# مطالعه‌ی طرحی تکنیکی برای اندازه‌گیری دقیق تکانه‌ی امواج گرانشی

**فرزین ناصریان [۱]، علی رجائی [۱]**

[۱] *دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان*

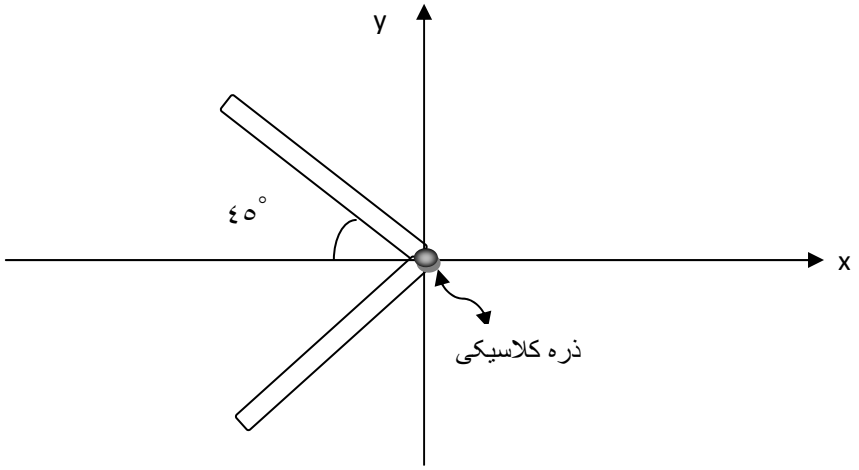
## چکیده

*با وجود تمامی تلاش‌هایی که در سال‌های اخیر در جهت بهبود دقت آشکارسازهای امواج گرانشی شده است، اما تا کنون هیچ یک از آن‌ها موفق به اندازه‌گیری این امواج نشده‌اند.*

*اساس کار اکثر آشکارسازها و تداخل سنج‌های لیزری بر پایه‌ی اندازه‌گیری مکان استوار است که چون کاربرد این نوع اندازه‌گیری به خاطر ایجاد مشکلات عمده‌ای از جمله نیاز به برهم‌کنش قوی بین اجزای مختلف سیستم، موجب کاهش دقت در اندازه‌گیری می‌شود، شاید دلیل اصلی این عدم موفقیت، استفاده از چنین اندازه‌گیری باشد.*

*یک روش در جهت بهبود دقت آشکار سازها و کاهش این مشکلات، استفاده از اندازه‌گیری تکانه است.هرچند تا کنون هیچ روش قابل‌درک تکنیکی برای آن نیامده، اما در این مقاله طرحی تئوری از اندازه‌گیری تکانه ارائه شده است.*

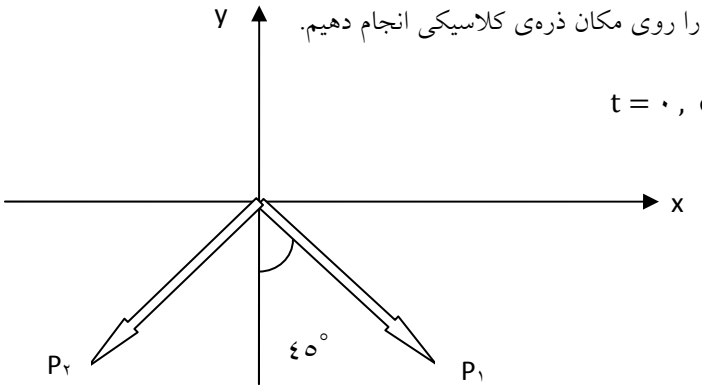
تفاوت اصلی ساختار این سیستم با ساختار تداخل سنج‌های لیزری آشکارسازهای موج گرانشی در این است که دو آنتنی که در اینجا بر هم عمود می‌شوند، هم فازند و مطابق شکل۱، نیم ساز زاویه آن‌ها را منطبق بر محور x و محور عمود بر آن را y فرض می‌کنیم.همچنین فرض می‌شود که موج گرانشی عمود بر صفحه‌ی (x,y) فرود آید و اگر دو آنتن منطبق بر محورهای $x'$ ,$y'$ که $45^\circ$ نسبت به محورهای x و y دوران یافته اند، قرار گرفته باشند، آنگاه با تأثیر موج گرانشی بر $(x'$ ,$y')$ با توجه به $h_+$ پلاریزیشن [۱و۲]، که یکی از پلاریزیشنهای مستقل موج گرانشی است و با فرض اینکه تأثیرات $h_x$ پلاریزیشن را مشابه با تداخل سنج‌های لیزری نادیده می گیریم، آنگاه بر طبق $h_+$ پلاریزیشن موج گرانشی، آنتن‌ها به طور متناوب روی راستاهای $x'$ ,$y'$ منقبض و منبسط می‌شوند. هرچند موج گرانشی را نمی‌توان کلاسیکی بررسی کرد، اما تأثیر آن روی آنتن‌ها باعث می‌شود که بتوان آثارش را به طور کلاسیکی مورد بررسی قرار داد.




شکل ۱: نحوه قرارگیری دو آنتن و ذره کلاسیکی در تداخل سنج مورد بررسی

بنابراین اگر ذره‌ای کلاسیکی را روی مبدأ مختصات شکل بالا، یعنی روی محل تلاقی دو آنتن قرار دهیم، آنگاه با توجه به اثر موج گرانشی و جابجایی آنتن‌ها در هر دوره و بر طبق شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس قانون پایستگی تکانه، مقدار تکانه‌ی $2p_y$ به ذره در راستای محور y در لحظه‌ی $t = 0$ ( اولین دوره‌ی اثر موج گرانشی برای فازهای $\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \ldots$ )، وارد خواهد شد.چون فرض کرده‌ایم دو آنتن ما هم فازند و در فاز $\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \ldots$ می‌باشند، بنابراین فقط در زمان‌های استروبوسکوپی مربوطه اندازه‌گیری‌ها را انجام می‌دهیم. پس در $t = 0, \frac{\pi}{\omega}, \ldots$ باید اندازه‌گیری‌هایمان را روی مکان ذره‌ی کلاسیکی انجام دهیم.

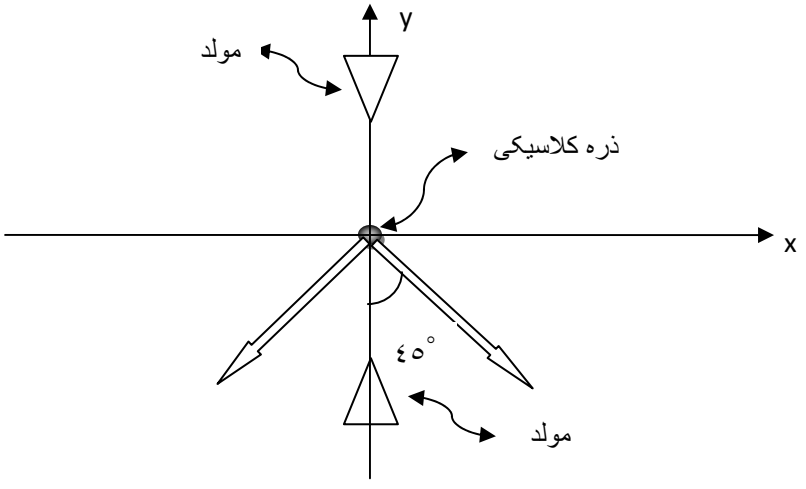
در $t = 0\ ,\ \varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \ldots$




**شکل۲**. جهت بردارهای تکانه مربوط به دو آنتن در لحظه t=۰

همچنین نیازمندیم که دو مولد نیرو(تکانه) (دستگاهی که بتواند در لحظات معین، پالس یا ذره‌ای را با مقدار تکانه‌ی معین به سمت ذره‌ی کلاسیکی ارسال کند.) را روی محور y، یکی در بالای مبدأ و دیگری به همان فاصله در زیر مبدأ قرار دهیم.

سیستم در کل این‌گونه کار می‌کند: در $t = 0$ طبق شکل ۲ اگر موج گرانشی در فاز ذکرشده در این شکل باشد، برآیند $p_x$ های آنتن‌ها صفر می‌شود و برآیند $p_y$ ها در قسمت منفی محور y می‌افتد و طبق شکل ۳ مولد زیرین پالس را همزمان ارسال کرده، به گونه‌ای که تنها اندازه‌گیری‌هایمان را از مکان ذره‌ی کلاسیکی و با دقت بالا انجام می‌دهیم. همین اندازه‌گیری برای $t = \frac{\pi}{\omega}$ انجام می‌شود، با این تفاوت که این بار مولد بالایی پالس را ارسال خواهد کرد و در فاصله‌ی بین دو اندازه‌گیری، ذره‌ی کلاسیکی دیگری جایگزین می‌شود و اندازه‌گیری روی آن انجام خواهد شد.




**شکل۳**. محل قرارگیری دو مولد که به فاصله‌های یکسان از مبدأ نصب می‌شوند.

اندازه‌گیری‌ها بارها به طور متناوب تکرار خواهد شد به گونه‌ای که هر بار با توجه به جهت (در جهت یا در خلاف جهت محور y) و میزان تغییرات ذره‌ی کلاسیکی از مکان اولیه‌اش پس از تأثیر برایند تکانه‌ی آنتن‌ها و تکانه‌ی پالس ارسالی روی آن، مقدار تکانه‌ی پالس مولد در اندازه‌گیری بعدی تغییر خواهد کرد و به سمتی می رود که جابجایی ذره را به صفر برساند. زمانی که متوجه شویم ذره با ارسال پالس معین جابجا نشده، آنگاه تکانه‌ی پالس ارسالی در آن لحظه با $۲p_y$ برابر خواهد بود و از این طریق مقدار $p_y$ هر آنتن بدست می‌آید. چون بردار p آنتن‌ها در زاویه $۴۵^\circ$ نسبت به محورهای مختصات است، و با توجه به اینکه $\tan ۴۵^\circ = ۱$ می‌باشد، پس $p_x = p_y$ رابطه ایست که برای هر دو آنتن وجود دارد. بنابراین ما اکنون مقدار $p_x$ را هم در اختیارداریم و نهایتاً با داشتن هر دو مقدار $p_x$ و $p_y$، با توجه به اینکه مقدار پالسهای ارسالی دقت تکانه‌ی بالایی دارند، می‌توانیم تکانه‌ی ناشی از تأثیر موج گرانشی را بر هر آنتن با دقت بالا بدست آوریم. چون فاز موج گرانشی را از قبل نمی‌دانیم، همزمان یک سیستم این‌چنین را در همان محیط برای فازهای $\varphi = ۰, \pi, \dots$ و زمان‌های استروبوسکوپی $t = \frac{\pi}{۲\omega}, \frac{۳\pi}{۲\omega}, \dots$ ایجاد کرده و اندازه‌گیری‌هایی را مشابه بالا در این زمانها انجام می‌دهیم تا تمامی فازهای ممکن را نیز تحت پوشش قرار داده باشیم.

## نتیجه‌گیری

طبق آنچه گفته شد، هرچند موج گرانشی خاصیتی کلاسیکی ندارد، اما چون ما تأثیرات این موج را تنها روی آنتن و نهایتاً روی ذره‌ی کلاسیکی بررسی می‌کنیم، بنابراین تنها با اندازه‌گیری دقیق مکان ذره‌ی کلاسیکی سروکار داریم، که فرایندی کلاسیکی و قابل بررسی است.نکته‌ی مورد توجه دیگر این است که در این روش تکنیکی، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ هیچ‌گونه خللی بر اندازه‌گیری ما وارد نمی‌کند، چرا که سیستم ذره‌ی کلاسیکی و آنتن‌ها کاملاً خارج از سیستم مولدها قرار دارد، بطوریکه هیچ‌گونه نیازی به برهم‌کنش و کوپلاژ بین آن‌ها وجود ندارد و در نتیجه کافیست در هر زمان استروبوسکوپی ما اندازه‌گیری بسیار دقیقی از مکان ذره‌ی کلاسیکی داشته باشیم،بدون اینکه نیازی به اندازه‌گیری دقیق از تکانه‌ی آن باشد. از طرفی می دانیم که مولدها هم در هر زمان با دقت بالایی پالس را با تکانه‌ی معین ارسال می‌کنند و تنها زمانی که، از اندازه‌گیری مکان ذره‌ی کلاسیکی متوجه شدیم جابجایی‌اش صفر بوده، با بررسی تکانه‌ی پالس ارسالی از مولد مربوطه، محاسبات بالا به طور کامل انجام می‌شوند و در نهایت با کمک این روش تکنیکی می‌توانیم تکانه‌ی آنتن را پس از تأثیر موج گرانشی با دقتی فراتر از حد کوانتومی استاندارد و با کمترین اختلال ممکن محاسبه کنیم. تا کنون هیچ روش تکنیکی برای اندازه‌گیری تکانه که بتواند جنبه‌ی تجربی داشته باشد ابداع نشده و ما امید داریم که این روش در عین سادگی بتواند مشکل را حل کند تا در نهایت با استفاده از آن موفق به اندازه‌گیری دقیق امواج گرانشی شویم.

## مرجع‌ها


۱. این مقاله از پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد "*نظریه اندازه‌گیری کوانتومی و اندازه‌گیری‌های غیر تخریبی کوانتومی* "، زیر نظر دکتر مجید رهنما استخراج شده است.

۲. S. L. Danilishin and F. Ya. Khalili, "*Quantum Measurement Theory in Gravitational-wave Detectors*", *Living Rev. Relativity* **۱۵, (۲۰۱۲), ۵**