

# آزمایش تشدید اسپین الکترون

آزمایش شماره دو - آزمایشگاه فیزیک حالت جامد

پارسا رنگریز

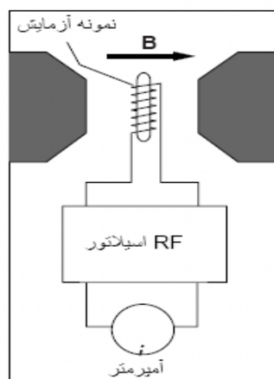
۱۷ اسفند ۱۴۰۰

## چکیده

در این آزمایش سعی شده است پدیده تشدید اسپین الکترون که با نام  $ESR$  شناخته می‌شود، بررسی گردد. در راستای این هدف، تلاش شده است که ضریب ژیرومغناطیس محاسبه شود و وابستگی دامنه سیگنال و پهنای خط به فرکانس تشدید معین گردد.

## مقدمه

اگر یک ماده را در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم، بر اساس برهم کنش‌هایی که بین اسپین‌های ماده و میدان به وجود می‌آید منجر به ایجاد شکافتگی ترازهای انرژی می‌شود. این شکافتگی شرایط جذب انرژی و تابش فوتون را فراهم می‌کند و به طور مشاهداتی در شرایطی می‌توان پدیده تشدید را ایجاد کرد. در نتیجه پدیده تشدید اسپین الکترون رخ می‌دهد و از نتایج آزمایش می‌توان به اطلاعاتی در مورد ساختار اتم‌ها و مولکول‌های ماده دست یافت.



شکل ۱: شمایی از آزمایش ESR

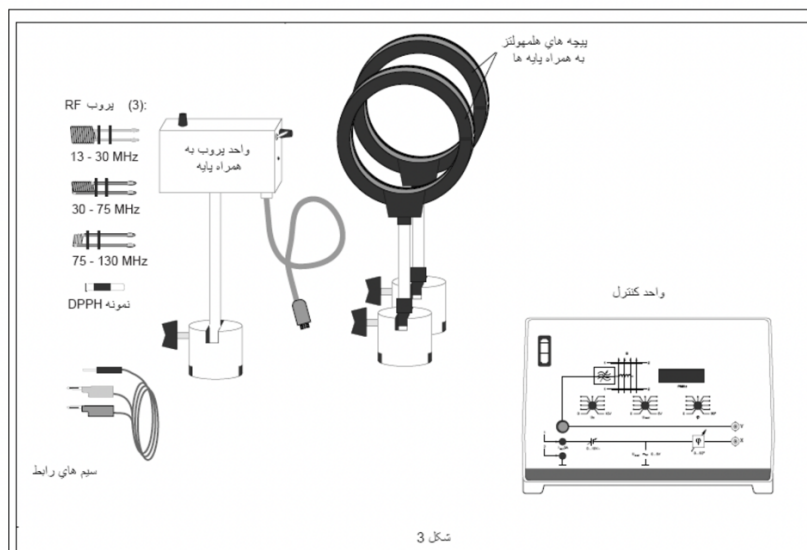
شکل ۱ شمای کلی آزمایش را نشان می‌دهد. نمونه مورد نظر را درون یک سیم‌پیچ قرار می‌دهیم که این سیم‌پیچ متصل به یک نوسانگر  $RF$  است. به سبب ایجاد جریان متغیر در این نوسانگر، یک میدان مغناطیسی حول ماده تشکیل می‌شود. همچنین با ایجاد یک جریان  $DC$  یک میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت قوی‌تر در تمام محیط ایجاد می‌گردد. همچنین الکترون‌های درون نمونه به دلیل دارا بودن گشتاور دوقطبی مغناطیسی  $\mu_s = g_s \mu_B \frac{S}{h}$  (ضریب مشخصه الکترون،  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$  مگنتون بور و  $S$  اسپین الکترون است)، می‌تواند با میدان مغناطیسی موجود در فضا برهم کنش کند؛ بنابراین انرژی ترازهای انرژی پدید آمده،  $E_0 \pm \frac{g_s \mu_B}{2}$  خواهد بود که  $E_0$  انرژی الکترون قبل از اعمال میدان است و اختلاف انرژی ترازها برابر با  $g_s \mu_B B$  خواهد بود که  $B$  مقدار شدت میدان مغناطیسی است. در نتیجه تشدید زمانی رخ می‌دهد که فرکانس نوسانگر  $RF$  با فرکانس فوتون‌های تابشی متناسب با مقدار اختلاف انرژی ترازها برابر

باشد. در این شرایط الکترون‌های در تراز پایه برانگیخته شده و انرژی جذب می‌کنند. این جذب فوتون بر گذردهی مغناطیسی نمونه تاثیر می‌گذارد و به نوبه خود القای سیم‌پیچ را عوض می‌کند. معطوف به این وضعیت، شار مغناطیسی کاهش می‌یابد و پتانسیل القایی درون سیم‌پیچ تغییرات محسوسی در جریان درون سیم‌پیچ و نوسانگر بر جای می‌گذارد. عبارت دقیق‌تر، شرط تشدید به صورت زیر است:

$$h\nu = g_s\mu_B B$$

## وسایل آزمایش

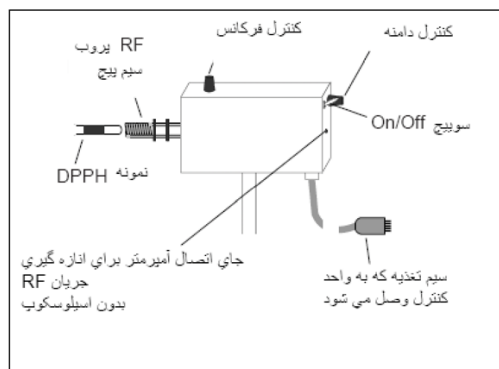
پیچ‌های هلمهولتز، واحد کاوه به همراه پایه، کاوه RF، نمونه DPPH، سیم‌های رابط، واحد کنترل، اسیلوسکوپ، آمپرسنج. در شکل ۲، اکثر وسایل آزمایش قابل مشاهده هستند.



شکل ۲: تجهیزات اصلی دستگاه ESR

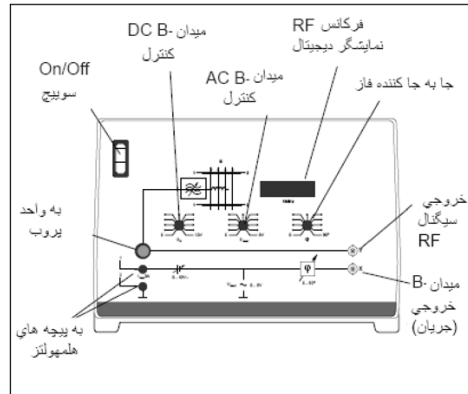
اکنون به معرفی هر یک از این تجهیزات می‌پردازیم.

- **واحد کاوه:** این دستگاه اساسی‌ترین بخش آزمایش ESR است (شکل ۳). این واحد شامل یک نوسانگر RF، یک تقویت‌کننده سیگنال و یک تقسیم‌کننده فرکانس با نسبت ۱۰۰ به ۱ است. این تقسیم‌کننده شرایطی را فراهم می‌آورد که فرکانس RF که محدودده مگاهرتز است بر اساس یک فرکانس سنج استاندارد، در محدوده کیلوهرتز اندازه‌گیری انجام دهد.



شکل ۳: شمایی از واحد کاوه

- **واحد کنترل:** این بخش، اکثر ابزار لازم جهت به کارگیری واحد کاوه را تامین می‌کند (شکل ۴).



شکل ۴: شمایی از واحد کنترل

واحد کنترل سه کار کرد دارد:

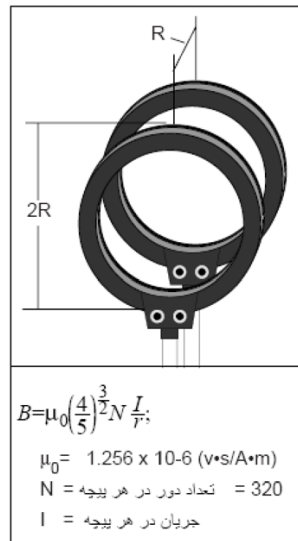
(الف) ولتاژهای لازم را جهت راه اندازی واحد کاوه و پیچه هلمهولتز تامین می کند.

(ب) فرکانس تولیدی واحد کاوه را نمایش می دهد.

(ج) خروجی های لازم را برای اسیلوسکوپ دوکاناله ارائه می دهد. فی الواقع، یک خروجی متناسب با جریان درون نوسانگر

$RF$  است و جهت مشاهده تپ های تشدید به کار می رود و خروجی دیگر متناسب با جریانی است که پیچه های هلمهولتز را تغذیه می کند و بیان گر میدان مغناطیسی خارجی است.

- **پیچه های هلمهولتز:** مطابق شکل ۱، پیچه های هلمهولتز مسئولیت برقراری یک میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت را برعهده دارند. شرط لازم برای ایجاد چنین میدانی، ایجاد فاصله معین متناسب با شعاع برای بین پیچه هاست. (شکل ۵)



شکل ۵: شمایی از پیچه های هلمهولتز

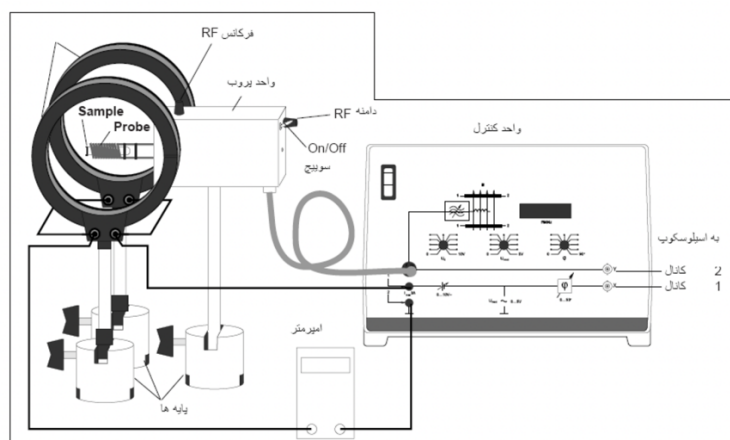
قبل از شروع آزمایش باید به چیدمان دستگاه های مورد استفاده پردازیم. بدین جهت، مطابق شکل ۶ آن ها را تنظیم می کنیم. ابتدا پیچه های هلمهولتز را به واحد کنترل متصل می نماییم و یک آمپرسنج را به طور سری به پیچه ها می بندیم تا جریان آن ها را در نظر بگیرد. با توجه به شرایط هندسی اشاره شده در بخش قبل، پیچه ها را موازی و در فاصله معین قرار می دهیم. نکته حائز اهمیت، عدم اجازه عبور جریان

بیش از ۳ آمپر از هر پیچه است. سپس خروجی X واحد کنترل را به کانال یک اسیلوسکوپ دو کانه وصل می کنیم و تنظیمات زیر را ایجاد می کنیم:

الف) حساسیت:  $1 \text{ or } 2 \text{ V/div}$

ب) سرعت جاروب کردن صفحه:  $21 \text{ or } 5 \text{ ms/div}$

ج) جفت شدگی: DC



شکل ۶: تنظیم دستگاهها - اتصال واحد کاوه به واحد کنترل و بقیه اجزا

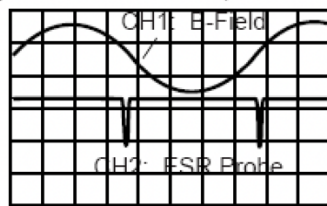
حال  $U_{mod}$  را روی صفر قرار می دهیم و سپس  $U_0$  را به آرامی از صفر تا ۱۰ ولت تغییر می دهیم و منحنی اسیلوسکوپ را مشاهده می کنیم. در شرایطی که منحنی به یک خط واضح و مستقیم برسد، نشان دهنده برقراری جریان DC از درون پیچه هاست. سپس  $U_0$  را تا میانه مقیاس می چرخانیم و آن گاه  $U_{mod}$  را به طور ساعت گرد می چرخانیم تا مولفه AC جریان در پیچه ها افزایش یابد. در این شرایط منحنی روی اسیلوسکوپ باید یک موج هموار سینوسی که متناظر با میدان مغناطیسی AC سوار شده بر میدان DC است، نمایش دهد. زمان اتصال خروجی Y واحد کنترل به کانال ۲ اسیلوسکوپ فرا رسیده است. تنظیمات کانال ۲ را این گونه قرار می دهیم:

الف) حساسیت:  $1 \text{ or } 0.5 \text{ V/div}$

ب) جفت شدگی: DC

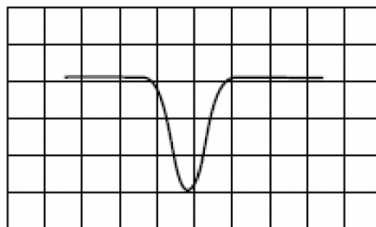
واحد کاوه را به واحد کنترل وصل کرده و کاوه RF با تعداد دور متوسط را درون واحد کاوه تعبیه می کنیم و نمونه DPPH را درون سیم پیچ قرار می دهیم. حال واحد کاوه را با قرار دادن کلید روشن/خاموش در موقعیت روشن، آن را به راه می اندازیم. سپس پیچ کنترل دامنه را تا وضعیت میانه می چرخانیم. اکنون باید فرکانس سنج، روی واحد کنترل، فرکانس نوسان های RF را نمایش دهد. در این شرایط، پیچ کنترل فرکانس را گونه ای تنظیم می کنیم که خروجی حدوداً ۵۰ مگاهرتز تولید گردد.

همانند گذشته،  $U_{mod}$  را روی موقعیت ساعت ۱۱ می گذاریم و پیچ  $U_0$  را چنان می چرخانیم تا جریان در هر یک از پیچه ها تقریباً یک آمپر شود. حال منحنی های روی اسیلوسکوپ باید همانند شکل ۷ باشند.



شکل ۷: نمایی از منحنی‌های اسیلوسکوپ در شرایط مذکور

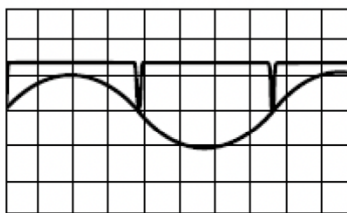
اما این همه راه نیست. اغلب تشدید اسپین را در حالت  $X-Y$  مشاهده می‌کنند. برای این منظور خروجی‌های  $X$  و  $Y$  واحد کنترل را به ورودی‌های مرتبط خود در اسیلوسکوپ وصل می‌کنیم. در این حالت جابجایی‌های افقی در منحنی، نمایانگر اندازه میدان مغناطیسی میان پیچه‌هاست. جابجایی عمودی نیز بیانگر سیگنالی است که از واحد کاوه می‌آید. همانند قبل، دو تپ تشدید می‌توان مشاهده کرد؛ زیرا میدان مغناطیسی خارجی دو بار از مقدار صحیح، در هر دوره تناوب، می‌گذرد. با تنظیم جابجاکننده فازی، دو کمینه تپی را می‌توان روی هم منطبق ساخت. در این شرایط منحنی مشابهی از شکل ۸ ظاهر خواهد شد.



شکل ۸: نمایی از منحنی اسیلوسکوپ در حالت  $X-Y$

## شرح آزمایش

دستگاه را مطابق آنچه در بخش بالا گفته شد، تنظیم می‌کنیم. سپس فرکانس RF و جریان DC ورودی به پیچه‌ها را چنان تغییر می‌دهیم تا تپ‌های تشدید نمایان شود. سپس جابجاکننده فاز را آن‌طور تنظیم می‌کنیم تا تپ‌های تشدید متقارن شوند. حال تنظیم جریان DC را به نحوی اصلاح می‌کنیم که پالس‌های تشدید زمانی رخ دهند که مولفه AC جریان، در پیچه‌های هلمهولتر صفر گردد. با این تنظیمات، منحنی‌های روی صفحه نمایش باید همانند شکل ۱۰ شوند.



شکل ۱۰: منحنی اسیلوسکوپ در شرایط ESR

ابتدا فرکانس RF و جریان DC را در جدول ۱ ثبت کرده و سپس جریان را تغییر داده و فرکانس جدید را می‌یابیم. این فرایند را برای چندین مقدار فرکانس انجام داده و سپس کاوه RF را تغییر داده و مشاهدات را برای هر کاوه RF دیگری انجام می‌دهیم. (جدول ۲)

## جدول داده‌ها

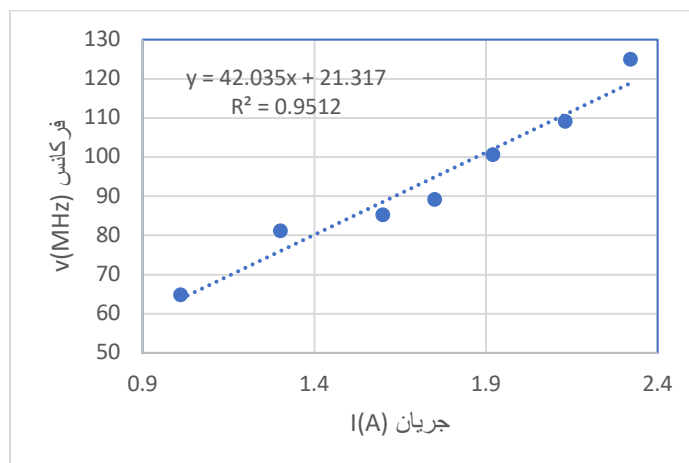
جدول ۱: فرکانس تشدید بر حسب جریان پیچه برای واحد کاوه کوچک

فرکانس $\nu$ (MHz)	جریان $I$ (A)
۱۲۵.۰	۲.۳۲
۱۰۰.۶	۱.۹۰
۸۵.۲	۱.۶۰
۸۱.۱	۱.۳۰
۶۴.۸	۱.۰۱
۸۹.۲	۱.۷۵
۱۰۹.۰	۲.۱۳

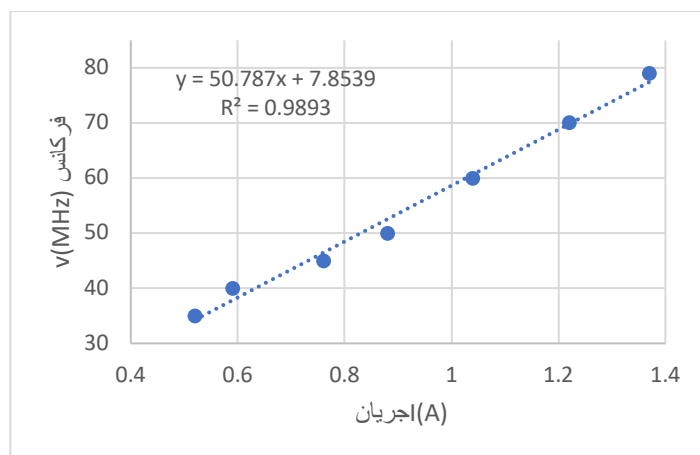
جدول ۲: فرکانس تشدید بر حسب جریان پیچه برای واحد کاوه متوسط

فرکانس $\nu$ (MHz)	جریان $I$ (A)
۷۹.۰	۱.۳۷
۷۰.۰	۱.۲۲
۶۰.۰	۱.۰۴
۵۰.۰	۰.۸۸
۴۵.۰	۰.۷۶
۴۰.۰	۰.۵۹
۳۵.۰	۰.۵۲

## نمودار داده‌ها



نمودار ۱: فرکانس تشدید بر حسب جریان پیچه برای واحد کاوه کوچک



نمودار ۲: فرکانس تشدید بر حسب جریان پیچه برای واحد کاوه متوسط

## محاسبات

با توجه به آنچه در مورد شرایط تشدید و نیز قانون بیوساوار گفتیم، رابطه خطی میان فرکانس تشدید و جریان پیچه به صورت زیر است

$$v = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{g_s \mu_B \mu_0 N}{h r} I$$

بنابراین بر اساس نمودارهای خطی رسم شده در بخش نمودارها می توان ضریب  $g_s$  را برای الکترون نمونه DPPH بدست آورد. اگر شیب تجربی نمودار را با  $\beta$  نمایش دهیم، آن گاه

$$g_s = \left(\frac{5}{4}\right)^{3/2} \frac{h r}{\mu_B \mu_0 N} \beta$$

• واحد کاوه کوچک:

$$\beta = 42 \pm 4 \text{ MHz/A}$$

$$g_s = 8 \pm 1$$

• واحد کاوه متوسط:

$$\beta = 50 \pm 2 \text{ MHz/A}$$

$$g_s = 9.5 \pm 0.4$$

## خطای آزمایش

همانطور که مشاهده می شود مقدار ضریب  $g_s$  بدست آمده در دو آزمایش بالا با مقدار اصلی آن که برابر با  $2.0036$  است متفاوت شده است. این اختلاف ها ناشی از عواملی هستند که محتملند بر نتیجه آزمایش اثرگذار باشند:

یکنواخت نبودن میدان مغناطیسی تولیدی سیم پیچ به دلیل عدم ایجاد شرایط الکترومغناطیسی لازم (فاصله مناسب یا عدم توازی پیچه ها)، اثرات گرمایی و خودالقایی سیم پیچ و پیچه های هلمهولتز، اثرات میدان مغناطیسی زمین، مقاومت درونی آمپر متر، اختلافات ناشی از ورود

دستگاه‌های اندازه‌گیری همانند اسیلوسکوپ بر روی فرکانس یا جریان، سینوسی نبودن کامل منحنی جریان‌های متناوب، خطای آزمایشگر در تنظیم پیچ‌های دستگاه و ...

یکی از موانعی که ممکن است بر سر راه باشد، اثرات میدان مغناطیسی زمین است که با یک تکنیک ساده قابل حل است. اگر جهات جغرافیایی موقعیت آزمایشگاه را بدانیم، با قرار دادن سیم‌پیچ‌ها و صفحه دستگاه در جهت عمود بر وضعیت شمال-جنوب، می‌توان از میزان شار عبوری میدان مغناطیسی زمین بر پیچ‌ها جلوگیری کرد و بدین واسطه، اثرات اختلالی این یک مورد را به حداقل رساند.

## نتیجه‌گیری

با توجه به مقادیر ثبت شده بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته، اختلافات موجود را می‌توان به دلیل خطاهایی که در بخش گذشته اشاره شد، توجیه نمود؛ اما عیان است که این آزمایش از دقت بالایی برخوردار نیست؛ کما اینکه خطای خط برآزش و نیز وجود مقدار مثبت غیرقابل اغماض عرض از مبدا، سندی است برای این ادعا. در هر حال، این آزمایش ساده می‌تواند اثرات تشدید اسپین را لااقل در ظاهر و به طور محسوس نمایش دهد. پدیده‌ای که اساس کار تشدید اسپینی هسته *NMR* است و کاربردهای فیزیکی و غیرفیزیکی (پزشکی) فراوانی بر آن وجود دارد. فی‌الواقع این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که هسته‌های هم‌جهت ماده با میدان مغناطیسی قوی اعمال شده انرژی جذب می‌کنند و جهت اسپین‌های خود را بر اساس شدت و جهت میدان تغییر می‌دهند و فرکانس میدان الکتریکی نوسانی ناشی از تابش ورودی با فرکانس میدان الکتریکی تولیدی هسته برابری کند و جفت‌شدگی این دو میدان سبب انتقال تابش ورودی به هسته گردد. به سبب این موضوع تغییرات محسوسی در میدان مغناطیسی مجاورت ماده به وجود می‌آید و به میزان چگالی الکترون‌های اطراف هسته، این تغییرات واضح‌تر خواهند بود. یک تفاوت مساله *NMR* با مساله *ESR* در اسپینی خواهد بود که مورد مطالعه قرار گرفته است. به بیان دقیق‌تر برای مساله *NMR* اسپین‌های هسته‌ای و برای مساله *ESR* اسپین‌های الکترونی مورد بررسی قرار می‌گیرند. ضمناً محدوده موجی *NMR*، مایکروویو است؛ اما برای *ESR* در همان حدود رادیویی باقی می‌ماند. همچنین به دلیل قوی‌تر بودن اسپین الکترون‌ها به نسبت اسپین هسته‌ها، شدت میدان مغناطیسی مورد نیاز حتماً متفاوت خواهد بود. به همین سبب است که اختلافات واضحی بین این دو مساله وجود دارد. اما مطالعه *ESR* می‌تواند برخی ویژگی‌های ذاتی و مستقل از آزمایش اسپین‌ها را عیان کند و به همین سبب بررسی و مطالعه تشدید اسپین الکترون بسیار مهم و سودمند است.