

## why do we care about sound wave propagation under water

چون صدا در زیر آب با سرعت بیشتری از هوا حرکت می کند و از این خاصیت می توان برای ارتباطات زیر آبی استفاده کرد  
امواج الکترومغناطیسی در زیر آب به دلیل جذب بالای آنها در آب کارایی کمتری دارند به حدی که نور خورشید به عمق 200 متری آب نمی تواند برسد

صدا میتواند در همه جهات حرکت کند و از این جهات میتوان از ان برای دریافت اطلاعات از محیط زیر آبی استفاده کرد  
تقریباً همه تجهیزات متحرک صدا ایجاد میکنند پس بر خلاف رادار های عادی نیازی به ارسال سیگنال اولیه و دریافت سیگنال بازتابی ندارند و از این جهت میتوانند برای ساخت رادارهایی که در زیر آب کار میکنند استفاده شوند

## sound speed profile in water

سرعت حرکت صدا در آب به دما شوری و عمق آب بستگی دارد و به طور خلاصه میتوان از فرمول زیر برای محاسبه سرعت که در  $c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D$  صدا در آب استفاده کرد  
عمق آب به متر: D: شوری آب به گرم در کیلوگرم اب: S: دمای آب به درجه سانتی گراد: T: سرعت صدا در آب: c: آن:

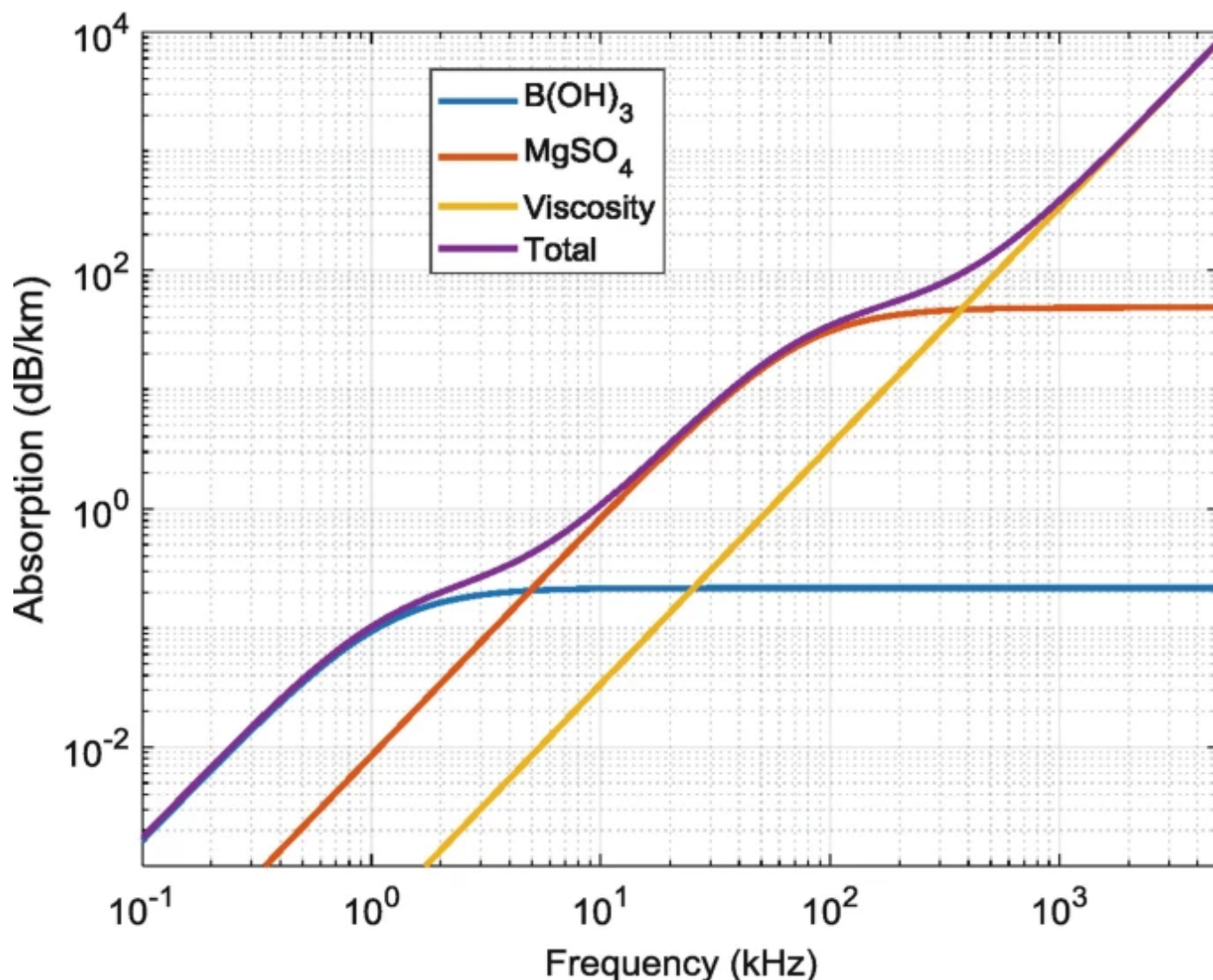
علازقم فرمول بالا برای سادگی بهتر است سرعت متوسط صدا در آب را برابر با 1500 متر بر ثانیه در نظر بگیریم و از تقریب های زیر استفاده کنیم به ازای هر درجه افزایش دما سرعت صدا در آب 4.6 متر بر ثانیه افزایش می یابد به ازای هر درجه افزایش شوری سرعت صدا در آب 1.34 متر بر ثانیه کاهش می یابد و به ازای هر متر افزایش عمق سرعت صدا در آب 0.016 متر بر ثانیه افزایش می یابد

## sound wave attenuation in water

پیشتر ادعا کردیم که امواج صوتی به سبب جذب کمتر کاربرد بهتری در اب دارند فرمول زیر برای محاسبه کاهش انرژی امواج  $\alpha = \frac{f_1 * f^2}{f_1^2 + f^2} e^{\frac{pH-0.8}{0.56}} + 0.52 (1 + \frac{T}{43}) \frac{S}{35} \frac{f_2^2}{f_2^2 + f^2} e^{\frac{-d}{6}} + 4.910^{-4} f^2 e^{\frac{T}{27} + \frac{d}{17}}$  می شود  
متغیرهایی که در فرمول قبلی توضیح: S, D, T: کاهش انرژی امواج صوتی در آب به دسی بل:  $\alpha$ : که در آن  $\alpha$   $0.78 (\frac{S}{35})^{0.5} e^{\frac{T}{26}}$   $f_1$ : فرکانس امواج صوتی به کیلو هرتز: f: اسیدیته آب: pH: داده شدند

$f_2$ :  $42 e^{\frac{T}{17}}$  که فرمول نسبتاً سنگینی است و بهتر است از تغرب زیر بر فرکانس های بالا استفاده کنیم  $\alpha = 0.78 + 0.52 (1 + \frac{T}{43}) \frac{S}{35} + 4.9 * 10^{-4} f^2 e^{\frac{T}{27} + \frac{d}{17}}$  واضح است که  
که برای فرکانس های بالا چند ده کیلو هرتز اتلاف بسیار بالا بوده و از این جهت با مشکل کمبود پهنای باند مواجه هستیم

اما در فرکانس های پایین که معمولاً مورد استفاده هستند عموم اتلاف به دلیل ویسکوزیته اب و دو نمک غالب ان یعنی  $B(OH)_3$  و  $MgSO_4$  است که این اتلاف ها را با استفاده از نمودار زیر میتوان یافت



### sound wave's propagation loss

واضح است که همانند همه امواج شدت امواج صوتی با فاصله از منبع آن کاهش میابد اگر منبع را در اب به گونه ای غوطه ور کنیم که بتوان از تاثیر بازتابش سطح های بالایی و پایینی اجتناب کرد میتوانیم از فرمول اشنای پخش کروی توان

$$PL = 20\log\left(\frac{r}{1m}\right)$$

استفاده کنیم

اما اگر بازتاب سطح های بالا و پایین را در نظر بگیریم و از فاصله با آنها نیز صرف نظر کنیم میتوانیم صرفا انتشار را در

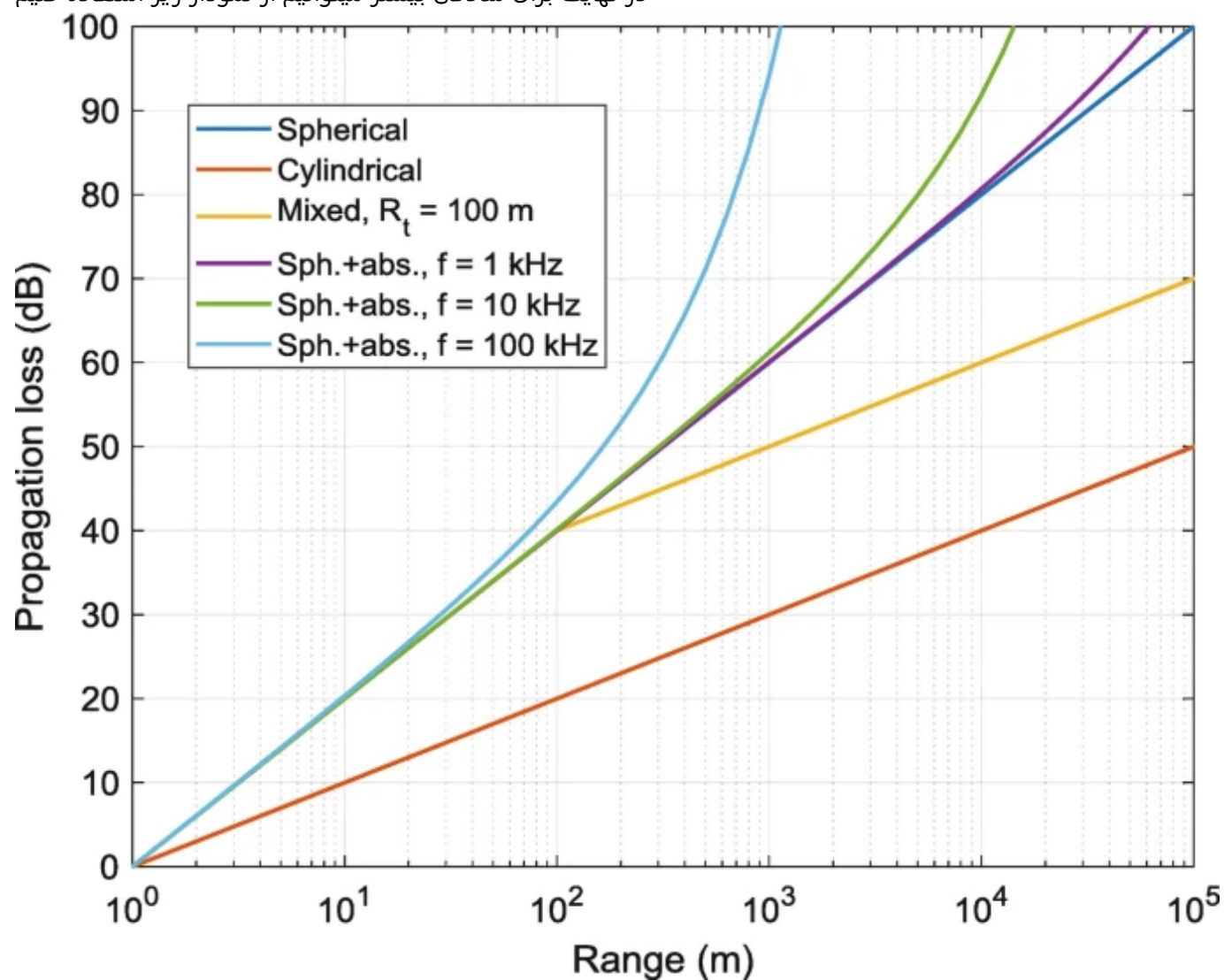
$$PL = 10\log\left(\frac{r}{1m}\right)$$

سطح در نظر بگیریم و از فرمول پخش اسطوتوانه ای بهره ببریم

که البته این فرمول بسیار دور از واقعیت است و کاربرد کمی دارد در واقعیت بهتر است از شرایطی بین این دو حالت استفاده کنیم چرا که در فاصله های کم فرمول اول دقیق تر بوده و در فواصل بالا فرمول دوم دقیق تر است ما فاصله ای را به عنوان مرز تغییر فورمولاسیون در نظر میگیریم که در قبل ان شرایط اول صادق باشد و در بعد ان شرایط دوم صادق باشد ولی در حدود ان هیچ کدار از فرمول ها دقیق نیستند

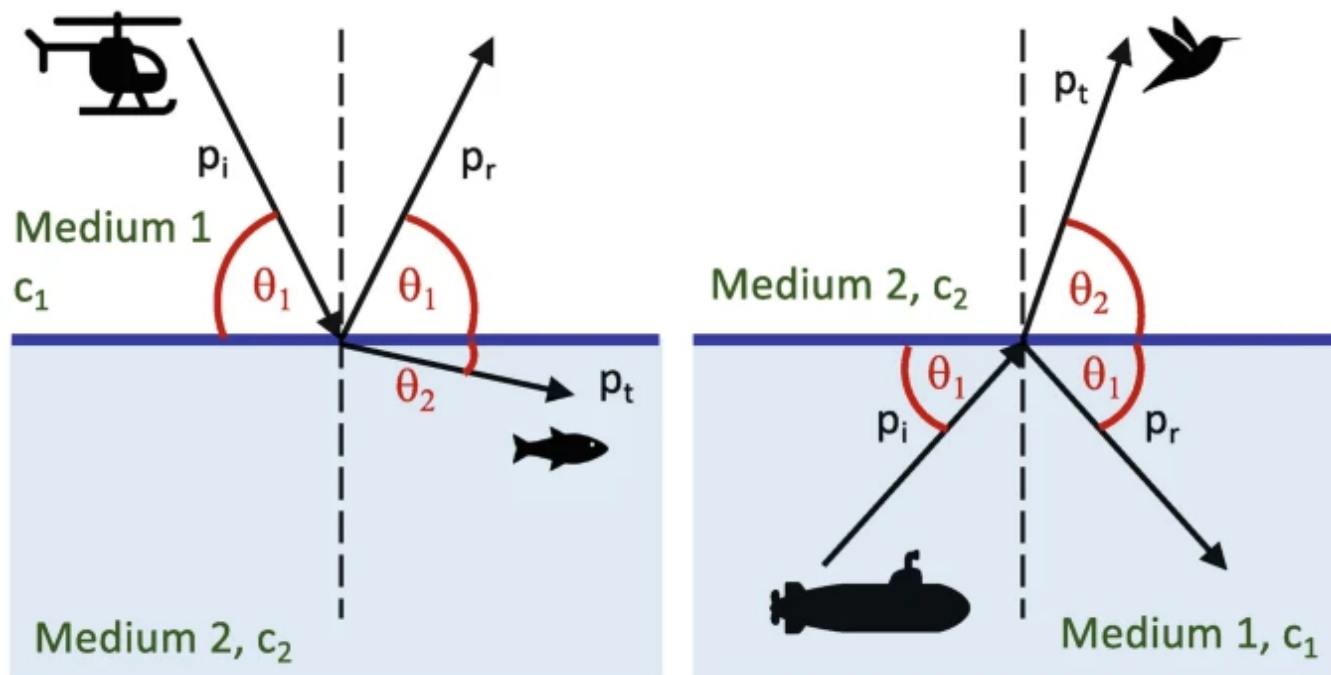
فاصله مرزی بین دو فرمول است که در اب :  $r_t$  که در آن  $PL = 20\log\left(\frac{r_t}{1m}\right) + 10\log\left(\frac{r-r_t}{1m}\right)$  های کم عمق میتوان انرا برابر عمق اب در نظر گرفت اما این مرز باید با توجه به شرایط محیطی تعیین شود چرا که رفتار صوت در سطح و کف ممکن است بسیار پیچیده باشد بهترین روش برای انتخاب فاصله مرزی استفاده از روش های عددی و یا اندازه گیری های تجربی در هر محیط است که در هر حالت نیاز به این فرمول و اندازه گیری فاصله مرزی و مشکلات ذاتی ان از بین میرود

در نهایت برای سادگی بیشتر میتوانیم از نمودار زیر استفاده کنیم



#### air water interface

واضح است که انتقال امواج صوتی از آب به هوا و بالعکس اتفاق میافتد ولی معمولاً مطلوب ما نیست و باعث اتلاف است



به طور معمول با برخورد موج به سطح اب با انعکاس و گذر کردن ان مواجه هستیم و برای محاسبه مقادیر انها ار روابط

$$R = \frac{Z_2 \sin(\theta_1) - Z_1 \sin(\theta_2)}{Z_2 \sin(\theta_1) + Z_1 \sin(\theta_2)}$$
$$T = \frac{2 Z_2 \sin(\theta_1)}{Z_2 \sin(\theta_1) + Z_1 \sin(\theta_2)}$$

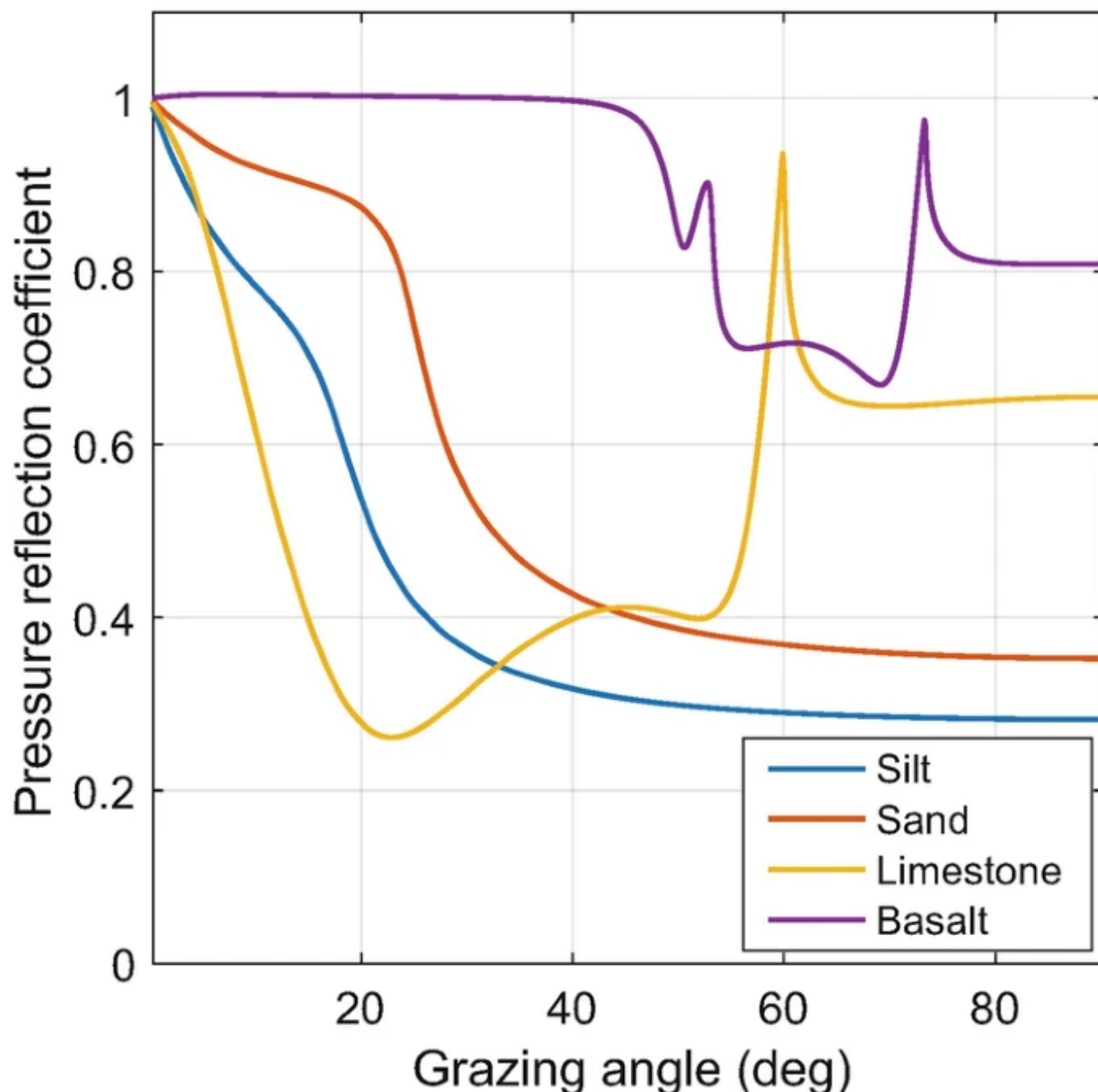
زاویه خراش یا  $\theta_2$  و  $\theta_1$  مقاومت امپدانی هوا و اب هستند و  $Z_1$  و  $Z_2$  که در ان  $Z = \rho \cdot c$  زاویه ورود هستند

[illegible]

که به معنی بازتاب تقریباً کامل  $T = \frac{Z_2 \sin(\theta_1)}{Z_2 \sin(\theta_1) + Z_1 \sin(\theta_2)} \approx 0$  موج غیر از مواردی که زاویه خراش بسیار کم باشد و موج تقریباً به طور افقی به سطح اب برخورد کند البته این بازگشت کامل با اختلاف فازی 180 درجه است که به این معنی است که موج بازگشتی با موج اولیه یکدیگر را خنثی میکنند و از بین میرود و به همین دلیل سطح اب را ناحیه تخلیه فشار یا مرز نرم مینامند

## seabed interface

به طور معمول خواص صوتی کف زمین همانند آب است به همین دلیل بخش بزرگی از صدا به داخل زمین نفوذ میکند اما در فرکانس های پایین در حد کمتر از چند کیلوهرتز بخش قابل توجهی از صدا به دلیل ساختار لایه ای زمین بازتاب میشود و به همین دلیل برای کشف منابع نفتی و گازی از این خاصیت استفاده میشود در نمودار زیر میتوانید میزان بازگشت صوت برای چهار سطح متداول را به صورت تابعی زاویه خراش را مشاهده کنید



با توجه به تشکیل زمین از محیط های چند لایه و غیر خطی همانطور که بالا تر نیز اشاره شد انعکاس صوت به آب به صورت تابعی از زاویه خراش و فرکانس و شکل سطح و حتی مکان است علاوه بر این که امروزه نرم افزار هایی برای محاسبه این انعکاس ها با روش های تحلیلی و عددی وجود دارد اما با کشش بزرگ تری که کم بود اطلاعات ما از سطوح زیرین زمین است روبه روییم

### numerical modeling

برای مدل کردن انتشار صوت به طور کلی به حل معادل موج صوتی نیاز داریم که در اینجا به صورت زیر است  

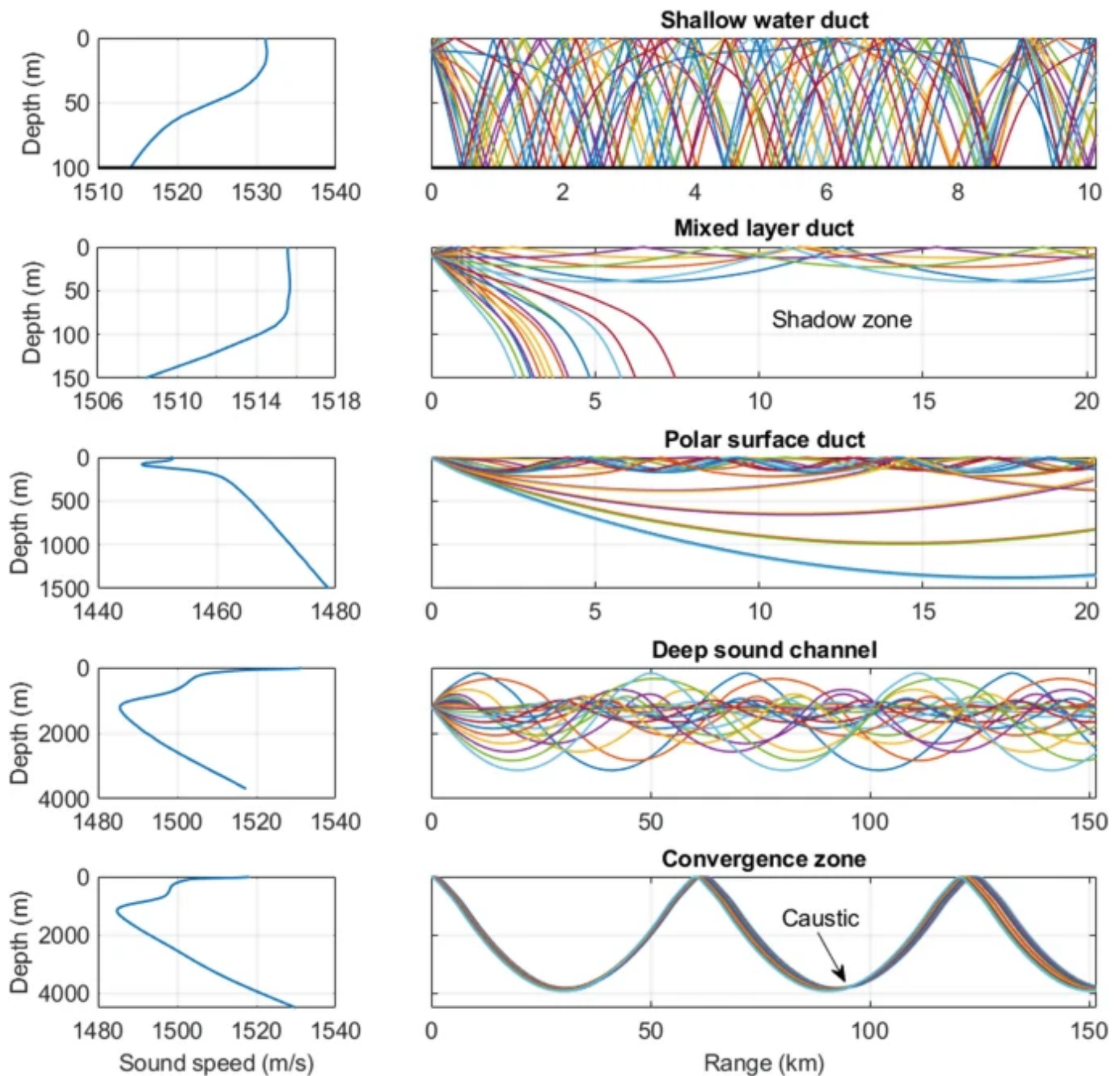
$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$
 که در آن  $\phi$  فشار صوتی و  $c$  سرعت فشار صوتی و  $\nabla^2$  لاپلاس است. این معادله با دو مشکل رو به روییم

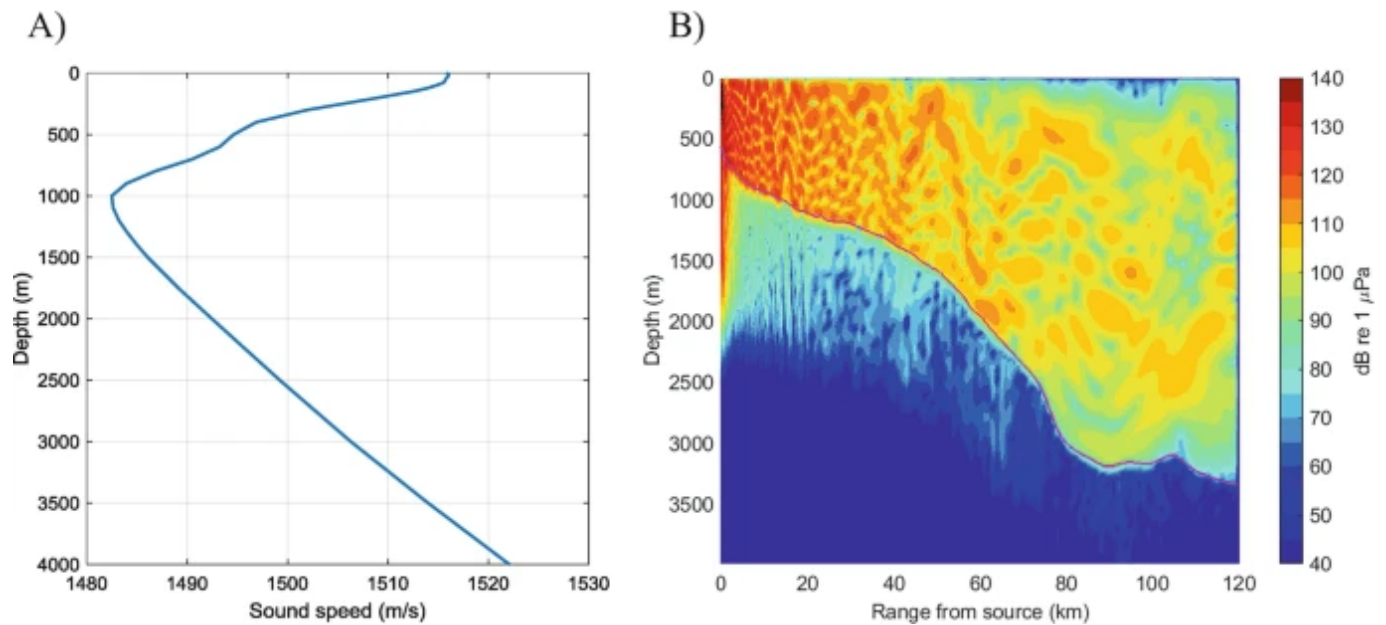
1. محیط مورد نیاز برای جواب این مسئله بسیار بزرگ تر از طول موج است و روش های مستقیم حل همچون finite difference و finite element



که شامل تقسیم محیط به مش های کوچک تر و حل معادله در هر مش هستند برای محیط های بزرگ حتی برای کامپوتر های امروزی نیز کاربردی نیستند 2. اطلاعات ما از شرایط مرزی بسیار کم است و از طرفی این شرایط مرزی بسیار پیچیده استفاده میشود که به دلیل پیچیدگی helmholtz equation و ray tracing هستند برای حل این مشکلات از روش هایی مانند بیشتر در اینجا به توضیح آنها پرداخته خواهد شد

## ray tracing





a: sound speed profile, Modeled received SPL as a function of range and depth at a depth of 50 m emitting a 20-Hz tone with a source level of 189 dB re 1  $\mu$ Pa m. The magenta line is the seafloor