

# جلوگیری از سر و صدای امواج

نویسنده: دانیل بوش<sup>۱</sup>

مترجم: علی افضلی صمدی

ویراستاران: فرج‌الله محمودی، ارسلان شادمان

چگونه می‌توان از تشخیص رادار گریخت؟  
شکل مطلوب دیوار ضد صدا چگونه است؟  
آیا می‌توان تصویرهای سونوگرافی را واضح‌تر کرد؟  
برای دریافت پاسخی رضایت‌بخش، این پرسش‌ها نیاز به تحلیل‌های نظری پیشرفته‌ای دارند.

یک موج چیست؟ شخصی که بتواند در آن واحد پاسخی دقیق و منحصر به فرد به این سؤال بدهد، مسلماً شخص زیرکی است. با وجود این، امواج همه جا حضور دارند و برنامه روزانه تعداد بسیاری از دانشمندان و مهندسان را به خود اختصاص داده‌اند. با عبارتی نسبتاً مبهم ولی حسی، می‌توان گفت موج یعنی انتشار یک سیگنال، یک اغتشاش، در محیطی مناسب و با سرعتی قابل ارزیابی.

مثال‌ها در این مورد فراوانند، مسلماً موج‌های کوچکی که بر اثر پرتاب سنگریزه در سطح آب ایجاد می‌شوند، نمونه‌ای از آن است. در این حالت، آشفتگی که منتشر می‌شود

---

<sup>۱</sup> Bouche, Daniel: *Empêcher les Ondes de faire du bruit*,  
in: L'explosion des mathématiques, SMF et SMAI, Paris, 2002, p. 36-40

مربوط به ارتفاع آب است. فاصله بین دو موج کوچک پیاپی طول موج است، که کمیتی اساسی در تشریح پدیده‌های موجی است. امواج صوتی، تغییرات فشار و چگالی محیط را (که غالباً هوا است) به بازی می‌گیرند، هنگامی که این تغییرات با بسامدهای قابل شنیدن ایجاد می‌شوند. امواج اکوستیک<sup>۱</sup> طبیعت مشابهی دارند که در آن واحد، شامل امواج صوتی و امواج غیرقابل درک به وسیله گوش‌ها هستند. تا زمانی که این امواج در محیطی جامد منتشر می‌شوند، غالباً آنها را امواج کشسان<sup>۲</sup> می‌نامند. امواج زلزله که از درون زمین عبور می‌کنند و زلزله‌نگار آنها را تشخیص داده و ثبت می‌کند، از این نوع هستند<sup>۳</sup>.

امواج الکترومغناطیسی اهمیت ویژه‌ای دارند. در مورد این امواج، تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند در خلاء با سرعتی معادل با سرعت نور منتشر شوند. نور مرئی، فرسرخ‌ها، فرابنفش‌ها، پرتوهای  $X$  و پرتوهای گاما ( $\gamma$ )، امواج ریز<sup>۴</sup>، امواج رادیویی، امواج رادار، تمام این پدیده‌ها امواج الکترومغناطیسی هستند. اختلاف فقط در بسامد و یا در طول موج آنها است<sup>۵</sup>. (در مورد نور مرئی، طول موج کسری از میکرومتر است. برای فرابنفش‌ها و پرتوهای  $X$  و  $\gamma$  باز هم به مراتب کمتر و در حدود چند صد میلیونمتر است. حال آنکه طول موج در مورد امواج رادار و رادیو در حدود چندین سانتی‌متر تا چند صد متر می‌باشد).

مطالعه رفتار امواج نه تنها امکان درک طبیعت اطراف ما را میسر می‌سازد، بلکه ما را بر بسیاری از فنون مسلط نموده و به طریق اولی امکان اختراعات بسیار دقیقی را به ما می‌دهد. رفتار امواج نور مرئی در شناخت مکانیسم همه دستگاه‌های اپتیک از قبیل عدسی دوربین‌های عکاسی، عدسی میکروسکوپ‌ها و عدسی ابزارهای مسافت‌یاب<sup>۶</sup> و غیره دخالت دارند. می‌توان به امواج رادار و کاربرد نظامی آن اندیشید، به تجسم وسایل نظامی که قادر باشند در حد امکان از دید رادار پنهان بمانند و بگریزند. در مورد امواج اکوستیک می‌توان به طراحی تالارهای کنسرت فکر کرد که برای بهینه‌سازی اکوستیک آنها، از مواد ساختمانی جاذب صدا و وسایل فعال ضد صدا استفاده می‌شود (وسایلی که

<sup>۱</sup> Acoustiques

<sup>۲</sup> Elastique

<sup>۳</sup> امواج اکوستیک از خلاء عبور نمی‌کنند.

<sup>۴</sup> Micro-Ondes

<sup>۵</sup> این دو معیار نسبت عکس باهم دارند، هر قدر طول موج بزرگتر باشد بسامد کوچکتر است و برعکس. انرژی موج نیز با طول موج نسبت عکس دارد هر قدر طول موج بزرگتر باشد انرژی موج کمتر است و برعکس. (م)

<sup>۶</sup> appareil de télémétrie

موجب پخش امواج صوتی در جهت مقابل امواج صدای مزاحم باشند تا آنها را خنثی کنند). می‌توان امواج صوتی را در ساختار دستگاه‌های سونوگرافی، سنگ‌شکن کلیه‌ها و یا دستگاه‌های کنترل معایب، بدون بازکردن جسم مورد معاینه (مثلاً تشخیص معایب در قطعات درونی هواپیماها) به کار برد.



شکل ۱. دوک کوچک<sup>۱</sup> یک درون (drone) یعنی هواپیمای کوچکی است که با کنترل از راه دور هدایت می‌شود و به وسیله شرکت‌های هواپیماسازی داسو<sup>۲</sup> ساخته شده است. این دستگاه، از نقطه نظر امواج رادار و سیله‌ای نامرئی است. شکل و مواد تشکیل دهنده آن به نحوی انتخاب شده‌اند که تشخیص آن به وسیله رادار غیرممکن است. این انتخاب بر مبنای محاسباتی بسیار پیچیده و بر اساس انتشار امواج در شرایطی ویژه به دست آمده است. دقت و ظرافت چنین محاسباتی غیرقابل تصور و مبتنی بر پژوهشی جسورانه است.

(کلیشه از هواپیماسازی داسو Dassault Aviation)

### معادلاتی شناخته شده که حل دقیق آنها دشوار است

دیر زمانی است که معادلات تعیین کننده امواج در انواع گوناگون شناخته شده‌اند. از جمله، معادلات مربوط به امواج الکترومغناطیسی بیش از یک قرن پیش، حدود سال‌های ۱۸۷۰ میلادی، به وسیله جیمز کلرک ماکسول اسکاتلندی<sup>۳</sup> ثابت شده‌اند. اما شناخت معادلاتی که مثلاً امواج رادار از آنها پیروی می‌کنند به تنهایی کافی نیست. به عنوان مثال، برای

<sup>۱</sup> Le Petit duc

<sup>۲</sup> Dassault

<sup>۳</sup> James Clerk Maxwell

تشخیص انتشار این موج یا واکنش آن بر روی مانعی که با آن برخورد می‌کند، مانند یک هواپیما یا شیئی ای در فضا که قصد تشخیص و تعیین وضعیت یا سرعت آن را داریم و برگشت بخشی از موج ارسالی به آنتن فرستنده، این معادلات کافی نیستند. در واقع باید قادر به حل این معادلات باشیم، معادلاتی که مجهول آنها میدان موجی یعنی دامنه‌های موج<sup>۱</sup> در هر لحظه و هر نقطه فضا است. این مسأله آنقدرها هم ساده نیست. موضوع مورد بحث معادلات مربوط به مشتقات جزئی است (که در آن دامنه موج به عنوان مجهول همراه با مشتق‌های جزئی آن نسبت به مختصات فضایی و نسبت به زمان دخالت می‌کنند). البته باید معادلات را با شرایط مرزی تکمیل کرد. این معادلات با بیان ریاضی، داده‌های اصلی نظیر میدان موجی در لحظه نخست، شکل مانع و چگونگی رفتار موج بر سطح مانع (بازتاب یا جذب)، چگونگی افت دامنه موج از فاصله بسیار دور نسبت به منبع موج و یا مانع را مشخص می‌کنند.

حل این نوع مسائل که در آن موج به وسیله اشیا<sup>۲</sup> دچار پراش<sup>۲</sup> گردد (منحرف شود، تغییر شکل دهد) پیچیده است. لازمه این کار ابزارهای ریاضی است، که برخی از آنها ساده و از مدت‌ها پیش شناخته شده‌اند، اما برخی دیگر بسیار پیشرفته و در دست تکمیل و توسعه هستند. به طور کلی‌تر مبحث معادلات مشتقات جزئی شاخه‌ای بسیار مهم در ریاضیات است که از دویست سال پیش تا کنون موضوع پژوهش‌های فعال بوده‌اند. به محض اینکه معادلات و شرایط مرزی آنها مشخص شد یکی از نخستین تلاش‌های ریاضیدانان بیان دقیق مسأله و فرمول‌بندی آن با عباراتی دقیق و نشان دادن وجود و در صورت امکان یکتایی جواب معادلات است (در غیر این صورت مفهوم آن این است که مسأله درست طرح نشده و مدل‌سازی آن ناقص بوده است). چنین مطالعه‌ای ممکن است دشوار باشد و گاهی دانش کافی برای پاسخ به آن را نداریم. ولی به هر حال این مطالعه به ما اطمینان خاطر می‌دهد که بیهوده درگیر محاسبات حل مسأله نشویم.

## آنالیز ریاضی اجازه می‌دهد مسأله با دقت فرمول‌بندی شود و روش‌های کارآمد حل مسأله ارائه گردد.

مرحله بعدی پیشنهاد روش‌های مؤثر برای حل مسأله مورد نظر با دقت کافی است. راه‌حلی به اصطلاح تحلیلی که در آن به کمک فرمول‌های فشرده، به نتیجه‌ای دقیق و کلی

<sup>۱</sup> Amplitude

<sup>۲</sup> diffraction

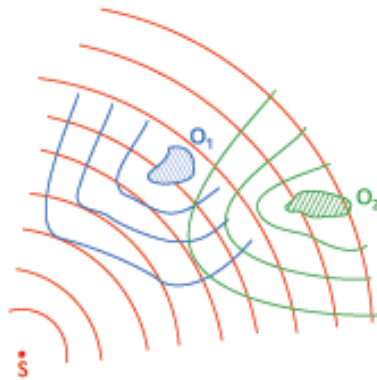
برسد، جز در حالت‌های استثنائی و بسیار ساده، عموماً خارج از دسترس است. پژوهشگر علمی یا مهندس مجبور است به حل عددی معادله مورد بحث بسنده کند و به دلیل حجم زیاد محاسبات اجرای آن را به رایانه بسپارد و نهایتاً جواب مسأله را به شکل مقادیر عددی قابل قبول با تقریب به دست آورد. دشواری‌های مهمی نیز در اینجا پدیدار می‌شود.

به این ترتیب در مسائلی که به پراش موج<sup>۱</sup> به وسیلهٔ اشیاء می‌پردازد، محیط انتشار غالباً نامحدود است: زیرا موج می‌تواند تا بی‌نهایت انتشار یابد. اما برای اینکه جواب مسأله یکتا باشد، باید شرطی را در نظر گرفت که اصطلاحاً شرایط پرتوافکنی می‌نامند، تا مشخص کند که دامنهٔ موج در حین دور شدن تدریجی چگونه کاهش می‌یابد. در نظر گرفتن این شرط به صورت عددی ساده نیست. یکی از راه‌حل‌های پیشنهاد شده، تبدیل معادله با مشتقات جزئی مورد بحث به یک معادلهٔ انتگرالی است (معادله‌ای که توابع مجهول آن در انتگرال‌هایی ظاهر می‌شود). مزیت این نوع فرمول‌بندی در آن است که شرایط پرتوافکنی را به طور خودبه‌خود رعایت می‌کند.

نخستین برنامه‌های رایانه‌ای برای حل مسأله به کمک معادلات انتگرالی در سال‌های ۱۹۶۰ نوشته شد. این برنامه‌ها محاسبهٔ پراش را فقط در مورد اشیائی امکان‌پذیر می‌ساخت که نسبت به طول موج کوچک باشند؛ وانگهی، از آنجا که این برنامه‌ها از تحلیل ریاضی کافی برخوردار نبود، نتایج به دست آمده غالب اوقات ناهنجار بود. با درک مشکلات موجود و شناختن راه‌حل آنها، در اواخر سال‌های ۱۹۸۰، امکان محاسبهٔ پراش امواج به وسیلهٔ اشیاء بزرگ‌تر از طول موج تابش، با دقتی بهتر فراهم آمد. امروزه پژوهش در قلمروهای مختلفی ادامه دارد، مانند انتخاب فرمول‌بندی انتگرالی سازگار با مسألهٔ مورد نظر و کاربرد روش عددی برای حل معادلات. به ویژه روش‌هایی که به آنها چند قطبی می‌گویند، امکان افزایش قابل توجه حجم مسائل مطرح شده را فراهم می‌آورد. این پژوهش‌ها در به وجود آوردن ابزارهای نرم‌افزاری قابل اطمینان سهیم‌اند. این نرم‌افزارها قادر به محاسبهٔ دقیق میدان موجی پراش یافته به وسیلهٔ اشیایی هستند که اندازهٔ آنها ده‌ها برابر طول موج ارسالی است. این ابزار به ویژه در مورد تشخیص هواپیماهای عظیمی که در میدان دید رادارهایی با طول موجی در ابعاد متری قرار می‌گیرند کاربرد دارند.

---

<sup>۱</sup> diffraction d'onde (wave diffraction)



شکل ۲. یک نمونه ویژه از مسائل انتشار امواج: چشمه تابش‌ها یک موج رادار، نوری، اکوستیک یا غیره را (به رنگ قرمز در شکل) با طول موج کاملاً مشخص منتشر می‌کند. موج بر روی دو مانع مشخص شده در شکل با  $O_1$  و  $O_2$  به صورت جزئی بازتاب می‌کند (به رنگ آبی و سبز در شکل). دامنه‌های امواج ایجاد شده در هر محل که مثلاً به وسیله تشخیص دهنده  $S$  دریافت شده‌اند چیست؟ در حل این مسأله مشکل، باید نوع امواج منتشر شده، طول موج، شکل مانع و مواد ساختاری آن و ... را در نظر گرفت.

یکی از روش‌هایی که با روش تحویل به معادلات انتگرالی رقابت می‌کند، روش حل مستقیم معادلات مشتق جزئی است به این طریق که از شرط پرتوافکنی صرف نظر می‌نماید و محیط انتشار را به شیوه مصنوعی به یک نوع «شرط مرزهای جاذب<sup>۱</sup>» محدود می‌کند: یعنی (به شیوه ریاضی) حضور یک مرز خیالی که جاذب همه موج‌های رسیده به آن است، در نظر گرفته می‌شود. این شرایط مرزهای جاذب، مدتی طولانی مسؤول ظهور پدیده‌هایی مانند بازتاب‌های پارازیتی در راه‌حل‌های عددی بوده و به ویژه در مورد اشیائی که قابلیت پراش دهندگی ضعیف دارند مزاحم نیز بوده‌اند. ولی روش‌های عددی که از شرایط مرزهای جاذب استفاده می‌کنند به نحو قابل ملاحظه‌ای توسعه پیدا کرده است. با توجه به کارهای نظری که به خصوص در آغاز سال‌های ۱۹۹۰ انجام گرفته، در حال حاضر بازتاب‌های پارازیتی این روش‌ها بسیار ضعیف شده است.

هنگامی که اندازه مانع مولد پراش امواج نسبت به طول موج بسیار بزرگ‌تر باشد (مثلاً یک قطره آب به وسیله نور مرئی روشن شده، یا هواپیمایی که به وسیله امواج راداری با

<sup>۱</sup> Condition aux limites absorbantes

طول موج دسیمتری ظاهر شده و غیره.)، روشی نسبتاً ساده تر برای حل مستقیم معادله امواج وجود دارد و آن اپتیک هندسی شناخته شده قدیمی است. در این روش امواج نورانی را به پرتوهایی تشبیه کرده اند که در خط مستقیم و در محیطی مشخص منتشر می شوند و از قوانین ساده بازتاب و شکست که چندین قرن قبل از تدوین معادلات الکترومغناطیسی کشف شده بودند، پیروی می کنند. فیزیکدان‌ها به ویژه آرنولد سمرفلد<sup>۱</sup> (۱۹۵۱ - ۱۸۶۸) سهم بزرگی در تدوین این روش داشته اند. آنها نشان دادند که اپتیک هندسی به نحوی قطعی راه حل مسأله پراش موج را بر روی اشیائی که ابعاد بی نهایت بزرگتری از طول موج دارند بدست می دهد.

ولی در واقع، اندازه اشیاء واقعی بی نهایت نیست: بنابراین اپتیک هندسی با تقریبی نسبتاً مناسب پاسخ می دهد. سپس این روش‌ها به منظور تعیین میدان موج، در نقاطی که اپتیک هندسی کلاسیک آنها را منحصراً به صورت سایه پیش‌بینی می کرد، گسترش و عمومیت داده شدند. این کارها در سال‌های ۱۹۵۰ شروع شد و سپس ادامه یافتند. این پژوهش‌ها امکان در اختیار داشتن ابزارهایی را فراهم آوردند که هر چند دقت آنها کمتر از روش‌های حل عددی مستقیم معادلات مشتقات جزئی است، اما در قلمرو طول موج‌های کوتاه مؤثرند.



شکل ۳. امواج در سطح آب انتشار می‌یابند: حتی تشریح صحیح و دقیق این مسأله عادی روزمره می‌تواند بی‌اندازه مشکل باشد (عکس از Getty Images)

<sup>۱</sup> Arnold Sommerfeld

با وجود تمام این پیشرفت‌ها، تعداد بسیاری از مسائل مربوط به امواج تا کنون به صورت کاملاً رضایت‌بخشی حل نشده‌اند. از جمله در مورد پراش موج به وسیله اشیائی به مراتب بزرگ‌تر از طول موج ولی با اشکال پیچیده و با مشخصات ظریف نسبت به طول موج مسئله چنین است. (از این قبیل است مسئله در مورد یک هواپیما یا یک موشک، هنگامی که شکل آنها با در نظر گرفتن جزئیات در حد ابزارهای کوچکی مانند پیچ و مهره‌ها مطرح باشد و نخواهیم به شمایل کلی آنها اکتفا کنیم). کارهای فراوانی برای انجام دادن پیش‌رو داریم.

دانیل بوش

کمیسریای انرژی اتمی (CEA)

گروه فیزیک نظری کار بسته

شاخه ناحیه ایل - دو - فرانس

### چند مرجع

- Site Internet du project de recherche "Ondes" à l' INRIA:  
<http://www.inria.fr/recherche/equipes/ondes.fr.html>
- G. B. Whitham, *Linear and non-linear waves* (Wiley, 1974).
- D. S. Jones, *Acoustic and electromagnetic waves* (Oxford University Press, 1986).
- J. A. Kong, *Electromagnetic wave theory* (Wiley, 1990).
- E. Darve, "The fast multipole method: numerical implementation", *Journal of Computational Physics*, 160 (1), pp. 195-240 (2000).
- D. Bouche et F. Molinet, *Méthodes asymptotiques en électromagnétisme* (Springer-Verlag, 1994).

Daniel Bouche

CEA (Commissariat à l'énergie atomique),

Département de physique théorique et appliquée,

Direction d'Île -de-France