

مطالعه حافظه مکانیکی و نقش برهم کنش بین عناصر حافظه‌ای

نگین رحیم‌زاده* و علی نجفی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان، زنجان ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱

پست الکترونیکی: rahimzadeh.negin@iasbs.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۳/۱۵)

چکیده:

رفتار حافظه‌ای در سامانه‌های مکانیکی بی‌نظم، برحسب تحلیل رفتار مجموعه‌ای از عناصر اولیه حافظه‌دار یا هیسترون‌ها که در آن سامانه قابل تشخیص‌اند، بررسی می‌شود. با معرفی یک میله کشسان کم‌انرژی شونده به عنوان ساده‌ترین عنصر حافظه‌دار (هیسترون)، شروع می‌کنیم. هیسترون معرفی شده یک عنصر دو حالتی است که قادر است در پاسخ به نیروی خارجی، بین حالت‌های درونی خود گذار کند. این گذارها نه تنها به میزان لحظه‌ای نیروی اعمال‌شده، بلکه به تاریخچه نیروهای قبلی نیز وابسته هستند. سامانه پیچیده‌تر دو هیسترونی به ما اجازه می‌دهد که نقش برهم‌کنش بین هیسترون‌ها را در رفتار حافظه‌ای سامانه‌های واقعی‌تر مطالعه کنیم. علاوه بر برهم‌کنش‌های دوسویه پتانسیلی، برهم‌کنش‌های غیر دوسویه نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. مشاهده تنوع و پیچیدگی گذارهای هیسترونی، اجازه می‌دهد تا علاوه بر فهم موضوع حافظه در مواد واقعی، فرامواد جدید با رفتار مطلوب طراحی شوند.

واژه‌های کلیدی: سامانه‌های مکانیکی، حافظه، هیسترون، حلقه‌های پسماند، نمودار گذار، دینامیک، برهم‌کنش غیر دوسویه.

۱. مقدمه

ناپذیری به نام حلقه‌های هیسترسیس^۱ یا پسماند ایجاد می‌کنند که مشخصه اصلی حافظه در این سامانه‌ها هستند. یک سامانه دارای پسماند قادر است، به عنوان مثال، تغییر جهت نیروی خارجی را به خاطر بسپارد و برای یک نیروی رفت و برگشتی متقارن، مسیری نامتقارن در نیمه رفت و نیمه برگشت طی کند. این نوع حافظه برای اولین بار در مواد مغناطیسی شناخته شد که به حافظه نقطه بازگشت^۲ یا به اختصار *RPM* معروف است [۱۸ و ۱۹].

برگشت‌ناپذیری در سامانه‌های بی‌نظم، موضوعی است که از لحاظ بنیادی مورد توجه است. در پاسخ به نیروهای تناوبی خارجی، سامانه‌های بی‌نظم رفتاری برگشت‌ناپذیر یعنی رفتاری که ناقض تقارن وارونی زمان است را به نمایش می‌گذارند. پاسخ نامتقارن به نیروی متقارن خارجی، ما را به بررسی

مواد بی‌نظم و سامانه‌های مکانیکی دارای کاربردهای ویژه‌ای هستند و یکی از جنبه‌های جذاب آنها، توانایی‌شان در ذخیره و بازیابی اطلاعات است که به عنوان حافظه شناخته می‌شود. اشکال مختلف نگهداری اطلاعات در طیف وسیعی از سامانه‌های بی‌نظم وجود دارد [۱] که شامل مواد دانه‌ای [۲-۷]، ورق‌های مچاله شده [۸-۱۰]، فرامواد [۱۱-۱۳] و سامانه‌های مکانیکی بر پایه جرم و فنر است [۱۴-۱۷]. پاسخ دینامیکی این سامانه‌ها به نیروهای چرخه‌ای خارجی، با گذار بین کمینه‌های انرژی در فضای پیکربندی آنها همراه است. این مسیرهای حرکتی در فضای پیکربندی، که در نتیجه اعمال نیروهای چرخه‌ای شکل می‌گیرند، حلقه‌های برگشت

۱. Hysteresis

۲. Return point memory

در این مقاله، ابتدا نشان می‌دهیم که یک میله کمانی شونده، می‌تواند یک عنصر حافظه‌ای باشد. سپس در قسمت‌های بعدی با در نظر گرفتن ۲ حافظه جفت شده، به بررسی نقش برهم‌کنش می‌پردازیم. در این‌جا، دو نوع برهم‌کنش پتانسیلی و غیر پتانسیلی غیردوسویه را بررسی می‌کنیم.

۲. حافظه

ایده اصلی در مطالعه حافظه و برگشت ناپذیری در سامانه‌های بزرگ، تشخیص این موضوع است که در بیشتر موارد حافظه از طریق مجموعه‌ای از عناصر اولیه حافظه در هر سامانه شکل می‌گیرد. به عنوان مثال، در مواد مغناطیسی، هر حوزه مغناطیسی پایه اولیه‌ای است که رفتار پسماند را می‌سازد [۱۸ و ۲۲]. در مورد یک سامانه دانه‌ای، ناحیه‌های برشی^۲ [۲۳] و در برگه میچاله شده هر تاخوردگی یا کمانی شدگی موضعی می‌توانند نقش عناصر حافظه‌ای را داشته باشند.

یک عنصر اولیه حافظه را هیسترون می‌نامیم. یک هیسترون دارای دو حالت پایدار است که با $S = \pm 1$ نشان داده می‌شود. در شکل ۱. الف، حالت هیسترون بر حسب نیروی خارجی نشان داده شده است. تغییر حالت هیسترون زمانی اتفاق می‌افتد که نیروی خارجی از آستانه‌های خاصی که به عنوان حد آستانه بالا و پایین هیسترون شناخته می‌شود، فراتر رود. نیروی خارجی با γ و مقادیر آستانه با γ^+ و γ^- مشخص می‌شوند. وضعیت هیسترون در نیروهای میانی، آن‌چنان که از شکل پیداست به تاریخچه نیرو بستگی دارد. اگر از نیروهای خیلی کم شروع کرده و به تدریج نیرو را افزایش دهیم، هیسترون در حالت $S = -1$ قرار می‌گیرد؛ اما اگر از نیروهای زیاد شروع کرده و نیرو را کاهش دهیم، هیسترون در حالت $S = +1$ خواهد بود [۲۴ و ۲۵].

شکل ۱. ب، پاسخ مغناطیسی یک ماده فرومغناطیس به میدان خارجی است.

پدیده‌هایی درونی سامانه‌ها وادار می‌کند که ناقض تقارن وارونی زمان هستند. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که رفتار مورد بحث عموماً در سامانه‌های اتلافی و در شرایطی دیده می‌شود که اثرهای اینرسی غایب هستند. به نظر می‌رسد عاملی خودسامان‌یافته، مشابه اینرسی ولی نه با منشأ جرم، درون سامانه‌های بی‌نظم باشد که در رقابت با اتلاف، پاسخ دینامیکی برگشت‌ناپذیر و حافظه‌دار سامانه را عهده‌دار شوند. اگرچه پیشنهادهای بنیادی مختلفی برای این موضوع وجود دارد ولی به نظر می‌رسد هنوز توافق کاملی در مورد منشأ این نوع رفتار نداریم [۲۰ و ۲۱].

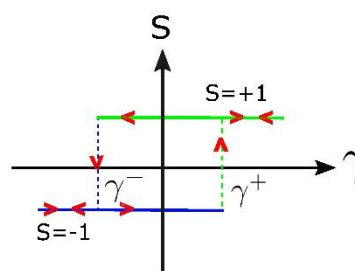
در سامانه‌های مبتنی بر میله‌های کشسان کمانی‌شونده، انتظار می‌رود ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی جالبی همچون وابستگی شدید به تاریخچه بارگذاری، تشکیل حلقه‌های پسماندی، و تغییر حد آستانه‌ها تحت تأثیر برهم‌کنش‌های غیرخطی مشاهده شود. به‌ویژه، انتظار داریم تغییر در پارامترهای مکانیکی (مانند سختی کشسانی) نه تنها بر آستانه‌های کمانش، بلکه بر پایداری حالت‌های گذرا و میزان حافظه‌پذیری سامانه تأثیر چشمگیری داشته باشد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که برهم‌کنش‌های دوسویه و غیردوسویه بین میله‌ها به تولید رفتارهای جمعی پیچیده، از جمله بهمن‌ها^۱ و تغییر مسیرهای گذار بر اساس ترتیب اعمال نیرو منجر شود. این ویژگی‌ها، سامانه را به الگویی آرمانی برای شبیه‌سازی پدیده‌های حافظه‌دار در مواد بی‌نظم واقعی تبدیل می‌کند.

هدف اصلی این مطالعه، درک رفتار پسماندی با تمرکز بر نقش برهم‌کنش‌ها است. تحقیقات گذشته در حوزه سامانه‌های حافظه‌دار مکانیکی بیشتر بر روی الگوهای ساده شده‌ای تمرکز داشته‌اند که برهم‌کنش بین عناصر حافظه‌پذیر (هیسترون‌ها) را نادیده می‌گیرند، نظیر الگوی کلاسیک پرایزاخ [۲۶]. با این‌که این الگوها قادر به توصیف رفتارهای اصلی حافظه هستند، اما الگوی با برهم‌کنش به دنیای واقعی نزدیک‌تر است. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های غیردوسویه نقش محوری در شکل‌گیری رفتارهای جمعی پیچیده‌تر ایفا می‌کنند، اما این موضوع تاکنون به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است.

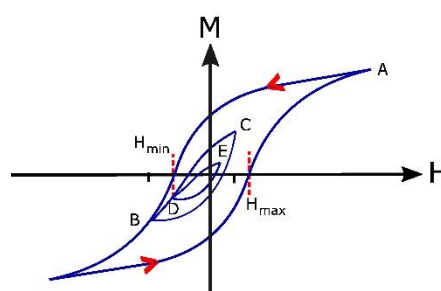
۱. Avalanche

۲. Shear zone

(الف)



(ب)



شکل ۱. الف. تصویر طرح‌واره از تغییر حالت یک هیسترون تنها [۲۶]. ب. نمودار حلقه‌های پسماند یک ماده فرومغناطیس که حافظه نقطه بازگشت نشان می‌دهند. این منحنی مطابق نظریه پرایزاک، از برهم‌نهی ساده پاسخ تعداد زیادی هیسترون بدون برهم‌کنش قابل حصول است.

الگوی پرایزاک^۱ که مجموعه‌ای از هیسترون‌های مستقل بدون برهم‌کنش است، قادر است تا این رفتار مغناطیسی را توضیح دهد [۲۶]. این الگو نشان می‌دهد که حتی مجموعه‌ای از هیسترون‌هایی که هیچ برهم‌کنشی با هم ندارند هم می‌توانند توالی‌های نسبتاً متنوعی از انتقال بین حالت‌ها را نشان دهند، که الزامات حافظه نقطه بازگشت (RPM) را برآورده می‌کند. سامانه می‌تواند حتی پس از انجام یک فرایند دوره‌ای، حالت اولیه خود را به خاطر بسپارد و به آن بازگردد. این رفتار را می‌توان در حلقه‌های پسماند یک ماده فرومغناطیس مشاهده کرد. به عنوان مثال همان‌طور که در شکل ۱. ب نشان داده شده است، با تغییر میدان مغناطیسی از نقطه اشباع A به B و سپس از B به C و بازگشت به B سامانه به حالت اولیه خود بازمی‌گردد. این حافظه در مسیر $ABCB$ و همچنین در مسیر $ABCDE$ مشاهده می‌شود [۲۷]. در این دو شکل، γ متناظر با H است و هر دو نیروی خارجی را نشان می‌دهند. حدود آستانه حلقه پسماند در شکل ۱. ب با خط چین نشان داده شده است. همین‌طور S که حالت دوتایی هیسترون را

نشان می‌دهد، متناظر با M و دو نقطه اشباع در این شکل است. نقطه اشباع مثبت متناظر با حالت $+1$ هیسترون و نقطه اشباع منفی متناظر با حالت -1 هیسترون است.

تعداد حالت‌های پایدار در سامانه بدون برهم‌کنش محدود است و ظرفیت حافظه سامانه پایین است. به منظور مطالعه بهتر، فرض می‌کنیم که این هیسترون‌ها با هم برهم‌کنش دارند. این برهم‌کنش‌ها می‌توانند طیف گسترده‌ای از مسیرهای پاسخ و نمودارهای گذار^۲ ایجاد کنند. به این مسیرها می‌توان مانند یک نقشه راه از نحوه واکنش سامانه به نیروهای خارجی نگاه کرد. زمانی که هیسترون‌ها با هم برهم‌کنش دارند، تغییر حالت یک هیسترون می‌تواند بر حد آستانه‌های دیگر هیسترون‌ها تأثیر بگذارد و در نتیجه تنوع خوبی از گراف‌های گذار را ایجاد کند. مطالعه در مورد عوامل تعیین‌کننده برهم‌کنش بین هیسترون‌ها ادامه دارد [۲۸-۲۹]. برای درک بهتر این سامانه‌ها، باید فیزیک زیربنایی برهم‌کنش بین هیسترون را درک کنیم و از آن دانش برای طراحی سامانه با رفتارهای واکنشی خاص استفاده کنیم.

۳. میله کمانی شونده: الگویی برای هیسترون

کمانش^۳ میله‌ها اولین بار توسط لئونارد اوایلر در اواخر قرن هفدهم مورد بررسی قرار گرفت [۳۰]. اوایلر مطالعه‌ای بر روی رفتار میله‌های کشسان تحت تأثیر نیروی فشاری انجام داد. اگر یک میله کشسان صاف را در نظر بگیریم که تحت اثر یک نیروی فشاری خارجی است که به دو سر آن وارد می‌شود، میله برای نیروهای بزرگتر از یک نیروی آستانه، ناپایداری مکانیکی را تجربه می‌کند. فراتر از این نیروی آستانه، میله دیگر نمی‌تواند پیکربندی مستقیم خود را حفظ کند و کمانی می‌شود.

برای میله‌های همسانگرد، احتمال کمانش به سمت راست یا چپ برابر است. این امر منجر به ایجاد یک وضعیت دوپایایی می‌شود که در دستگاه‌های مکانیکی مختلف به کار گرفته می‌شود [۱۴].

اصل پدیده کمانش و اتفاقات مربوطه را می‌توان با استفاده از دو فنر خطی که از یک سرشان به هم لولا شده‌اند و از دو سر آزادشان تحت اثر نیروی فشاری هستند، مطالعه کرد. مطابق

۱. Priesach

۲. Transition graph

۳. Buckling

حالت کمانی شده ($\tilde{x} \neq 0$) در نقطه $\delta l = 0$ اتفاق می‌افتد. این گذار پیوسته است به این معنا که پارامتر نظم $\tilde{x}$ ، در نقطه گذار به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. در این گذار، تقارن راست-چپ به‌طور خودبه‌خودی شکسته می‌شود.

در امتداد محور عمودی و در محدوده $\delta l > 0$ ، با تغییر $\tilde{\gamma}$ سامانه یک گذار ناپیوسته (مرتبه اول) از حالت کمانی راست به حالت کمانی چپ در $\tilde{\gamma} = 0$ را تجربه می‌کند.

آن‌چنان که در شکل دیده می‌شود قسمت‌هایی از فازهای R و L را با خط‌چین جدا کرده و به ترتیب با ML و MR مشخص کرده‌ایم. مرز این دو ناحیه که به صورت خط چین مشخص شده است به صورت کیفی با رابطه‌ای به صورت $\tilde{\gamma} \sim \delta l^{2/3}$ رفتار می‌کند [۳۱]. در این ناحیه‌ها، منحنی انرژی علاوه بر کمینه‌های اصلی که به ترتیب فازهای کمانش راست و چپ را مشخص می‌کنند، دارای کمینه‌های موضعی دیگری هم هستند که به ترتیب با حالت‌های کمانی چپ و راست متناظرند. مثلاً در ناحیه MR به شرطی که رفتار دینامیکی سامانه (ناشی از دیگر پدیده‌هایی که سهمش در انرژی لحاظ نشده) اجازه دهد، می‌تواند به‌صورت شبه‌پایدار در وضعیت کمانش راست قرار گیرد. در گذر از یک حالت کمانی چپ به یک حالت کمانی راست، مثلاً از A به B ، تغییرات کیفی منحنی انرژی در شکل ۲. پ نشان داده شده است.

موضوع پسماند و حافظه در ارتباط مستقیم با حالت‌های شبه پایا در منحنی فاز است. فرض کنید با تغییر شبه ایستای میدان خارجی از نقطه A به B برسیم. ابتدا نیروی خارجی یک عدد منفی و سامانه در حالت کمانش چپ است و با کاهش مقدار نیرو تا صفر، سامانه در کمانش چپ می‌ماند. با تغییر جهت میدان و افزایش شدتش تا یک میدان آستانه $\tilde{\gamma}^+$ ، سامانه می‌تواند همچنان در کمینه موضعی یعنی کمانش چپ به‌صورت شبه پایدار بماند. بعد از این میدان آستانه، کمانش به راست رخ می‌دهد تا به نقطه B برسیم. در مسیر بازگشت از B به A ، حالت کمانش راست تا رسیدن به میدان خارجی $\tilde{\gamma}^-$ پایدار می‌ماند.

شکل الف، ضریب سختی فنرها را با k و طول تعادلی آنها را با l نشان می‌دهیم. در وضعیت تعادلی، فنرها هم‌راستا هستند و دو سر آزاد آنها از هم فاصله $2l$ دارند. با اعمال نیروی فشاری به دوسوی آزاد فنرها، کل سامانه به اندازه δl فشرده می‌شود. جابه‌جایی عرضی لولا را با x نشان می‌دهیم. انرژی پتانسیل این مجموعه به‌صورت زیر می‌شود:

$$U_{\delta l}(x) = 2 \times \frac{1}{2} k (\sqrt{x^2 + (l - \delta l)^2} - l)^2 - \gamma x \quad (1)$$

$$U = -\frac{T}{\gamma} x^2 + u x^4 - \gamma x.$$

که در آن $T = \frac{2k\delta l}{l}$ و $u = \frac{k}{4l^3}$ است و نتیجه نهایی را برای جابه‌جایی‌های بسیار کوچک (x و δl) بسط داده و بزرگترین جملات بسط را تا مرتبه اول δl نگاه داشته‌ایم.

اکنون با تعریف پارامترهای بدون بعد به صورت زیر:

$$\tilde{x} = x/l, \tilde{\delta l} = \delta l/l, \tilde{U} = U/(kl^2), \tilde{T} = T/k, \quad (2)$$

$$\tilde{u} = ul^3/k, \tilde{\gamma} = \gamma/kl$$

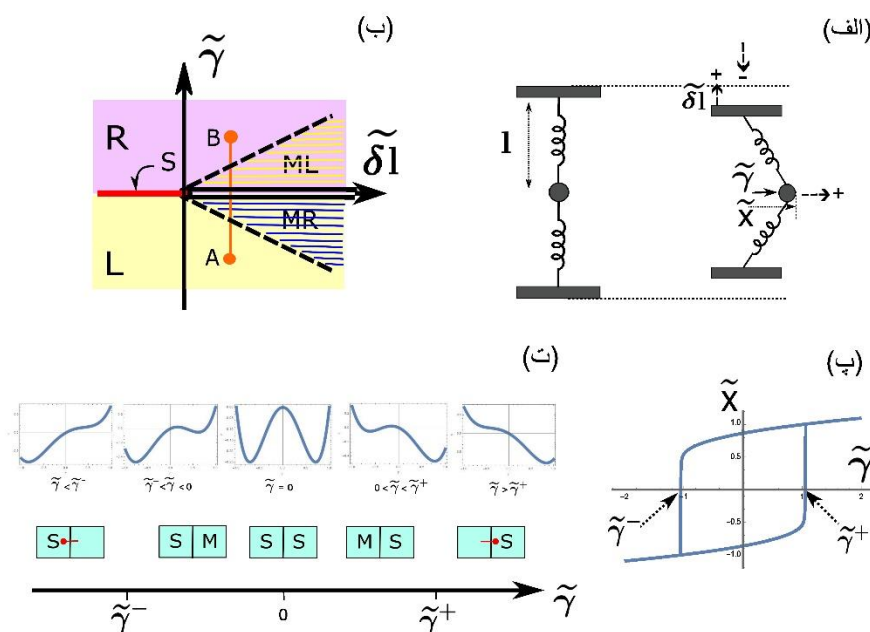
معادله بدون بعد انرژی پتانسیل به صورت زیر خواهد بود:

$$\tilde{U} = -\frac{\tilde{T}}{\tilde{\gamma}} \tilde{x}^2 + \tilde{u} \tilde{x}^4 - \tilde{\gamma} \tilde{x}. \quad (3)$$

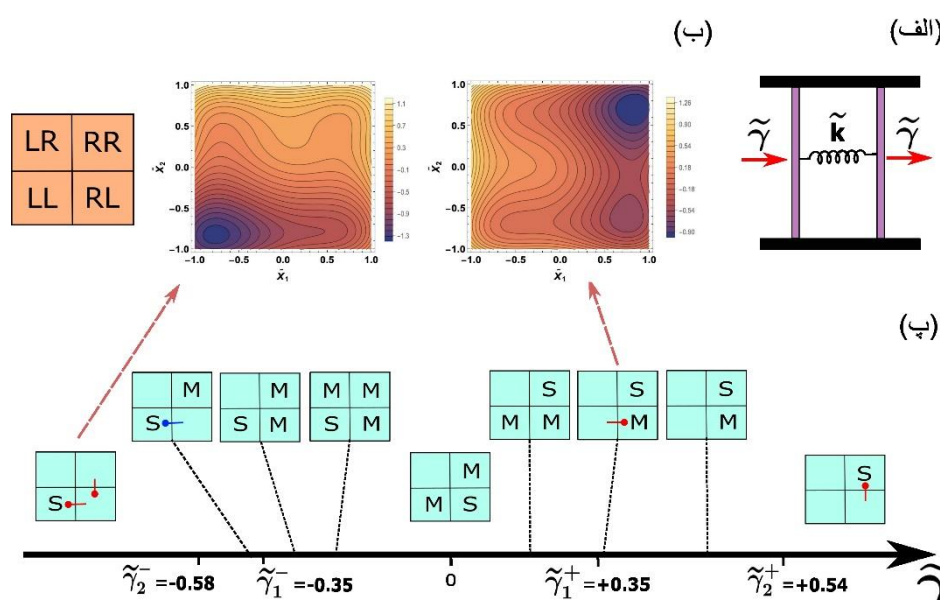
علاوه بر نیروی فشاری، یک نیروی عرضی (عمود بر راستای طولی فنرها) نیز به لولای مرکزی اعمال می‌کنیم. شباهت انرژی بدست آمده با انرژی آزاد لاندو-گینزبرگ یک سامانه ترمودینامیکی در نزدیکی نقطه بحرانی‌اش بیانگر شباهت پدیده کمانی شدن با گذار فازهای ترمودینامیکی است. در این تناظر متغیر $\tilde{x}$ نقش پارامتر نظم و $\tilde{\delta l}$ و $\tilde{\gamma}$ به ترتیب جایگزین فاصله از دمای بحرانی و میدان خارجی می‌شوند.

مطالعه کمینه انرژی برای $\tilde{\delta l}$ و $\tilde{\gamma}$ مختلف، وضعیت‌های تعادلی سامانه را مشخص می‌کند. شکل ۲. ب، فازهای سامانه را در فضای $\tilde{\delta l} \times \tilde{\gamma}$ نشان می‌دهد. این نمودار سه فاز متمایز را آشکار می‌کند: حالت کمانی راست (R)، کمانی چپ (L) و مستقیم (S).

در امتداد محور افقی $\tilde{\gamma} = 0$ ، با حرکت از قسمت منفی به مثبت، یک گذار پیوسته (گذار کمانش) از حالت مستقیم ($\tilde{x} = 0$) به



شکل ۲. الف. الگوی دو فنر لولا شده قادر است تا جزئیات اصلی پدیده کمانش را شرح دهد. با اعمال فشار خارجی و فشرده کردن فنرها، حالت هم‌راستا ناپایدار شده و سامانه به راست یا چپ منحرف (کمانی) می‌شود. ب. منحنی فاز سامانه نشان داده شده است. حالت صاف با S و حالت کمانی راست و چپ به ترتیب با R و L نشان داده شده است. در ناحیه ML منحنی انرژی سامانه دو کمینه دارد که کمینه اصلی با کمانش راست متناظر است و کمینه موضعی دوم با حالت کمانش چپ متناظر است. وضعیت برعکس برای ناحیه MR برقرار است. پ و ت. منحنی پسماند (جابه‌جایی تعادلی برحسب نیروی خارجی) و منحنی انرژی برای نقاط مختلف مسیر A تا B نشان داده شده است. کمینه‌های پایدار و شبه پایدار به ترتیب با S^۱ و S^۲ نشان داده شده است.



شکل ۳. الف. سامانه شامل ۲ هیسترون که به وسیله فنر با هم برهم‌کنش دارند. ب. چند نمونه از چشم انداز انرژی سامانه با استفاده از نمودارهای تراز. پ. تمام چشم اندازهای انرژی برای سامانه با دو هیسترون مکانیکی. زمانی که نیروی خارجی از مقدار آستانه فراتر می‌رود، یکی از کمینه‌ها ناپدید می‌شود و سامانه به کمینه دیگری می‌رود.

۱. Stable

۲. Metastable

شده و ناپدید می‌گردد. این واقعه نشان دهنده عبور از حد آستانه بالا است و سامانه به حالت راست منتقل می‌شود. به همین ترتیب در مسیر بازگشت (کاهش نیرو)، پتانسیل دوباره ساختار دو چاهی می‌یابد، ولی سامانه هم‌چنان در حالت راست است. تنها با عبور از حد آستانه پایین (تبدیل ساختار دو چاهی به تک چاهی)، سامانه به حالت چپ باز می‌گردد. در بخش‌های بعدی، از روش دینامیکی برای تعیین دقیق‌تر این میدان‌های آستانه بهره گرفته‌ایم.

۴. دو هیسترون: برهم‌کنش دوسویه و غیر دوسویه

یک مجموعه شامل دو میله کشسان کم‌انرژی شونده نه تنها به عنوان یک سامانه مکانیکی با دو حالت پایدار مورد بررسی قرار می‌گیرد، بلکه به عنوان ساده‌ترین الگو برای نشان دادن برهم‌کنش دو هیسترون نیز استفاده می‌شود. در شکل ۳ الف هندسه دو میله نشان داده شده است. هنگامی که دیواره‌ها به اندازه δl از موقعیت اولیه خود جابه‌جا شوند، سامانه از پیکربندی خطی اولیه خود منحرف می‌شود. با توجه به این‌که سامانه دارای دو هیسترون است، چهار حالت مختلف وجود خواهد داشت: (LL) ، (LR) ، (RL) و (RR) .

انرژی این سامانه را می‌توان به صورت معادله (۵) توصیف کرد:

$$\tilde{U}(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = -\frac{\tilde{T}}{2}\tilde{x}_1^2 + \tilde{u}\tilde{x}_1^4 - \tilde{\gamma}_1\tilde{x}_1 - \frac{\tilde{T}'}{2}\tilde{x}_2^2 + \tilde{u}'\tilde{x}_2^4 - \tilde{\gamma}_2\tilde{x}_2 + \frac{1}{2}\tilde{K}(\tilde{L} - \tilde{L} - \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2)^2. \quad (5)$$

که در آن، یک برهم‌کنش عرضی کشسان بین میله‌ها در نظر گرفته‌ایم. فاصله جانبی میله‌ها $\tilde{L}$ و قدرت برهم‌کنش با $\tilde{K}$ نشان داده شده است. نیروهای جانبی وارد بر میله‌ها را با $\tilde{\gamma}_1$ و $\tilde{\gamma}_2$ نشان داده‌ایم.

معادله حرکت دو هیسترون به صورت زیر می‌شود:

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{x}}_1 &= -\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_1} \tilde{U} - \alpha \tilde{x}_2, \\ \ddot{\tilde{x}}_2 &= -\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_2} \tilde{U} + \alpha \tilde{x}_1. \end{aligned} \quad (6)$$

آن طور که در معادله حرکت هیسترون‌ها دیده می‌شود، علاوه بر برهم‌کنش دوسویه و کشسان، یک برهم‌کنش غیر دوسویه^۱ با قدرت α بین هیسترون‌ها در نظر گرفته شده است.

هرچند به لحاظ شهودی با این استدلال کیفی، امکان برگشت ناپذیری در مسیر A به B قابل درک است، ولی می‌توانیم با در نظر گرفتن یک الگوی دینامیکی اتلافی برای متغیر x موضوع را بیشتر بررسی کنیم. در ساده‌ترین حالت، فرض می‌کنیم که اتلاف موجود در سامانه متناسب با سرعت و با ضریب اصطکاک ζ داده می‌شود. در این صورت با در نظر گرفتن ثابت فنرها، دیده می‌شود که زمان مشخصه‌ای برابر با $\tau = \zeta/k$ به سامانه نسبت داده می‌شود. در صورتی که از زمان بدون بعد $\tilde{t} = t/\tau$ استفاده کنیم، معادله تحوّل بدون بعد شده سامانه اتلافی به صورت زیر می‌شود:

$$\ddot{\tilde{x}} = -\frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \tilde{U}. \quad (4)$$

و البته یک نیروی خارجی وابسته به زمان هم به صورت $\tilde{\gamma} = A \sin(\tilde{\omega} \tilde{t})$ با $\tilde{\omega} = \omega \tau$ وارد جمله پتانسیل می‌شود. پارامتر A نیز بدون بعد است. برای مطالعه پسماند و برگشت ناپذیری، مسیر حرکت در فضای $\tilde{\gamma} \times \tilde{x}$ در شکل ۲ پ رسم شده است. آن‌چنان که پیش از این نیز اشاره شد، برگشت ناپذیری به جزییات دینامیکی مانند $\tilde{\omega}$ و A بستگی دارد.

در ادامه و برای محاسبات عددی، $\tilde{\omega} = 0.3$ و $A = 2$ انتخاب می‌شود. در صورت انتخاب‌های دیگر، به آن اشاره خواهد شد. این انتخاب پارامترها به ما اجازه می‌دهد تا وضعیت دینامیکی خاصی را بررسی کنیم و ببینیم که هیسترون‌ها چگونه در پاسخ به این نوسانات خارجی رفتار می‌کنند. میدان‌های آستانه $\tilde{\gamma}^+$ و $\tilde{\gamma}^-$ به صورت کیفی در شکل ۲ ت مشخص شده‌اند.

معیار تشخیص میدان‌های آستانه در این بخش از مقاله کیفی است و مبتنی بر تحلیل چشم اندازه‌های انرژی است. با تغییر نیروی خارجی توپولوژی چشم‌انداز انرژی تغییر می‌کند. در مقادیر کم نیروی خارجی، پتانسیل دارای یک چاه است و سامانه در حالت چپ قرار دارد. با افزایش نیروی خارجی، شکل انرژی به دو چاه تبدیل می‌شود، اما سامانه همچنان در چاه مربوط به حالت چپ باقی می‌ماند. گذار حالت سامانه تنها زمانی اتفاق می‌افتد که شکل انرژی مجدداً به تک چاه تبدیل شود. در این نقطه، یکی از کمینه‌ها به یک نقطه زینی تبدیل

برهم‌کنش‌های غیرپتانسیلی که در این‌جا با پارامتر α الگوسازی می‌شوند، تقارن‌کنش-واکنش (قانون سوم نیوتون) را در سامانه‌های غیر تعادلی می‌شکنند. اهمیت آن‌ها در این است که موجب ظهور پدیده‌های ناشناخته به ویژه در توصیف سامانه‌های چند ذره‌ای می‌شوند. این برهم‌کنش‌ها در سامانه‌های کلئیدهای کاتالیستی (میکروشناگرها) و پلاسمای پیچیده به صورت تجربی مشاهده شده‌اند. مقدار α در این برهم‌کنش‌ها بیانگر نسبت نیروهای غیردوسویه به دوسویه است. این پارامتر صرفاً یک ابزار ریاضی نیست، بلکه کمیتی فیزیکی با پیامدهای نظری عمیق است [۱۷، ۲۸، ۳۲ و ۳۳].

در یک سامانه بزرگ که اجزای زیادی دارد و ما فقط به مطالعه حرکت برخی از قسمت‌های برگزیده آن علاقه‌مند هستیم و جزییات دیگر قسمت‌ها برای ما مهم نیست، نقش دیگر قسمت‌ها به صورت یک برهم‌کنش مؤثر در نظر گرفته می‌شود. مثلاً در سامانه‌های مکانیکی حافظه‌دار، هیسترون‌ها درجات آزادی برگزیده آن هستند. در سامانه‌هایی که پویا هستند، مثل سامانه‌های حافظه‌ای مورد نظر ما که به صورت چرخه‌ای از جانب نیروی خارجی انرژی می‌گیرند، لزومی ندارد برهم‌کنش مؤثر بین اجزای برگزیده با قانون سوم نیوتن سازگار باشد. البته توجه شود که اگر قادر بودیم معادلات حرکت تمامی درجات آزادی را بنویسیم، لزوماً قانون سوم نیوتن برقرار می‌شد.

الگویی که ما استفاده می‌کنیم، ساده‌ترین شکل از برهم‌کنش غیر پتانسیلی است که با یک پارامتر α مشخص می‌شود. در بحث زیر، ابتدا حالت $\alpha = 0$ بررسی می‌شود، سپس نقش برهم‌کنش‌های غیر دوسویه، با در نظر گرفتن حالت $\alpha \neq 0$ مطالعه می‌شود.

۵. برهم‌کنش پتانسیلی

در این بخش، رفتار سامانه دو هیسترونی با برهم‌کنش دوسویه ($\alpha = 0$) بررسی می‌شود. چشم‌انداز انرژی مفهوم مفیدی برای بررسی رفتار سامانه است و در شکل ۳. ب نمونه‌هایی از این چشم‌اندازها نمایش داده شده‌اند. برای به دست آوردن آن‌ها مقادیر عددی را به صورت

$\tilde{T} = 2, \tilde{u} = 1, \tilde{T}' = 3, \tilde{u}' = 1/5, \tilde{k} = 0/3$ جایگذاری کردیم و با تغییر نیروی جانبی وارد بر این هیسترون‌ها که در این‌جا به صورت $\tilde{\gamma}_1 = \tilde{\gamma}_2 = \tilde{\gamma}$ است، منحنی‌های قسمت ۳. پ و چشم‌اندازهای انرژی قسمت ب به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از این چهار کمینه در نمودارها، یک حالت متفاوت سامانه را نشان می‌دهد. نماد S نشان دهنده یک حالت پایدار و نماد M نشان دهنده یک حالت شبه پایدار است. تغییر حالت سامانه زمانی رخ می‌دهد که کمینه مربوط به حالت فعلی ناپدید شود و سامانه به کمینه جدیدی منتقل گردد. در شکل ۳. پ، رفتار سامانه با افزایش نیروی خارجی از حالت اولیه چپ-چپ (LL) بررسی شده است. چشم‌انداز انرژی با تغییر نیرو، تعداد متفاوتی از کمینه‌ها (دو، سه یا چهار) را نشان می‌دهد. سامانه تا رسیدن نیروی خارجی به $\tilde{\gamma} > \tilde{\gamma}^+$ در حالت قبلی باقی می‌ماند، اما پس از آن، کمینه قبلی به یک نقطه زینی که با یک دایره قرمز در شکل نشان داده شده است، تبدیل شده و ناپدید می‌شود و سامانه به حالت جدید راست-چپ (RL) جهش می‌کند. با افزایش بیشتر نیروی خارجی، انتقال از حالت (RL) به (RR) رخ می‌دهد. کاهش نیرو این انتقال‌ها را وارون می‌کند.

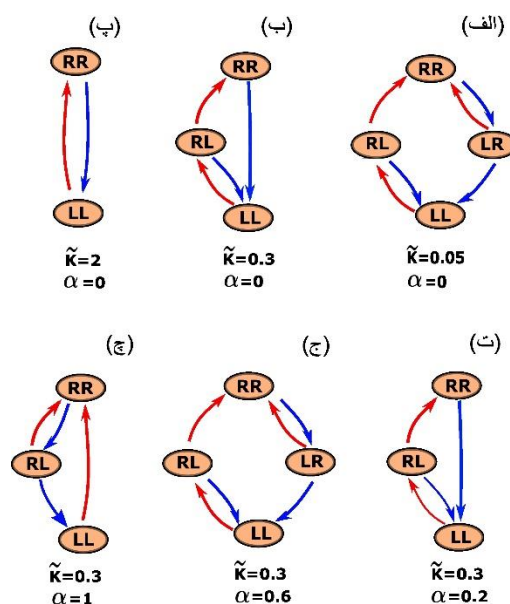
در طول این انتقال‌ها، پدیده بهمن^۱ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده گذار سامانه از طریق حالت‌های میانی ناپایدار است. پدیده بهمن به گذارهای زنجیره‌ای غیرپیوسته اشاره دارد که در آن، تغییر حالت یک هیسترون، حد آستانه هیسترون مجاور را کاهش یا افزایش می‌دهد و موجب گذار دوم می‌شود. به عنوان مثال، سامانه‌ای را در نظر بگیرید که با رسیدن نیروی خارجی $\tilde{\gamma}$ به آستانه بحرانی، از حالت اولیه S به حالت S' گذار می‌کند. این گذار، حد آستانه هیسترون مجاور را تغییر می‌دهد، به طوری که بدون نیاز به تغییر نیروی خارجی، این نیرو از حد آستانه هیسترون ذکرشده نیز عبور کند و باعث گذار آن به حالت پایدار S'' شود. این گذار دو مرحله‌ای، بهمن به طول دو نامیده می‌شود.

نیرو، به حالت قبلی بازمی‌گردد. گذارهای مشابهی نیز برای حالت‌های (LR) و (RR) مشاهده شد.

با تغییر ضریب سختی فنر به عنوان معیاری برای شدت برهم‌کنش، پاسخ‌های دینامیکی سامانه نیز تغییر می‌کند. برای برهم‌کنش‌های ضعیف (ضریب سختی ۰/۰۵)، گراف گذار شبیه به الگوی پرایزخ است (شکل ۴. الف). برای برهم‌کنش‌های متوسط (ضریب سختی ۰/۳)، سامانه یک بهمن به طول ۲ را تجربه می‌کند (شکل ۴. ب). در حالی که برای برهم‌کنش‌های قوی (ضریب سختی ۲)، دو بهمن به طول ۲ مشاهده می‌شود (شکل ۴. پ). این نتایج نشان می‌دهند که حتی در سامانه‌های دو هیسترونی، برهم‌کنش‌ها می‌توانند منجر به رفتارهای پیچیده و متنوعی شوند.

۶. برهم‌کنش غیر پتانسیلی

برای مطالعه رفتار سامانه غیر پتانسیلی $\alpha \neq 0$ ، مفهوم انرژی کارایی سابق را ندارد و مجبوریم از معادلات دینامیکی رفتار گذارهای درونی سامانه را بررسی کنیم. در این حالت به هر دو هیسترون یک نیروی نوسانی دوره‌ای $\tilde{r} = A \sin(\tilde{\omega} \tilde{t})$ با دامنه $A = 2$ و سرعت نوسان $\tilde{\omega} = 0/3$ اعمال می‌شود. همچنین مقادیر عددی $\tilde{T} = 2, \tilde{u} = 1, \tilde{T}' = 7/3, \tilde{u}' = 4$ در معادله (۶) جایگذاری می‌شوند. نمودارهای گذار برای حالتی که برهم‌کنش متوسط ($\tilde{K} = 0/3$) در سامانه وجود دارد، رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ پایین، ت تا چ، نشان داده شده است، پاسخ دینامیکی سامانه با تغییر قدرت برهم‌کنش غیر دوسویه (۰/۲، ۰/۶ و ۱) متفاوت است که منجر به ایجاد مسیرهای متنوع در حافظه سامانه می‌شود. به عنوان مثال، برای نمونه‌ایی که قدرت برهم‌کنش غیر دوسویه $\alpha = 0.2$ است، ابتدا هیسترون اول تغییر حالت می‌دهد و بعد هیسترون دوم، و نهایتاً از حالت (RR) به (LL) یک بهمن به طول ۲ مشاهده می‌کنیم. در حالی که برای نمونه‌ایی که قدرت برهم‌کنش غیر دوسویه $\alpha = 1$ است، از ابتدا هر دو هیسترون تغییر حالت می‌دهند و یک بهمن به طول ۲ مشاهده می‌کنیم، و در نهایت هنگام کم کردن نیروی خارجی، ابتدا هیسترون دوم و سپس هیسترون اول تغییر حالت می‌دهند.



شکل ۴. الف. گراف‌های گذار برای سامانه با برهم‌کنش ضعیف با ضریب سختی فنر $\tilde{K} = 0/05$. ب. نمودار گذار برای سامانه با برهم‌کنش متوسط با ضریب سختی فنر $\tilde{K} = 0/3$. پ. نمودار گذار برای سامانه با برهم‌کنش قوی با ضریب سختی فنر $\tilde{K} = 2$. در این نمودارها، پیکان‌های قرمز نشان دهنده انتقال‌های رو به بالا هستند که با افزایش نیروی خارجی به دست می‌آید و پیکان‌های آبی نشان دهنده انتقال‌های رو به پایین هستند که با کاهش نیروی خارجی به دست می‌آید. پایین. گراف‌های گذار در حضور برهم‌کنش غیر دوسویه. ت تا چ به ترتیب مربوط به برهم‌کنش متوسط $\alpha = 0/2$ ، $\alpha = 0/6$ و $\alpha = 1$.

طول بهمن نشان دهنده تعداد ناپایداری‌های زنجیره‌ایی در این فرآیند است. نکته قابل توجه این است که حالت میانی در آزمایش‌ها غیر قابل مشاهده است. تعداد حالت‌های میانی درگیر در یک بهمن پارامتری مهم محسوب می‌شود، چرا که بر رفتار کلی و پایداری سامانه تأثیرگذار است [۲۷]. در اینجا، انتقال از حالت (RR) به (LL) یک بهمن به طول ۲ را نمایش می‌دهد. برای تحلیل دقیق‌تر، از گراف‌های گذار استفاده شده است که تمام گذارهای ممکن بین حالت‌های تعادلی سامانه را نشان می‌دهند. با اعمال نیروی چرخه‌ای با دامنه کوچک، گذارهای سامانه بین حالت‌ها بررسی شده‌اند. در شکل ۴. الف، این گذارها به صورت گراف نمایش داده شده‌اند، که در آن پیکان‌های قرمز و آبی به ترتیب نشان‌دهنده گذارهای ناشی از افزایش و کاهش نیروی خارجی هستند. به عنوان مثال، سامانه از حالت اولیه (LL)، با افزایش نیرو به حالت (RL) منتقل می‌شود و سپس با کاهش

۷. نمودارهای گذار

روش بدست آوردن نمودارهای گذار برای دو بخش برهم‌کنش پتانسیلی و غیر پتانسیلی به دو روش انجام شده است: روش کیفی و روش دینامیکی.

در روش کیفی از چشم‌انداز انرژی برای تحلیل رفتار سامانه استفاده شد. معادله (۵) به صورت عددی رسم و نمودارهای ترازای آن ترسیم گردید. با توجه به وجود دو هیسترون، چهار چاه پتانسیل در نمودارهای ترازای داریم که هر یک متناظر با یکی از حالت‌های (LL) ، (LR) ، (RL) و (RR) است.

راهنمای مربوط به مکان هر کدام از حالت‌ها در شکل ۱ الف آورده شده است. برای نمونه، در مقادیر پایین نیروی خارجی، پتانسیل دارای یک چاه است و سامانه در حالت (LL) قرار دارد. با افزایش نیروی خارجی، پتانسیل به دو چاه تبدیل می‌شود، اما سامانه همچنان در چاه مربوط به حالت (LL) باقی می‌ماند. گذار حالت سامانه زمانی اتفاق می‌افتد که چاه متناظر با حالت (LL) ناپدید شود و سامانه به حالت (RL) منتقل گردد. در این مرحله، چاه مربوط به حالت (RR) پدیدار می‌شود. اما سامانه تنها زمانی به این حالت می‌رود که چاه مربوط به حالت (RL) ناپدید شود. در نهایت، با ناپدید شدن چاه حالت (RR) سامانه به حالت (LR) می‌رود و بعد از آن دوباره به حالت (LL) برمی‌گردد و چرخه تکمیل می‌شود. دو نمونه از این نمودارهای ترازای در شکل ۳ ب آورده شده‌اند. در روش دینامیکی که مربوط به برهم‌کنش غیرپتانسیلی است، معادلات (۶) به صورت عددی حل شدند و نمودارهای پسماند مربوطه ترسیم گردیدند. با استفاده از این نمودارها زمان و شرایط گذار از یک حالت به حالت دیگر پیدا شدند. به عبارت دیگر نمودار پسماند اول مربوط به هیسترون اول (میله کشسان اول) و نمودار پسماند دوم مربوط به هیسترون دوم است. برای هر دو نمودار، نقطه اشباع سمت راست به عنوان حالت راست و نقطه اشباع سمت چپ به عنوان حالت چپ در نظر گرفته شدند. با اعمال نیروی نوسانی به هر دو میله حالت‌های مختلف سامانه به دست می‌آید. به عنوان مثال، در ابتدا هر دو هیسترون در حالت چپ قرار دارند، با افزایش نیروی نوسانی هیسترون

اول در حالت راست قرار می‌گیرد و هیسترون دوم در حالت چپ باقی می‌ماند. با ادامه افزایش نیروی خارجی، در نهایت سامانه به حالت اولیه بازمی‌گردد.

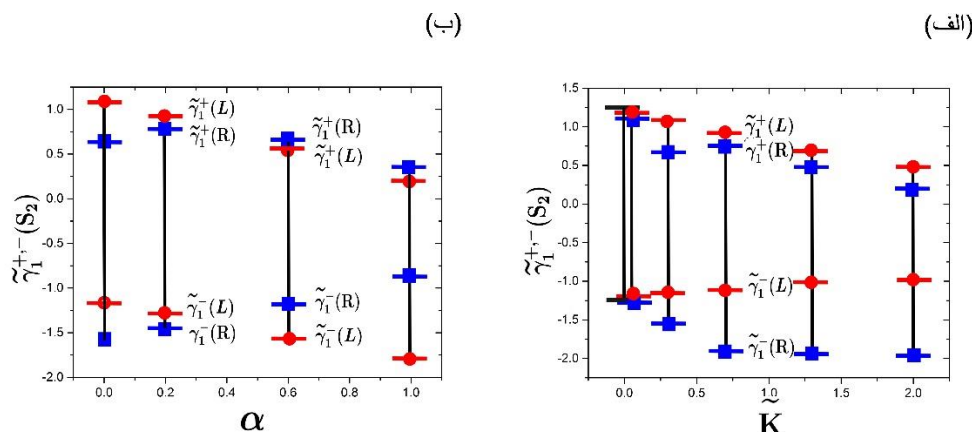
۸. برهم‌کنش و حدود آستانه

هر هیسترون آرمانی توسط دو پارامتر کلیدی مشخص می‌شود: میدان‌های آستانه بالا و پایین $\gamma^{\pm}$ (نقاطی که در آن هیسترون‌ها تغییر حالت می‌دهند) و حالت فعلی هر هیسترون، که با یک متغیر دو حالتی $S = \pm 1$ نمایش داده می‌شود. در الگوی کماتش مکانیکی مورد استفاده در این مقاله، حالت $S = -1$ با L و $S = +1$ با R متناظر هستند.

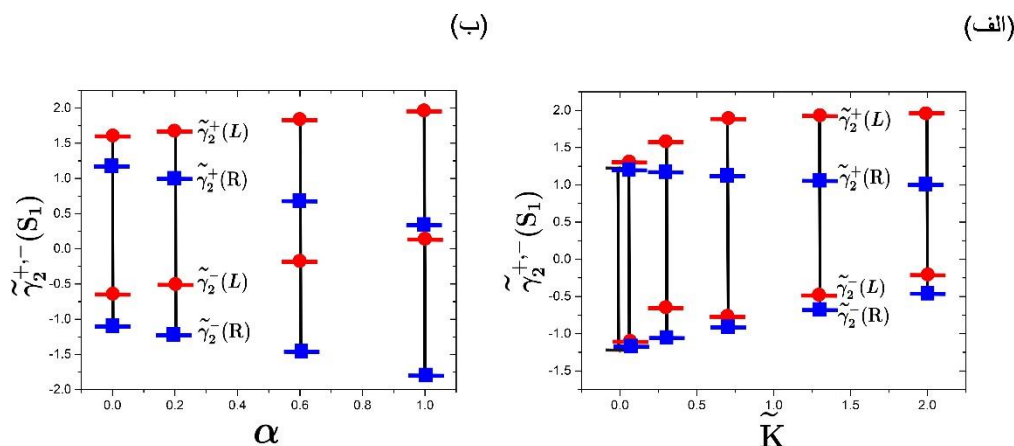
پرسش اصلی این پژوهش این است که چگونه برهم‌کنش بین هیسترون‌ها می‌تواند میدان‌های آستانه آنها را تحت تاثیر قرار دهد. برای جداسازی اثر خالص برهم‌کنش‌ها، دو هیسترون همسان با مقادیر عددی یکسان $\tilde{T} = 2, \tilde{u} = 1, \tilde{T}' = 2, \tilde{u}' = 1$ در نظر گرفته شدند. شدت برهم‌کنش بین هیسترون‌ها با تغییر ضریب سختی فنر ($\tilde{K}$) در الگوی مکانیکی (معادله (۵)) کنترل شد. این ضریب به‌طور مستقیم در معادلات حاکم بر سامانه جایگذاری و حل شد. تأثیر برهم‌کنش در سه سطح مختلف برهم‌کنش ضعیف، برهم‌کنش متوسط و برهم‌کنش قوی شبیه‌سازی و تحلیل شد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که برهم‌کنش بین هیسترون‌ها باعث جابه‌جایی در میدان‌های آستانه هر هیسترون می‌شود. این جابه‌جایی به شدت برهم‌کنش و حالت هیسترون همسایه بستگی دارد.

شکل ۵. الف، تغییرات میدان‌های آستانه هیسترون اول را هنگامی که هیسترون دوم در حالت راست $S = +1$ یا چپ $S = -1$ قرار دارد، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش $\tilde{K}$ (شدت برهم‌کنش)، مقادیر میدان‌های آستانه هیسترون اول نسبت به مقادیر اولیه، جابه‌جا می‌شوند. میزان و جهت این جابه‌جایی به حالت هیسترون دوم بستگی دارد.



شکل ۵. الف. تغییرات حدود آستانه هیسترون اول در پاسخ به تغییر ضریب برهم‌کنش پتانسیلی، هنگامی که هیسترون دوم در حالت راست یا چپ قرار دارد. ب. تغییرات حدود آستانه هیسترون اول در پاسخ به تغییر ضریب برهم‌کنش غیردوسویه. راهنما: خطوط قرمز حدود آستانه بالا و پایین هیسترون اول، زمانی که هیسترون دوم در حالت چپ قرار دارد. و خطوط آبی حدود آستانه بالا و پایین هیسترون اول را نشان می‌دهد، زمانی که هیسترون دوم در حالت راست قرار دارد.



شکل ۶. الف. تغییرات حدود آستانه هیسترون دوم در پاسخ به تغییر ضریب برهم‌کنش پتانسیلی، هنگامی که هیسترون اول در حالت راست یا چپ قرار دارد. ب. تغییرات حدود آستانه هیسترون دوم در پاسخ به تغییر ضریب برهم‌کنش غیردوسویه.

هیسترون در برهم‌کنش ضعیف/متوسط و تغییر آن در برهم‌کنش قوی) کاملاً مشابه رفتار هیسترون اول در شکل ۵. الف است و تأییدی بر نتایج کلی است.

الگوی خطی مرسوم برای برهم‌کنش بین هیسترون‌ها از طریق وابستگی خطی حد آستانه‌های بالا و پایین، $\tilde{\gamma}_i^{\pm}$ ، به حالت‌های، S_j ، هیسترون‌های دیگر بیان می‌شود. حدود آستانه هیسترون نام که در تعامل با هیسترون‌های دیگر است، به صورت زیر تعریف می‌شود [۱ و ۱۷ و ۲۷]:

$$\tilde{\gamma}_i^{\pm} = \tilde{\gamma}_i^{0\pm} - \sum_{j \neq i} C_{ij} S_j. \quad (V)$$

در این معادله، $\tilde{\gamma}_i^{0\pm}$ معرف حدود آستانه هیسترون نام در حالت منفرد و بدون برهم‌کنش است و C_{ij} ثابت برهم‌کنش بین

طول هیسترون از اختلاف میدان‌های آستانه بالا و پایین بدست می‌آید ($\Delta\tilde{\gamma} = \tilde{\gamma}^+ - \tilde{\gamma}^-$). در برهم‌کنش‌های ضعیف و متوسط، طول هیسترون اول ثابت می‌ماند به این دلیل که جابه‌جایی میدان‌های آستانه به گونه‌ای است که فاصله بین آن‌ها حفظ می‌شود. در حالی که در برهم‌کنش‌های قوی، طول هیسترون اول تغییر می‌کند. هم حد آستانه بالا و هم حد آستانه پایین به طور مستقل تحت تأثیر قرار می‌گیرند و فاصله بین آن‌ها ثابت نمی‌ماند. شکل ۶. الف، همین تحلیل را برای هیسترون دوم ارائه می‌دهد. این شکل تغییرات $\tilde{\gamma}_2^+$ و $\tilde{\gamma}_2^-$ را هنگامی که هیسترون اول در حالت راست یا چپ قرار دارد، نشان می‌دهد. رفتار مشاهده شده برای هیسترون دوم (ثابت ماندن طول

که عهده‌دار سازوکار حافظه‌دار شدن این سامانه‌های بزرگ هستند. در نظر گرفته می‌شود که یک سامانه بزرگ پیچیده می‌تواند در برگیرنده مجموعه‌ای از این هیسترون‌ها باشد. تصور بر این است که در هر سامانه، هیسترون می‌تواند مجموعه‌ای سامان یافته از درجات آزادی درونی آن باشد.

الگوی مکانیکی معرفی شده در این مقاله، اجازه می‌دهد که به‌طور مشخص رد برهم‌کنش‌های فیزیکی مختلف را در رفتار یک سامانه واقعی دنبال کنیم. مطالعه رفتار و پاسخ‌های سامانه دو هیسترونی به دو نوع برهم‌کنش پتانسیلی و غیر پتانسیلی، نشان دهنده ظهور رفتارهای حافظه‌ای متنوعی است. تمایز الگوی ما نسبت به الگوهای رایج، در گنجاندن جزئیات فیزیکی نادیده گرفته شده است.

مطالعه سامانه دو هیسترونی ما به وضوح نشان داد که برهم‌کنش‌ها (چه دوسویه و چه غیردوسویه) نه تنها جابه‌جایی آستانه‌ها را تغییر نمی‌دهند، بلکه مستقیماً بر طول هیسترون نیز تأثیر می‌گذارند. ما در یک الگوی مکانیکی، نقض فرض ثابت بودن طول هیسترون را در شرایط برهم‌کنش قوی به‌طور مستند نشان دادیم. این یافته‌ای کلیدی است که محدودیت ذاتی الگوهای خطی مرسوم را در توصیف سامانه‌های با برهم‌کنش شدید آشکار می‌سازد.

درک کمی حاصل از این کار درباره چگونگی کنترل حافظه توسط برهم‌کنش‌های فیزیکی، پتانسیل جدیدی برای طراحی هدفمند فرامواد جدید با قابلیت برنامه‌پذیر بودن ایجاد می‌کند. در ادامه این کار قصد داریم با افزایش تعداد هیسترون‌ها و افزودن برهم‌کنش‌های متقابل، موضوعاتی مثل حافظه نقطه بازگشت و رفتار دوره‌ای چندگانه در آن‌ها را بررسی کنیم.

سپاسگزاری

این پروژه تحت حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران Iran National Science Foundation: INSF با کد طرح ۴۰۱۶۱۱۱ قرار دارد.

هیسترون i و هیسترون j است. اگر برهم‌کنش دوسویه باشد ($C_{ij} = C_{ji}$)، اما در صورتی که $C_{ij} \neq C_{ji}$ باشد، برهم‌کنش غیر دوسویه است که منجر به عدم تقارن در پاسخ‌ها می‌شود. فرض اساسی این الگو این است که برهم‌کنش باعث تغییر طول هیسترون نمی‌شود ($\Delta\tilde{\gamma}_i = \Delta\tilde{\gamma}_i$). جابه‌جایی‌های $\tilde{\gamma}_i^-$ و $\tilde{\gamma}_i^+$ هم فاز و هم اندازه هستند تا $\Delta\tilde{\gamma}$ ثابت بماند.

تأثیر برهم‌کنش غیر دوسویه در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ب مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵، تغییرات میدان‌های آستانه هیسترون اول تحت تأثیر هیسترون دوم را با افزایش ضرایب برهم‌کنش غیر دوسویه، نشان می‌دهد. با افزایش (α) میزان عدم تقارن افزایش می‌یابد. جابه‌جایی حد آستانه بالا و پایین هیسترون اول هنگامی که هیسترون دوم در حالت راست قرار دارد متفاوت از جابه‌جایی هنگامی که هیسترون دوم در حالت راست قرار دارد است. این جابه‌جایی نامتقارن نسبت به حالت‌های هیسترون همسایه نشان دهنده تأثیر برهم‌کنش غیردوسویه بر سامانه است و می‌تواند منجر به حافظه مسیر پیچیده‌تر و رفتارهای جمعی نامتعارف شود.

شکل ۵، ۶، همین اثرات غیردوسویه را به‌طور متقابل برای هیسترون دوم تحت تأثیر هیسترون اول نشان می‌دهد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که الگوی خطی رابطه (۵) برای برهم‌کنش‌های ضعیف و متوسط (اعم از پتانسیلی و غیر پتانسیلی) معتبر است. با این حال، برای حالت کلی و برای برهم‌کنش قوی، کافی نیست. ضرایب برهم‌کنشی اعداد ثابتی نیستند و علاوه بر شدت برهم‌کنش، به حالت هیسترون نیز وابسته‌اند. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی (شکل‌های ۵، ۶ الف و ۶ ب) مشاهده شد، فرض اساسی الگوی خطی مبنی بر ثابت ماندن طول هیسترون در برهم‌کنش‌های قوی نقض می‌شود. جابه‌جایی حد آستانه‌های بالا و پایین مستقل و غیرهم‌فاز می‌شود.

۸. نتیجه‌گیری

در کارهایی که اخیراً برای مطالعه حافظه در سامانه‌های بی‌نظم صورت می‌گیرد، عموماً از عناصری با نام هیسترون یاد می‌شود

۹. مراجع

1. J D Paulsen and N C Keim, *Annual Review of Condensed Matter Physics* **16** (2024) 61.
2. N C Keim and J D Paulsen, *Science Advances* **7** (2021) 7685.
3. C W Lindeman S R Nagel, *Science Advances* **7** (2021) 7133.
4. N C Keim and D Medina, *Science Advances* **8** (2022) 1614.
5. V F Haghighi and S R Nagel, *arXiv:2403.03926* (2024).
6. C W Lindeman, T R Jalowiec, and N C Keim, *arXiv:2306.07177* (2023).
7. A Szulc, M Mungan, and I Regev, *The Journal of Chemical Physics* **156** (2022) 164506.
8. H Bense and M van Hecke, *PNAS* **118** (2021) e2111436118.
9. K Matan, et al., *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 076101.
10. N C Keim, et al. *Reviews of Modern Physics* **91** (2019) 035002.
11. T Chen, M Pauly, and P M Reis, *Nature* **589** (2021) 386.
12. J Ding and M van Hecke, *The Journal of Chemical Physics* **156** (2022) 204902.
13. Y Song, et al., *Nature communications* **10** (2019) 882.
14. C W Lindeman, et al., *Phys. Rev. Lett.* **130** (2023) 197201.
15. T Jules, et al., *Communications Physics* **6** (2023) 25.
16. J Liu, et al., *PNAS* **121** (2024) 2308414121.
17. J D Paulsen, *arXiv:2409.07726* (2024).
18. J P Sethna, et al. *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 3347.
19. J A Barker, et al. *Proc. R. soc. Lond. Ser. A-Contain. Pap. Math. Phys. Character* **386** (1983) 251.
20. L Corte, et al. *Nature Physics* **4** (2008) 420.
21. D J Pine, et al. *Nature* **438** (2005) 997.
22. A Sebt and M Akhavan, *Iranian Journal of Physics Research* **3** (2003): 199-211.
23. N C Keim and P E Arratia, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 028302.
24. T Jules, et al., *Physical Review Research* **4** (2022) 013128.
25. S Doraiswamy, "Discrete preisach model for the superelastic response of shape memory alloys", Texas A & M University, (2012).
26. F Preisach, *Zeitschrift für physik* **94** (1935) 277.
27. J Deutsch, A Dhar, and O Narayan, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 227203.
28. M van Hecke, *Physical Review E* **104** (2021) 054608.
29. M H Teunisse, and M van Hecke, *arXiv:2404.11344* (2024).
30. L Euler, "The rational mechanics of flexible or elastic bodies 1638-1788: introduction to Vol X and XI" Springer Science & Business Media, (1980).
31. M Kardar, "Statistical Physics of Fields" Statistical Physics of Fields, (2007).
32. M Brandenbourger, et al., *Nature communications* **10** (2019) 4608.
33. AV Ivlev, et al., *Physical Review X* **5** (2015) 011035.