

# بسم الله الرحمن الرحيم

گزارش کار آزمایشگاه اپتیک – دکتر مهدوی

آزمایش دهم

پراش از تک شکاف و دو شکاف و بررسی اصل عدم قطعیت

حسین محمدی

۹۶۱۰۱۰۳۵

آزمایشگاه اپتیک – دانشکده فیزیک – دانشگاه صنعتی شریف

گروه دوم – چهارشنبه از ساعت ۱۳:۳۰ الی ۱۷:۳۰

تاریخ انجام آزمایش : ۲۲ اردیبهشت سال ۱۴۰۰

## مقدمه ی آزمایش

نامساوی عدم قطعیت از پایه های مکانیک کوانتومی است و از راه های بسیار جالب و سرراستی که برای تحقیق آن وجود دارد؛ استفاده از آزمایش دو شکاف است. برای تحقیق این نامساوی باید با الگوی پراش و مشخصه های آن بیشتر و بهتر آشنا شویم.

در این آزمایشهای ۲ و ۴ و ۶ با مقدمات کلی پراش از تک شکاف و دو شکاف آشنا شده بودیم؛ اما به طور دقیق تر به آن نپرداخته بودیم و فقط به طرحی کلی از الگوی پراش رضایت دادیم؛ ولی حالا قرار است که به طور دقیق تر این الگوها را بررسی کنیم. از جمله یافتن رابطه شدت نوارهای روشن این الگوها و یافتن کمینه و بیشینه شدت ها و پوش منحنی شدت ها و... است.

به طور اجمالی در آزمایش اول الگوی طرح پراش از تک شکاف را می بینیم و با کمک یک فوتوسل بسیار دقیق که سر آن به وسیله ی تک شکاف محدود شده است، با دقت ۱۰ میکرون، شدت را در هر فاصله می خوانیم و نمودار شدت برحسب زاویه (یا فاصله از نوار مرکزی) را می خوانیم. در آزمایش دوم هم همین فرآیند را برای دو شکاف تکرار می کنیم. در آزمایش سوم به سراغ تک شکاف با پهنای و فاصله ی دو شکاف متفاوت می رویم و نامساوی عدم قطعیت را با رابطه ای که در دستور کار به دست آمده است بررسی می کنیم.

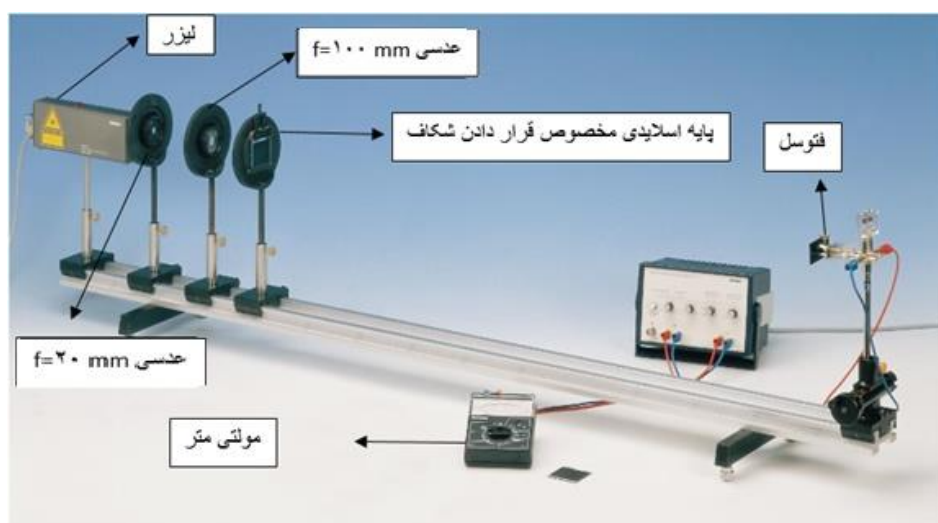
## وسایل آزمایش:

- ریل اپتیکی
- لیزر هلیوم نئون
- دو عدسی محدب با فاصله کانونی ۲۰ و ۱۰۰ میلی متری
- فوتوسل
- پایه ریزسنجی برای حرکت فوتوسل در امتداد عمود بر ریل اپتیکی
- ولت سنج
- پایه نگهدارنده اسلاید
- اسلایدهای تک شکاف و دوشکاف با پهنای مختلف

## آزمایش اول: طرح پراش تک شکاف

لیزر هلیوم نئون را در ابتدای ریل اپتیکی قرار می دهیم و عدسی های ۲۰ و ۱۰۰ میلیمتری را به ترتیب جلوی آن و در فواصل معین شده در شکل قرار می دهیم، فوتوسل را در انتهای دیگر ریل و با فاصله ی مشخص قرار می

دهیم. حالا چینش آزمایش تکمیل شده است و می توانیم با قرار دادن اسلاید تک شکاف، الگوی تداخلی را مشاهده کنیم.



تصویر ۱: چینش دستگاه ها برای هر سه آزمایش - لیزر روی  $2.5\text{ cm}$  ریل اپتیکی - عدسی  $20$  میلیمتری روی  $14\text{ cm}$  - عدسی  $100$  میلیمتری روی  $27\text{ cm}$  - پایه اسلاید روی  $32.5\text{ cm}$  و فوتوسل روی  $138\text{ cm}$  ریل اپتیکی قرار می گیرد.

برای این قسمت آزمایش از تک شکاف با پهنای  $0.2$  میلیمتر استفاده کرده ایم.

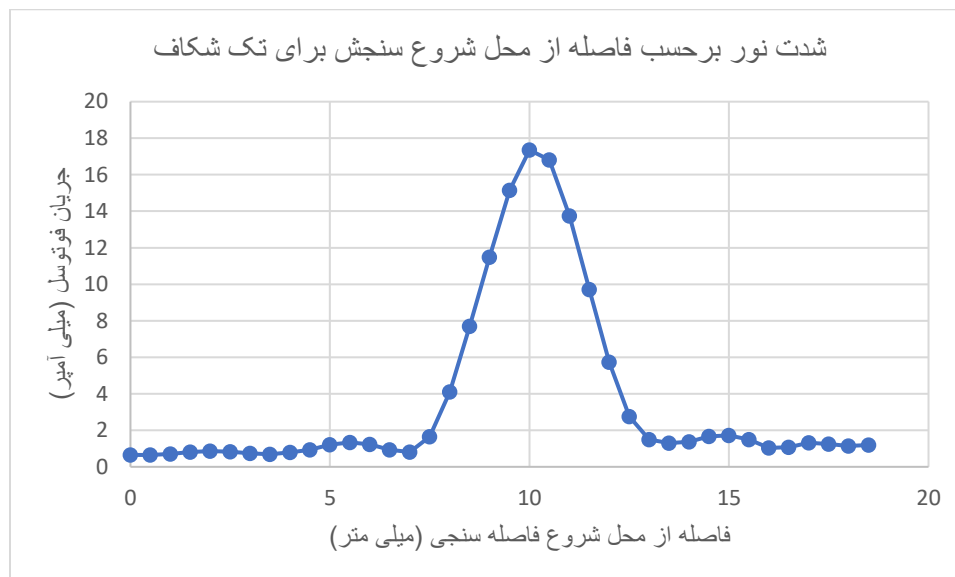
داده هایی که برای این آزمایش به دست آورده ایم چنین است:

جدول ۱: داده های شدت جریان فوتوسل بر حسب فاصله از دومین مینیمم از سمت چپ در اسلاید تک شکاف

$X(\text{mm})$ $\pm 0.01\text{ mm}$	$I(\text{mA})$ $\pm 0.0001\text{ mA}$	$X(\text{mm})$ $\pm 0.01\text{ mm}$	$I(\text{mA})$ $\pm 0.0001\text{ mA}$	$X(\text{mm})$ $\pm 0.01\text{ mm}$	$I(\text{mA})$ $\pm 0.0001\text{ mA}$
۰.۰	0.66	۶.۵	0.93	۱۳.۰	۱.۴۹
۰.۵	0.65	۷.۰	0.82	۱۳.۵	1.3
۱.۰	0.71	۷.۵	1.66	14	1.38
۱.۵	0.81	۸.۰	4.1	14.5	1.67
۲.۰	0.86	۸.۵	7.69	15	1.72
۲.۵	0.83	۹.۰	11.49	15.5	1.5
۳.۰	0.74	۹.۵	15.15	16.0	1.04
۳.۵	0.69	۱۰.۰	17.35	16.5	1.07
۴.۰	0.79	۱۰.۵	16.82	17.0	1.32
۴.۵	0.94	۱۱.۰	13.75	17.5	1.25
۵.۰	1.22	۱۱.۵	9.72	18.0	1.15

۵.۵	1.34	۱۲.۰	5.73	18.5	1.19
۶.۰	1.23	۱۲.۵	2.75		

که در آن داده های قرمز مربوط به شدت ماکسیمم هستند؛ ترسیم این داده ها شکل زیر را برای ما به دست می دهد:



نمودار ۱: شدت نور (جریان فوتوسل) بر حسب فاصله برای آزمایش تک شکاف

ذکر دو نکته در اینجا حائز اهمیت است:

۱. اولاً بنا به فرضی که داریم؛ جریانی که آمپرسنج متصل به فوتوسل نشان می دهد، به صورت خطی با شدت نور دریافتی رابطه دارد. (یعنی در رژیم خطی فوتوسل هستیم) پس اهمیتی نخواهد داشت که محور عمودی جریان فوتوسل را نشان دهد یا شدت نور را. چرا که ما در این تحلیل ها به مقدار واقعی شدت نور علاقه مند نیستیم و فقط موقعیت نسبی این شدتها برایمان مهم است (آنچه مهم است روند نمودار است و نه مقدار دقیق داده ها)، پس می توانیم به جای شدت از جریان آمپرسنج استفاده کنیم.
  ۲. ثانیاً، می توانستیم نمودار را با انتقال داده های فاصله، طوری بکشیم که پیک نمودار روی محور عرضها باشد، به این معنی که شروع فاصله سنسور مان از نوار مرکزی باشد. ولی چون نخواستیم داده های اصلی را دست بزنیم، آن را به همان صورتی که داده شده ترسیم کردیم.
- نکته قابل توجه این است که شروع فاصله سنسور ما از «دومین مینیمم از سمت چپ نوار مرکزی» است و نه از نوار مرکزی.

حالا مقایسه شدت را در نقاط بیشینه انجام می دهیم؛ می دانیم که در آزمایش تک شکاف، رابطه زیر برای شدت ماکسیمم ها برقرار است:

$$I_0 \propto b^2 \quad , \quad I_1 \propto 0.045 I_0 \quad , \quad I_2 \propto 0.016 I_0$$

که در آن  $I_0$  و  $I_1$  و  $I_2$  به ترتیب شدت در پیک مرکزی و اولین و دومین پیک هستند.

$$\frac{I_1}{I_0} = 0.045 \quad , \quad \frac{I_2}{I_0} = 0.016$$

برای داده های جدول بالا می توان دید که:

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{1.34}{17.35} \approx 0.077 \quad , \quad \frac{I_2}{I_0} = \frac{0.86}{17.35} \approx 0.049$$

می بینیم که نسبت ها دقیقا همان چیزی که ما می خواستیم نشد، باید گفت که خطای فوتوسل و نسبتی که شدت با جریان دارد (و ما آن را خطی فرض کردیم) ، در نتیجه به دست آمده بسیار حائز اهمیت است و به خاطر همین فرضهای ساده انگارانه ما، این خطاها تولید شده اند.

## آزمایش دوم: طرح پراش دو شکاف

در اینجا هم چینش آزمایش به مانند قبل است فقط بایستی از اسلاید دو شکاف با مشخصات زیر استفاده کنیم:

$$b = 0.2 \text{ mm} \quad , \quad g = 0.25 \text{ mm}$$

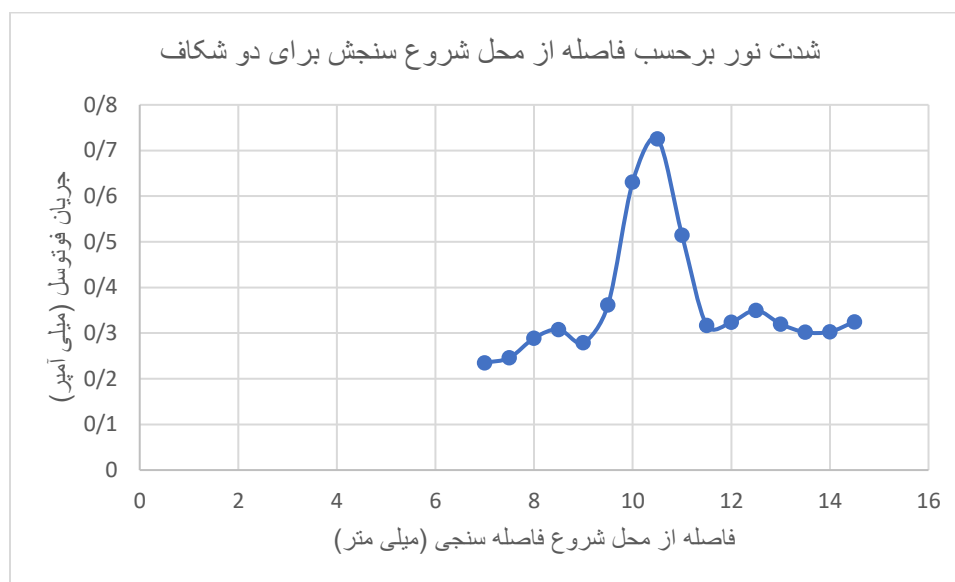
حالا داده های آزمایش را مانند قبل می گیریم:

جدول ۲: داده های شدت جریان فوتوسل بر حسب فاصله از دومین مینیمم از سمت چپ در اسلاید دو شکاف

$X(\text{mm}) \pm 0.01 \text{ mm}$	$I(\text{mA}) \pm 0.001 \text{ mA}$	$X(\text{mm}) \pm 0.01 \text{ mm}$	$I(\text{mA}) \pm 0.001 \text{ mA}$
۷.۰	۰.۲۳۵	۱۱.۰	0.515
۷.۵	۰.۲۴۶	۱۱.۵	0.317
۸.۰	0.289	۱۲.۰	0.324
۸.۵	0.308	۱۲.۵	0.35
۹.۰	0.279	۱۳.۰	0.32
۹.۵	0.362	۱۳.۵	0.302
۱۰.۰	0.631	۱۴.۰	0.303

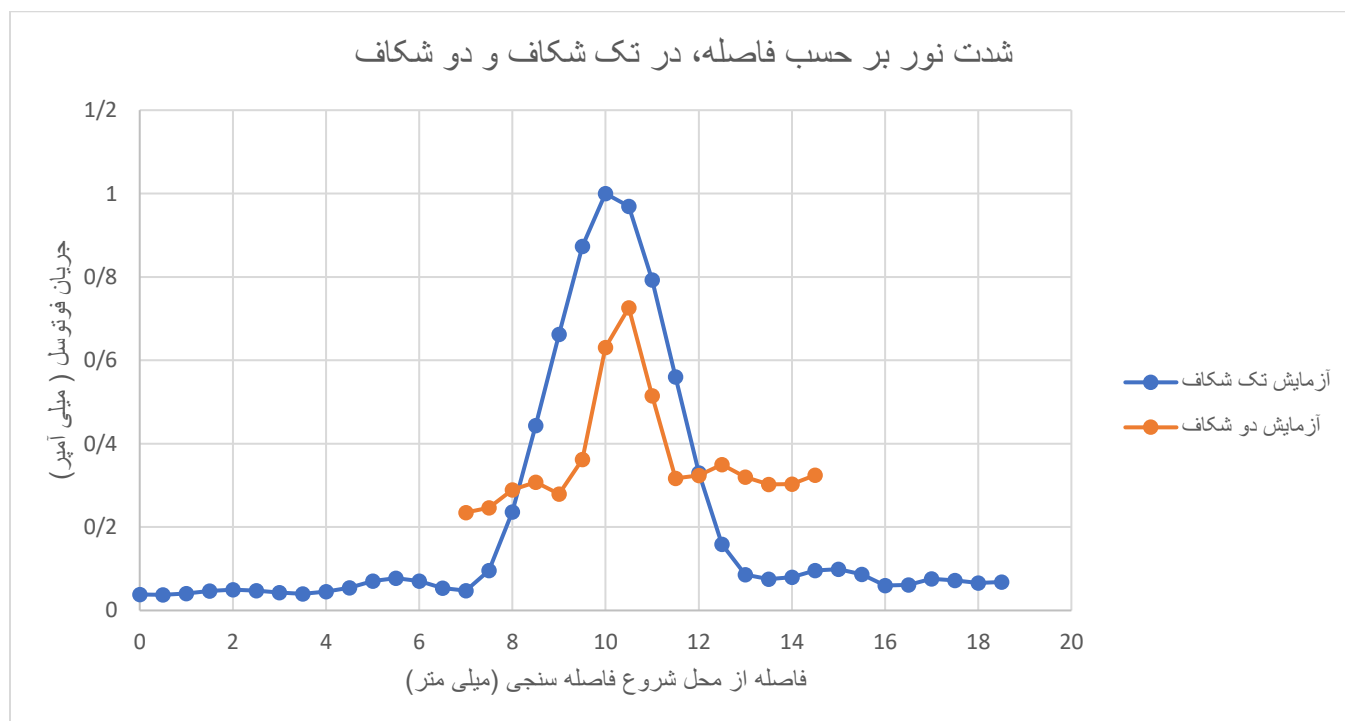
۱۰.۵	0.726	۱۴.۵	0.325
------	-------	------	-------

ترسیم این داده ها نمودار زیر را به دست می دهد:



نمودار ۲: شدت نور (جریان فوتوسل) بر حسب فاصله برای آزمایش دو شکاف

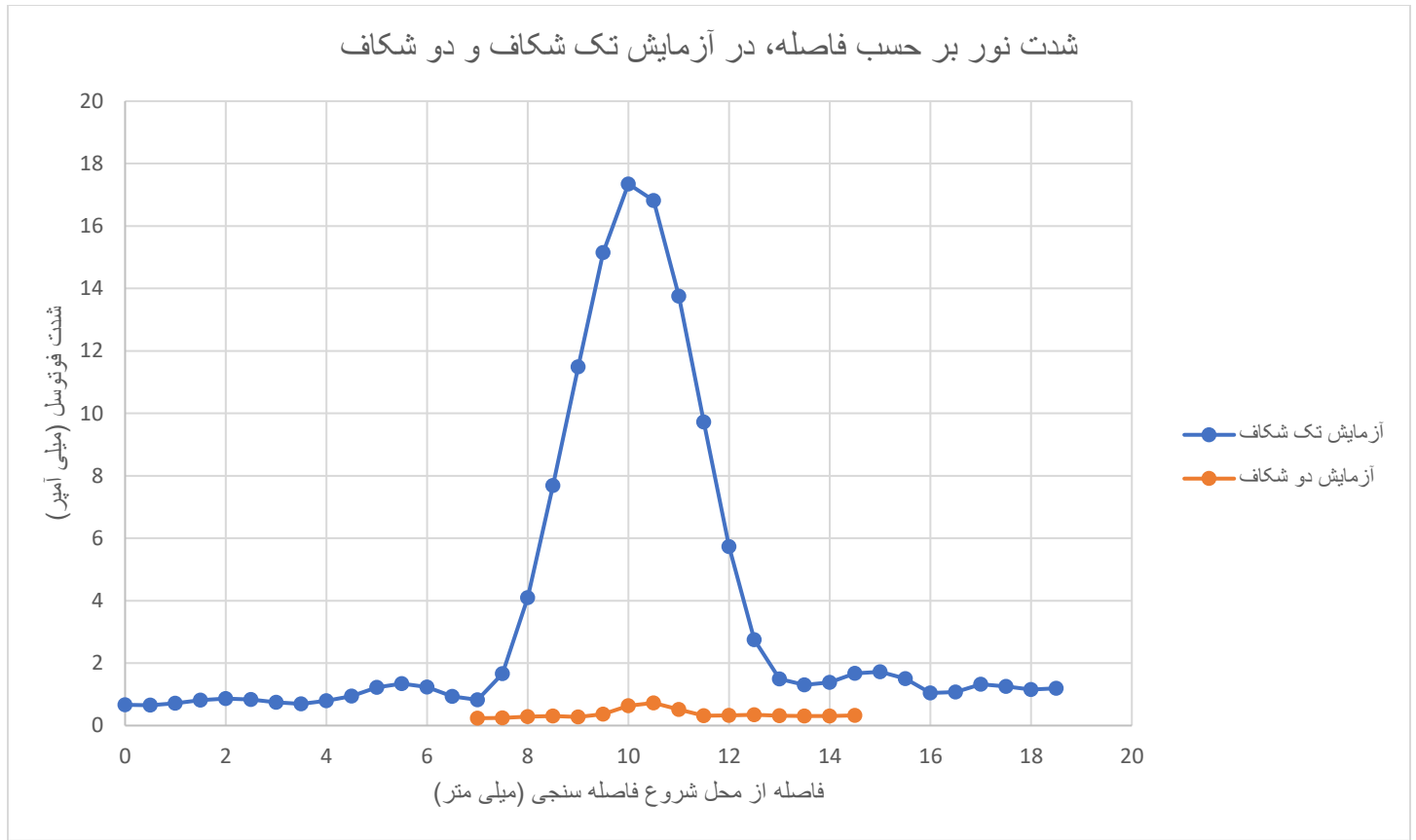
توجه کنید که در دستور کار از ما خواسته شده است که این دو نمودار را یکجا رسم کنیم:



نمودار ۳: شدت نور (جریان فوتوسل) بر حسب فاصله برای آزمایش دو شکاف و تک شکاف برای داده ی مقیاس شده

توجه مهمی که باید مبذول داشت این است که ماکزیمم شدت برای تک شکاف حدود ۱۷ برابر دو شکاف بود و با تقسیم داده های تک شکاف بر ۱۷.۳۵، آن را به نوعی نرمال کردیم. توجه کنید که این کار برای مقایسه ی

نمودار تک شکاف و دوشکاف سودمند نیست چرا که باید هر دو نمودار را به یک روش مقیاس کرد. ولی نکته ای که هست این است که اگر دو نمودار را بدون مقیاس رسم کنیم، مشاهده آن ها بسیار دشوار است، یعنی شکل زیر:



نمودار ۴: شدت نور (جریان فوتوسل) بر حسب فاصله برای آزمایش دوشکاف و تک شکاف برای داده ی اصلی و بدون مقیاس  
همچنین نسبت شدت پیک مرکزی در این دو آزمایش برابر است با:

$$\frac{I_{double}}{I_{single}} = \frac{0.726}{17.35} = 0.0418$$

برای مقایسه کردن شدت پیک ها از رابطه ی زیر که در دستور کار آمده است استفاده می کنیم:

$$I(\phi) \propto b^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \times b \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} \times b \sin(\phi)\right)^2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi}{\lambda} \times g \sin(\phi)\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \times g \sin(\phi)\right)}$$

که در آن  $N$  تعداد شکافهاست و  $g$  فاصله ی شکافها و  $b$  عرض شکافها. همانطور که در دستور کار دیدیم، به ازای  $\sin(\phi) = 0$  اولین ماکزیمم را داریم، اما تمامی کسرها به ازای این مقدار صفر می شوند؛ پس نیاز به رفع ابهام هست و پس از رفع ابهام، شدت اولین نوار مرکزی متناسب با  $b^2$  می شود.

حالا می توان دید که نسبت بین شدت نوار مرکزی، همان نسبتی است که تئوری به دست می دهد.

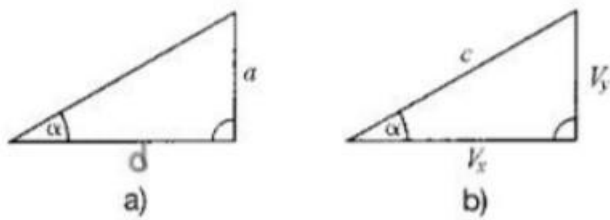
همچنین یک نکته دیگر که بررسی می کنیم؛ تعداد پیک ها در نور روشن اولی (پوش اول) است که مطابق دستور کار برابر با  $\frac{2g}{b}$  است یعنی در مثال ما تعداد این ها برابر با ۲.۵ است. از روش شکل های دستور کار معلوم است که دقیقا سه تا پیک در پوش اول هستند! یادمان باشد که این رابطه تقریبی است و به طور دقیق معلوم نمی کند که چند پیک در پوش هستند.

### آزمایش سوم: بررسی اصل عدم قطعیت

بهتر است اندکی تئوری این آزمایش را توضیح دهیم:

در هنگام عبور نور از یک شکاف به پهنای  $b$ ، واضح است که عدم تعین مکان آن در راستای عرضها برابر با  $\Delta y = b$  می شود، همچنین می توان با تشابهی که بین مثلث ها وجود دارد خود را قانع کرد که عدم تعین برای اولین نوار تاریک، برابر  $\Delta v = c \sin \alpha$  است. حالا عدم قطعیت تکانه را به دست بیاوریم؛ می شود  $\Delta p = mc \sin \alpha$ . با استفاده از رابطه ی دوبروی  $P = mc$  و  $\frac{h}{\lambda} = P$  و با خواندن مولفه تکانه روی محور عرضها به دست می آوریم  $\sin \alpha = \frac{\Delta P_y \lambda}{h}$  و با ترکیب با رابطه رابطه ای که برای سینوس زاویه اولین نوار تاریک داریم یعنی:  $\sin \alpha = \frac{\lambda}{b}$  به دست می آوریم که:  $\Delta y \Delta P_y = h$

اما از شکل داریم که  $\tan \alpha = \frac{a}{d}$  پس با جایگذاری در رابطه عدم قطعیت تکانه به دست می آید که  $\Delta P_y = \frac{h}{\lambda} \sin \tan^{-1} \frac{a}{d}$  و رابطه عدم قطعیت به شکل  $\frac{b}{\lambda} \sin \tan^{-1} \frac{a}{d} = 1$  تقلیل می یابد.



تصویر ۲: مثلث هایی که در رابطه بالا از تشابه آن ها استفاده شد و عدم قطعیت تکانه در آن به دست آمد.



توجه کنید که هدف تمامی محاسبات بالا این بود که بتوانیم برای یک تک فوتون رابطه عدم قطعیت را ساده تر بنویسیم تا با وسایل آزمایشگاهی بتوان این رابطه را بررسی و تایید یا رد کرد.

حالا ما باید با در دست داشتن کمیت ها  $a, d, b, \lambda$  تساوی بالا را احراز کنیم. توجه کنید که برای لیزر هلیوم نئون،  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  است و  $d = 105.5 \text{ cm}$  است (یعنی فاصله بین دوشکاف تا فوتوسل) همچنین  $b$  هم سه مقدار  $0.1$  و  $0.2$  و  $0.4$  میلیمتر را می گیرد و بایستی برای هر کدام از این شکاف ها، مقدار  $a$  یعنی فاصله نوار مرکزی تا اولین مینیمم را محاسبه کنیم.

جدول داده ها را مشاهده کنید:

جدول ۳: داده های فاصله اولین مینیمم از نوار مرکزی برای پهناهای مختلف اسلاید دو شکاف

پهنای شکاف	اولین مینیمم		$\frac{b}{\lambda} \cdot \sin(\arctan \frac{a}{d})$
	$d(mm) \pm 5mm$	$a(mm) \pm 0.01mm$	
$b(mm) \pm 0.1mm$			
۰.۱	۱۰۵۵	۶.۶۷	0.99907
۰.۲	۱۰۵۵	۳.۳۳	0.99752
۰.۴	۱۰۵۵	۱.۶۷	1.0005

می بینیم که در دقت ها آزمایشگاه، رابطه عدم قطعیت صادق است.