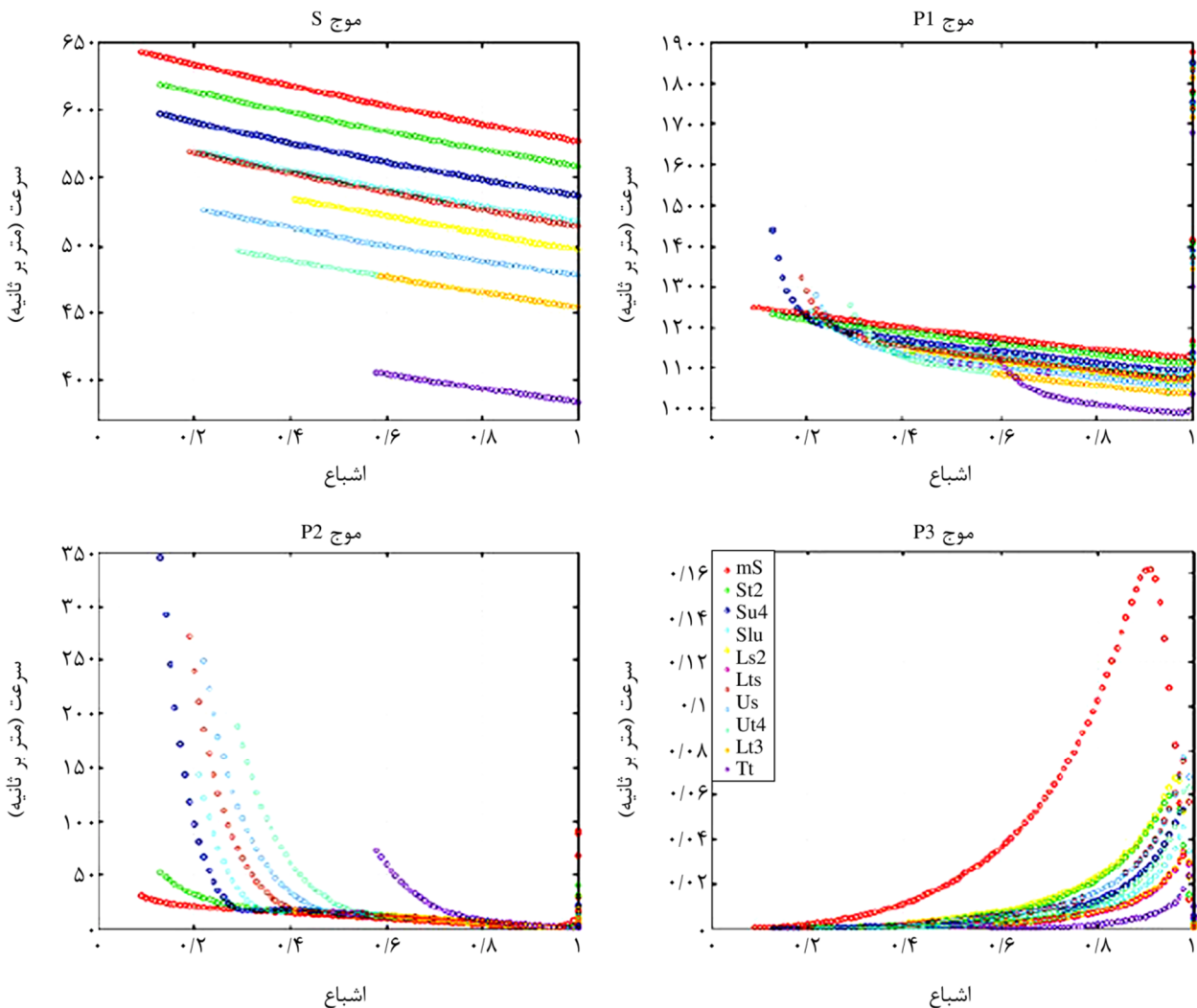
کاهرامان در مطالعه‌ی خود رابطه‌ای بین پوکی و  $\Delta v_p$  پیدا کرده که در شکل (۴) نشان داده شده است. با افزایش پوکی،  $\Delta v_p$  کاهش می‌یابد، در سنگ دگرگونی بزرگ‌تر و در سنگ رسوبی و آذرین کوچک‌تر است. بدین معنا که در سنگ‌های با پوکی بیشتر افزایش سرعت موج فشاری با افزایش درجه‌ی اشباع، کمتر دیده می‌شود. تحقیقات کاهرامان بر خلاف رابطه‌ی گاسمن بود. این تفاوت از این واقعیت ناشی می‌شود که رابطه‌ی گاسمن برای یک نهشته با پوکی بالا و در فرکانس پایین نوشته شده است. همچنین در رابطه‌ی گاسمن فرض شده که ماده ایزوتروپ الاستیک، همگن و اشباع کامل می‌باشد [۱۰].

قربانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی اثر خشک‌شدگی بر روی سرعت امواج الاستیک در سنگ رسی پرداختند. در این تحقیق سه نوع سنگ که از اعماق متفاوت نمونه‌برداری شده بود و دارای قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول آن بین ۹/۵ تا ۱۰ سانتی‌متر متغیر بود مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که کاهش درجه‌ی اشباع باعث افزایش سرعت امواج فشاری می‌شود. البته این کاهش رطوبت در محدوده‌ی صفر تا پنجاه درصد مورد

انتشار موج الاستیک در محیط غیر اشباع در خاک‌های ماسه‌ای، لوم و رسی پرداخت. ۱۱ خاک مورد مطالعه قرار گرفت؛ چهار نوع موج از روابط حاصل شد که سه نوع آن فشاری ( $P_1$  و  $P_2$  و  $P_3$ ) و یک نوع برشی ( $S$ ) بود. آلبرس تغییرات سرعت امواج فشاری و برشی در مقابل درجه‌ی اشباع را برای فرکانس ۱۰۰۰ هرتز مورد بررسی قرار داد که نتایج آن در شکل (۷) نمایش داده شده است. در موج فشاری نوع اول ( $P_1$ ) مشاهده می‌شود که با افزایش درجه‌ی اشباع کاهش سرعت موج فشاری رخ می‌دهد. لازم به ذکر است در انتشار موج فشاری نوع اول با توجه به پایین بودن فرکانس، هیچ‌گونه حرکت نسبی بین سیال و جامد وجود ندارد [۱۴].

آدامو و همکارانش در سال ۲۰۰۹ [۱۲] تغییرات سرعت امواج الاستیک را با تغییر رطوبت بر روی یک خاک ماسه‌ای در دو بخش تئوری و آزمایشگاهی بررسی قرار دادند. در خصوص انتشار امواج همان‌طور که قبلاً بیان شد معادلاتی بر مبنای تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی مختلف ارائه شد که در این میان بروتسارت در سال ۱۹۶۴ روابطی در این خصوص ارائه داده است [۱۳]. مدل تئوری آدامو برگرفته از روابط بروتسارت می‌باشد که بر مبنای این مدل افزایش درجه‌ی اشباع باعث کاهش سرعت موج فشاری می‌شود که همین نتیجه در تحقیقات آزمایشگاهی مشاهده شده است.

آلبرس در سال ۲۰۱۱ [۱۴] به بررسی تئوری معادله‌ی

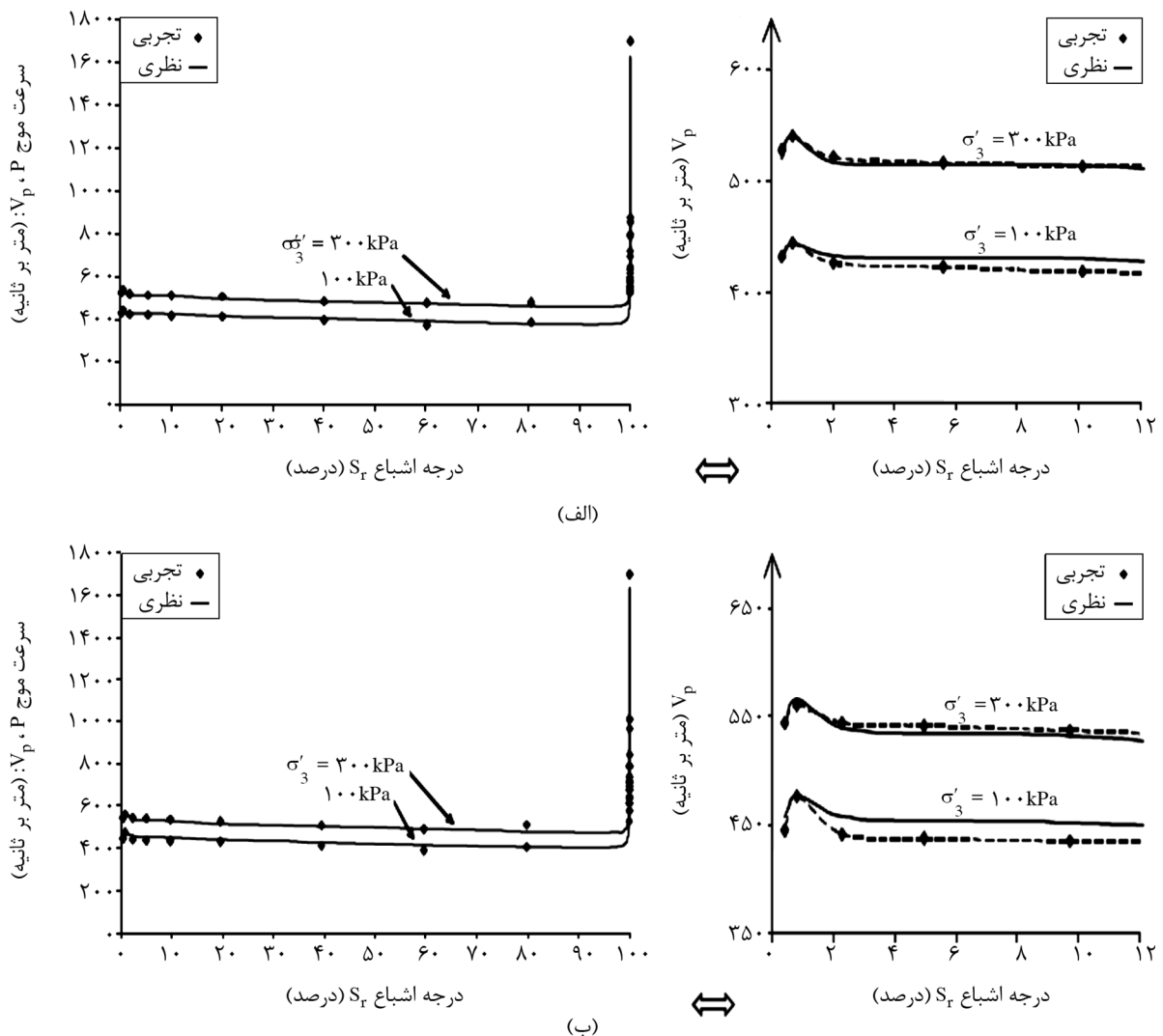


شکل (۷): نمودار تغییرات سرعت امواج فشاری و برشی در مقابل تغییرات درجه‌ی اشباع [۱۴].

رطوبت به خاک طی پنج لایه ساخته می‌شود و توسط بندر المنت تغییرات ویژگی‌های دینامیکی خاک ماسه‌ای با درجه‌ی اشباع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در اینجا به تغییرات سرعت موج فشاری با تغییر درجه‌ی اشباع اشاره می‌شود.

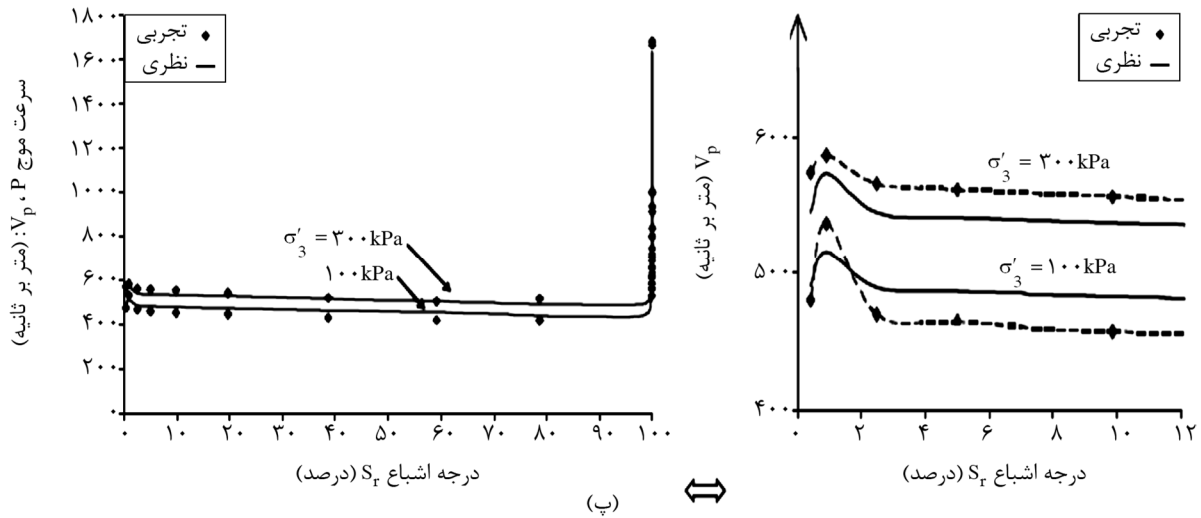
در تحقیقات سه نوع خاک ماسه‌ای با دانسیته‌ی نسبی و فشار همه‌جانبه‌ی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. کومار به این نتیجه رسید که با افزایش درجه‌ی اشباع سرعت موج فشاری کاهش می‌یابد تا اینکه در نزدیکی درجه‌ی اشباع ۱۰۰ درصد افزایش ناگهانی سرعت موج فشاری دیده می‌شود. این موضوع در شکل (۸) نمایش داده شده است [۱۵].

کومار و مدهوسودهان در سال ۲۰۱۲ [۱۵] به بررسی خصوصیات دینامیکی یک خاک ماسه‌ای در حالت خشک و اشباع پرداخت. جهت انجام این تحقیق نمونه‌هایی با دانسیته‌ی نسبی مشخص به قطر ۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر ساخته شده است. نمونه‌ها طی پنج مرحله با ارتفاع سقوط مشخص با درجه‌ی اشباع مختلف داخل قالب ریخته شده و ساخته می‌شوند. کمترین درجه‌ی اشباع در نمونه‌ها پس از قرارگیری در گرمخانه به علت جذب رطوبت محیط در حدود  $S=0/34\%$  تا  $S=0/42\%$  بودند. در این مجموعه آزمایش‌ها محدوده تغییرات درجه‌ی اشباع به دو قسمت کوچک‌تر از  $2/5$  و بزرگ‌تر از آن تقسیم‌بندی شده است. برای درجه‌ی اشباع بزرگ‌تر از  $2/5$  نمونه‌ها با افزودن



شکل (۸): نمودارهای تغییرات سرعت امواج فشاری در مقابل درجه‌ی اشباع با دانسیته‌ی نسبی متفاوت ((الف):  $40\%$ ، (ب)  $60\%$  و (پ)  $80\%$  [۱۵].

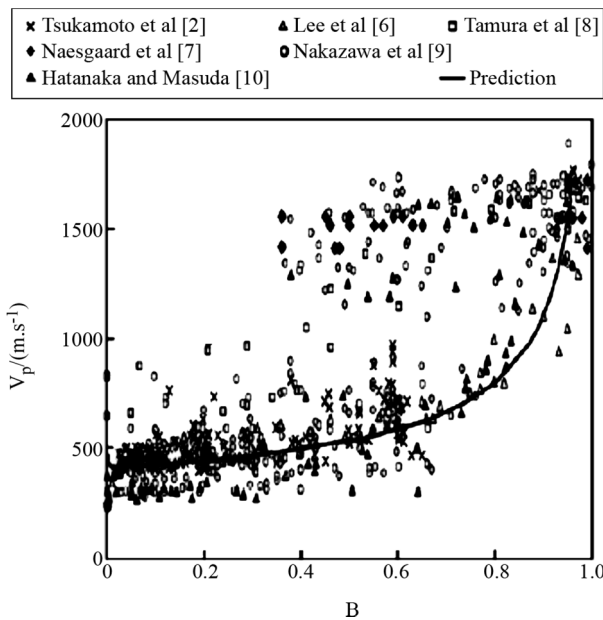




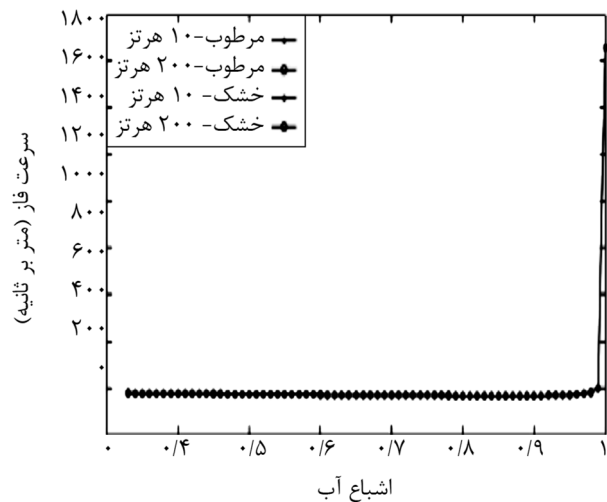
ادامه شکل (۸)

رابطه‌ی درجه‌ی اشباع و ضریب  $B$  به نحو غیر مستقیم و از جنبه‌ی دیگر به موضوع تغییرات سرعت موج فشاری و تغییرات درجه‌ی اشباع پرداخته شده است. در واقع ضریب  $B$  به‌طور معمول درجه‌ی اشباع را کنترل می‌کند. روابط ارائه شده برای ضریب اسکمپتون و سرعت موج فشاری که در قالب نمودار شکل (۱۰) نمایش داده می‌شود نشان می‌دهد با افزایش ضریب اسکمپتون که در اثر افزایش درجه‌ی اشباع بیشتر شده است افزایش سرعت موج فشاری مشاهده می‌شود.

لو و اسپوزیتو در سال ۲۰۱۳ [۱۶] به توسعه‌ی روابط تئوری ارائه شده توسط بیو-گاسمن و ویلیس پرداختند. تغییرات موج فشاری اول با درجه‌ی اشباع در شکل (۹) نمایش داده شده است. روابط ارائه شده با یک خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت که با افزایش درجه‌ی اشباع کاهش سرعت موج فشاری تا نزدیکی درجه‌ی اشباع ۱۰۰٪ دیده می‌شود. گو و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۱۷] به مطالعه‌ی رابطه‌ی بین سرعت امواج فشاری و ضریب اسکمپتون ( $B$ ) پرداخته است. در مطالعات قبلی رابطه‌ی سرعت امواج فشاری و درجه‌ی اشباع مورد بحث واقع شد. در اینجا با توجه به



شکل (۱۰): تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل ضریب اسکمپتون [۱۷].



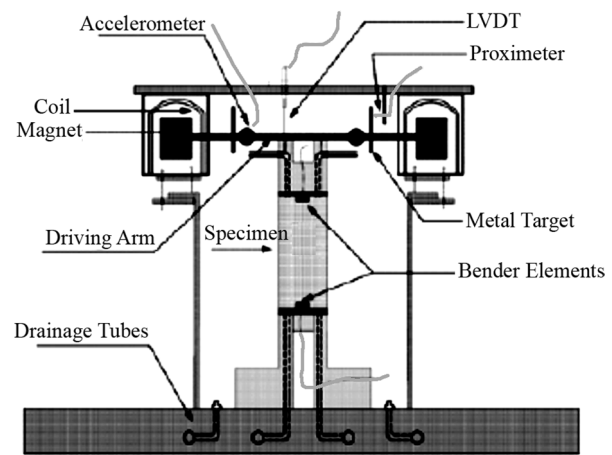
شکل (۹): تغییرات سرعت موج فشاری نوع اول در مقابل درجه‌ی اشباع [۱۶].

آنها نتیجه گرفتند که خصوصیات امواج فشاری در شرایط خشک و اشباع متفاوت است. در حالت اشباع سرعت موج  $p$  به دو حالت تند و کند تقسیم می‌شود که در حالت تند مستقل از تنش همه‌جانبه می‌باشد. رابطه‌ی بین سرعت امواج فشاری و ضریب  $B$  تطابق کامل با پیش‌بینی‌های تئوری ندارد که می‌تواند بر اثر این موضوع باشد که در پیش‌بینی‌های تئوری توزیع ترکیب آب‌وهوا به‌صورت همگن در نظر گرفته می‌شود و اینکه در حالت واقعی به‌صورت موضعی تجمع حباب هوا وجود دارد و نیز در حالت واقعی امواج تمایل دارند از مسیری که دارای سختی بیشتر است عبور کنند [۱۷].

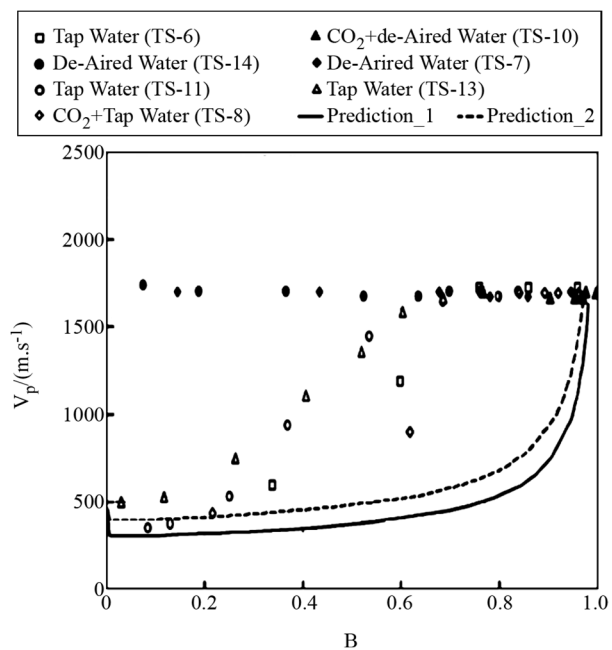
کاراکول و اولوسی در سال ۲۰۱۳ [۱۸] با یک سری آزمایش قصد داشتند که خصوصیات مقاومتی سنگ را از روی سرعت موج فشاری در درجه‌ی اشباع‌های متفاوت به دست آورد. در این آزمایش‌ها تغییرات سرعت موج فشاری در اثر تغییر درجه‌ی اشباع بر روی ۱۴ نمونه سنگ با نسبت رس و پوکی متفاوت توسط آنها بررسی شد. لازم به ذکر است برای اندازه‌گیری سرعت موج فشاری از دستگاه التراسونیک استفاده شده است. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است. در ضمن تفاوت سرعت موج فشاری در حالت خشک و اشباع مد نظر قرار گرفته است.  $\Delta V_p$  تفاوت سرعت موج فشاری حالت اشباع و خشک است. با توجه به نوع سنگ مورد استفاده همان‌طور که قبلاً با افزایش درجه‌ی اشباع افزایش سرعت موج فشاری رخ می‌دهد اما در این نوع آزمایش‌ها این موضوع در کل نمونه‌ها مشاهده نشده است. به‌عنوان مثال در ماسه سنگ (نمونه ۱۲) ۴۲٪ افزایش و در توف (نمونه ۶) ۳۰/۸۷٪ کاهش دیده می‌شود.

عشایی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۱۹] به مطالعه‌ی تئوری انتشار امواج در خاک‌های غیر اشباع پرداختند. در چند حالت با کاهندگی و بدون کاهندگی در فرکانس‌های مختلف روابط را توسعه دادند و در نهایت به مطالعه‌ی

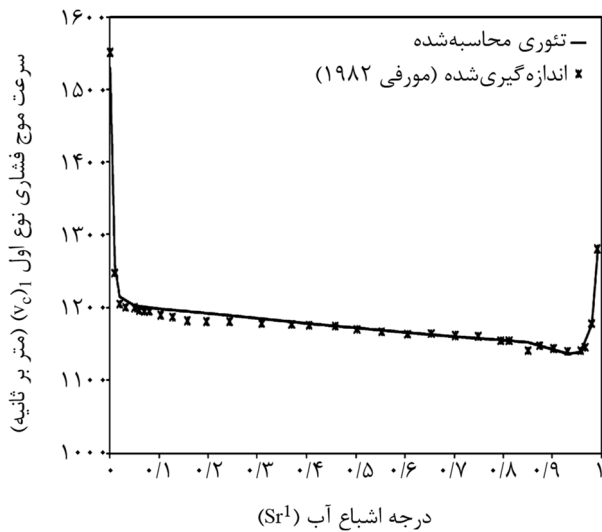
گو و همکارانش [۱۷] با استفاده از بندر المنت که با ستون تشدید ترکیب شده بود بر روی نمونه‌هایی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بر روی یک خاک دانه‌ای (ماسه‌ای) به بررسی رابطه‌ی سرعت موج فشاری و ضریب  $B$  پرداختند. دستگاه آزمایش در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۲) نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های تئوری که برای دو نوع تنش همه‌جانبه ۲۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال می‌باشند نشان داده شده است.



شکل (۱۱): دستگاه آزمایش ستون تشدید ترکیب شده با بندر المنت [۱۷].



شکل (۱۲): مقایسه‌ی پیش‌بینی تئوری و آزمایشگاهی تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل تغییرات ضریب اسکمپتون [۱۷].

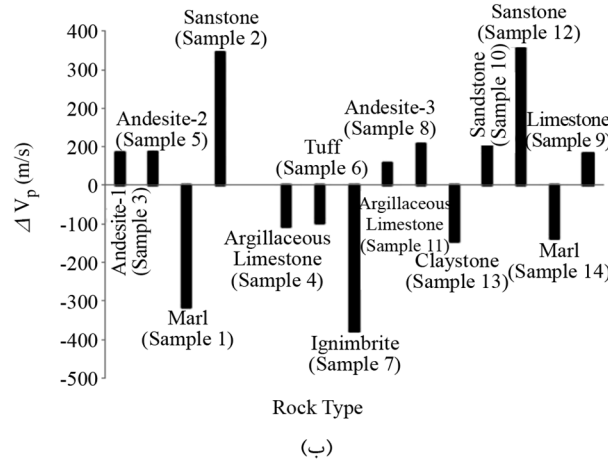
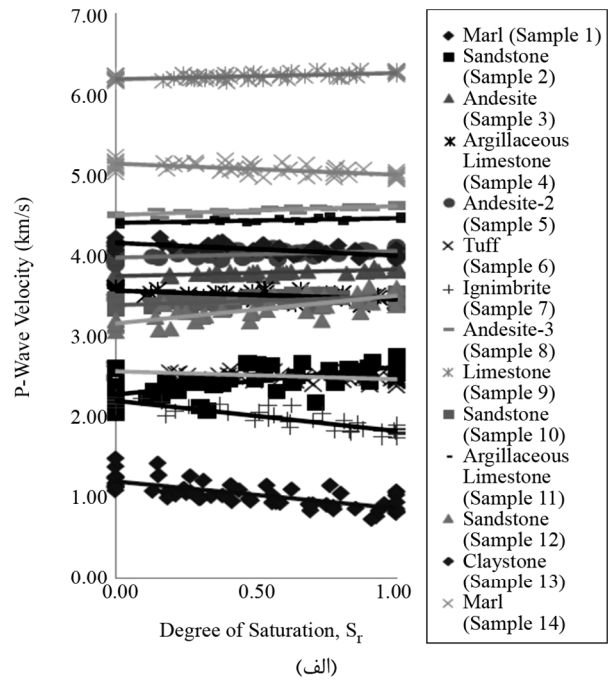


شکل (۱۴): تغییرات سرعت موج فشاری نوع اول در مقابل تغییرات درجه‌ی اشباع [۱۹].

سرعت امواج در آزمایشگاه و در دمای کنترل‌شده‌ی اتاق توسط دستگاه التراسونیک در فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز صورت گرفته است. نمونه‌های تحت آزمایش دارای قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر بودند که نتایج آن در جدول (۲) نمایش داده شده است.

کساب و ولر در سال ۲۰۱۵ [۲۰] ۴۲ نمونه ماسه سنگ را در منطقه‌ی مصر در خصوص مطالعه‌ی سرعت امواج فشاری و برشی مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌های سرعت امواج در آزمایشگاه و در دمای کنترل‌شده‌ی اتاق توسط دستگاه التراسونیک در فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز صورت گرفته است. نمونه‌های تحت آزمایش دارای قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متر بودند که نتایج آن در جدول (۲) نمایش داده شده است.

اندازه‌گیری سرعت موج فشاری در حالت خشک از ۲۲۸۹ تا ۳۳۹۱ متر بر ثانیه تغییر می‌کند که دارای میانگین ۲۷۶۶ متر بر ثانیه بوده و انحراف معیار آن ۳۰۸ متر بر ثانیه است. در حالت تر دیده می‌شود که سرعت موج فشاری از ۲۵۲۸ تا ۳۵۷۲ متر بر ثانیه تغییر می‌کند و دارای میانگین ۲۹۵۰ متر بر ثانیه و انحراف معیار ۲۴۲ متر بر ثانیه است.



شکل (۱۳): نمودارهای تغییرات سرعت موج فشاری در مقابل تغییرات درجه‌ی اشباع (a) و اختلاف سرعت انتشار امواج فشاری در حالت تر و خشک [۱۸].

عددی خاکی ماسه‌ای با استفاده از روابط به‌دست‌آمده پرداختند. تغییرات سرعت موج فشاری نوع اول در مقابل درجه‌ی اشباع برای یک نوع خاک ماسه‌ای در شکل (۱۴) نمایش داده شده است؛ که با افزایش تدریجی درجه‌ی اشباع کاهش سرعت موج فشاری مشهود است ولی در نزدیکی درجه‌ی اشباع ۹۶ درصد و بالاتر افزایش سرعت وجود دارد. کساب و ولر در سال ۲۰۱۵ [۲۰] ۴۲ نمونه ماسه سنگ را در منطقه‌ی مصر در خصوص مطالعه‌ی سرعت امواج فشاری و برشی مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری‌های

جدول (۲): تغییرات سرعت موج فشاری در حالت خشک و تر [۲۰].

شماره نمونه	سرعت موج فشاری در حالت خشک (متر بر ثانیه)	سرعت موج فشاری در حالت مرطوب (متر بر ثانیه)
۱	۲۷۱۸/۵	۲۷۷۵
۲	۲۸۱۹/۵	۳۱۵۷
۳	۳۳۹۰/۵	۳۴۲۷
۴	۳۳۱۲	۳۵۷۲
۵	۲۴۰۲/۵	۲۵۹۳
۶	۲۳۹۱/۵	۲۶۱۱
۷	۲۲۸۸/۵	
۸	۲۴۰۴	۲۸۸۱
۹	۲۶۴۹	۳۰۸۶
۱۰	۲۵۸۱/۵	۲۸۸۹
۱۱	۲۴۴۵	۲۶۰۶
۱۲	۲۴۲۲/۵	
۱۳	۲۶۳۹/۵	
۱۴	۲۶۴۵	۲۸۸۵/۹
۱۵	۲۹۶۲/۵	۳۰۳۵
۱۶	۲۶۱۹/۵	۲۸۸۹
۱۷	۲۹۵۲/۵	۲۹۱۲
۱۸	۲۹۹۲	۲۸۸۱
۱۹	۲۹۷۹	۳۰۶۰
۲۰	۲۶۰۷/۵	۲۶۶۸
۲۱	۲۷۴۳/۵	۲۷۹۴
۲۲	۲۹۹۸	۲۸۷۳
۲۳	۲۴۸۰	۲۸۴۰
۲۴	۲۶۰۰/۵	۲۶۴۶
۲۵	۲۷۱۲	۲۷۷۲
۲۶	۲۹۵۲	
۲۷	۲۸۸۷/۵	
۲۸	۳۲۸۶	۳۱۴۲
۲۹	۲۷۸۶/۵	۳۰۶۱
۳۰	۲۵۲۵/۵	۲۹۹۳
۳۱	۲۳۲۶	۲۸۵۵
۳۲	۳۱۹۲	۳۲۰۱
۳۳	۳۱۱۸/۵	۳۰۹۵
۳۴	۳۲۷۷	۳۲۷۳
۳۵	۲۴۰۵	۲۵۲۸
۳۶	۲۲۹۸/۵	
۳۷	۲۹۲۳	۳۱۶۴
۳۸	۲۸۵۰	۲۸۶۶
۳۹	۲۹۵۰	
۴۰	۳۳۶۵/۵	۳۳۳۴
۴۱	۲۵۲۵/۵	
۴۲	۲۷۵۶	۲۹۸۴

#### ۴- نتیجه گیری

در بررسی تحقیقات انجام شده که شامل ۹ محیط خاکی و ۶ محیط سنگی بود ملاحظه می شود آزمایش ها و روابط تئوری در محیط های خاکی در خاک های ماسه ای بوده و در بررسی های آزمایشگاهی از حسگر ژئوفون، بندر المنت و ترکیبی از بندر المنت و ستون تشدید استفاده شده بود که در تمام حالات با افزایش درجه ای اشباع ابتدا سرعت موج فشاری کاهش می یابد و بعد از درجه ای اشباع حدود ۹۹ درصد افزایش ناگهانی در سرعت انتشار رخ می دهد. این افزایش ناگهانی با در نظر گرفتن ماهیت موج فشاری که با تراکم محیط انتشار پیش می رود قابل درک است زیرا وقتی که به درجه ای اشباع ۱۰۰ درصد نزدیک می شود محیط به سمت محیطی تراکم ناپذیر حرکت می کند که خود باعث ظهور ناگهانی افزایش سرعت می شود. در محیط های سنگی که اکثر آزمایش ها با استفاده از دستگاه التراسونیک انجام گرفته بود در مواردی که پوکی سنگ بالا و مقاومت پایین وجود دارد مثل سنگ های توفی و نیز نرم شدگی با اشباع شدن در سنگ رخ می دهد؛ رفتاری همانند محیط های خاکی از آنها مشاهده می شود و علت این کاهش با دقت در رابطه (۱) قابل درک است به این شکل که مدول برشی تحت تأثیر اشباع شدگی قرار نمی گیرد. از طرفی آهنگ افزایش مدول حجمی تا درجه ای اشباع حدود ۹۹ درصد بیشتر از آهنگ افزایش مدول بالک می باشد که باعث کاهش سرعت موج فشاری می گردد. در محیط های سنگی با پوکی کم و مقاومت بالاتر آهنگ افزایش مدول بالک بیشتر از مدول حجمی است که باعث می شود با افزایش درجه ای اشباع سرعت انتشار موج فشاری در این محیط ها افزایش یابد. تغییرات سرعت امواج فشاری در خاک های ریزدانه (رسی) در اثر تغییر درجه ای اشباع نیاز به بررسی و توجه بیشتری دارد که در این خصوص کار زیادی انجام نشده است و جای آن در بین پژوهش های انجام شده خالی است.

## مراجع

- Transactions on Instumntion and Measurement*, **58**(2).
13. Brutsaert, W. (1964) The propagation of elastic waves in unconsolidated granular mediums. *J. Geophys. Res.*, **69**, 243-257.
  14. Albers, B. (2011) linear elastic wave propagation in unsaturated sands, silts, loms and clays. *Transport in Porous Media*, **86**(2), 537-557.
  15. Kumar, J. and Madhusudhan, B.N. (2012) Dynamic properties of sand from dry to fully saturated states, *Geotechnique*, **62**(1), 45-54.
  16. Lo, W.C. and Sposito, G. (2013) Acoustic Wave in unsaturated soils. *Water Resources Research*, **49**, 5674-5684.
  17. Gu, X-Q., Yang, J., and Huang, M-S. (2013) Laboratory investigation on relationship degree of saturation, B-value and P-wave velocity. *J. Cent. South Univ.*, **20**, 2001-2007.
  18. Karakul, H. and Ulusay, R. (2013) Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mech. Rock Eng.*, **46**, 981-999.
  19. Ashayeri, I., Biglary, M., and Kamalian, M. (2014) Theory of seismic wave propagation for unsaturated soils. *Academy publish.org-wave propagation*, 513-539.
  20. Kassab, M. and Weller, A. (2015) Study on P-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, **24**, 1-11.
  1. زارع، مهدی (۱۳۸۴) مقدمه‌ای بر زلزله‌شناسی کاربردی. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
  2. Gassman, F. (1951) Elastic waves through a packing of spheres. *Geophysics*, **16**, 673-685.
  3. Biot, M.A. (1956) Theory of propagation of elastic wave in fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**(2), 168-178.
  4. Biot, M.A. 1956. Theory of propagation of elastic wave in fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.*, **28**(2), 179-191.
  5. Emerson, M. and Foray, P. (2006) Laboratory P-wave measurements in dry and saturated sand. *Acta Geotechnic*, **1**, 167-177.
  6. Bachrach, R. and Nur, A. (1998) High- resolution shallow -seismic experiments in sand, part 1: water table, fluid flow, and saturation. *Geophysics*, **63**(4), 1225-1233.
  7. Geertsma, J. and Smit, D. (1961) Some aspect of elastic wave propagation in fluid- saturation porous solids. *Geophysics*, **26**(2), 169-181.
  8. Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W. (1956) Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Eophysics*, **21**, 41-70.
  9. Gergory, AR. (1976) Fluid saturation effect on dynamic elastic properties of sedimentary rocks. *Geophysics*, **41**, 721-895.
  10. Kahraman, S. (2007) The correlations between the saturation and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonic*, **46**, 341-348.
  11. Ghorbani, A., Zamora, M., and Cosenza, P. (2009) Effect of desiccation on the elastic wave velocities of clay-rocks. *International Journal of Rock Mechanic*, **46**, 1267-1272.
  12. Adamo, F., Attivissimo, F., Fabbiano, L., Giaquinto, N., and Spadavecchia, M. (2009) velocity moisture relationships for sandy soil: experimental results and data analysis. *IEE*