

## طراحی و پیاده‌سازی کنترلر شبکه عصبی برای سیستم ضدنوسان بار جرثقیل‌های سقفی

انتقال سریع و بدون نوسان بار توسط جرثقیل‌های سقفی زمینه‌ای مطرح برای پژوهش می‌باشد. در این مقاله یک کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم‌کننده برای جرثقیل سقفی، با هدف جابجایی دقیق بار و دفع نوسان آن ارائه گردیده‌است. این کنترلر می‌تواند بخش عمده نوسان بار را در ابتدای حرکت دفع کند و در نتیجه بار با نوسان کمی جابجا شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترلر شبکه عصبی با روش تعلیم پیشنهادی این مقاله، نسبت به کنترلر PID با بهره ثابت و در زمانی مشابه، می‌تواند نوسان بار را به شکل بهتری دفع کند و برای مسافت‌های طولانی مناسب‌تر است. قابلیت پیاده‌سازی تجربی این کنترلر با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی جرثقیل سقفی به اثبات رسیده و نتایج صحه‌گذاری شده‌است.

حامد سعیدی<sup>۱</sup>

کارشناس ارشد

مهیار نراقی<sup>۲</sup>

استادیار

ابوالقاسم اسدالله راعی<sup>۳</sup>

دانشیار

واژه‌های راهنما: جرثقیل سقفی، سیستم ضدنوسان بار، کنترلر شبکه عصبی خودتنظیم‌کننده

### ۱- مقدمه

امروزه بنادر و کارخانجات مختلفی برای حمل کالا و قطعات گوناگون از جرثقیل‌های سقفی استفاده می‌کنند. هنگام جابجایی بار، به دلیل انعطاف پذیر بودن کابل‌های نگه‌دارنده آن و حرکت شتابدار جرثقیل، حرکت نوسانی در بار رخ می‌دهد. نوسانات بار می‌تواند باعث مشکلاتی نظیر برخورد با محیط اطراف، تحمیل نیروی زیاد ناشی از نوسان بارهای سنگین به بدنه جرثقیل و افزایش زمان جابجایی بار شود. در همین راستا تحقیقات متعددی در زمینه سیستم‌های ضدنوسان و موقعیت‌دهی بار جرثقیل در دو دسته کنترلرهای حلقه باز و کنترلرهای حلقه بسته، از سال ۱۹۶۵ آغاز شده‌است [۱]. آن چه باعث ادامه تحقیقات در این زمینه شده، امید دستیابی به سیستم‌های سریع‌تر، دقیق‌تر و ارزان‌تر است.

کنترلرهای حلقه باز مانند شکل دهنده‌های ورودی و کنترلرهای مسیر بهینه، به دلیل عدم نیاز به تجهیزات اندازه‌گیری زاویه نوسان بار، به سادگی قابل پیاده‌سازی هستند و هزینه کمی دارند. نحوه عمل شکل‌دهنده‌های ورودی، مبتنی بر تغییر شکل تحریک ورودی به گونه‌ای است که نوسانات باقیمانده در

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر h\_saeidi@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر naraghi@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر raie@aut.ac.ir

سیستم را حذف می‌کند. تغییر شکل توسط قطاری از ضربه‌ها انجام می‌شود که با توجه به خصوصیات نوسانی سیستم آرایش می‌یابند. سینگوس و همکارانش [۲] نشان دادند که تکنیک‌های شکل‌دهنده ورودی به طور موثری قادر به دفع نوسانات بار می‌باشند. اما این تکنیک‌ها به فرکانس طبیعی نوسانات حساس هستند و تغییر طول کابل بار حین حرکت باعث ایجاد مقداری نوسانات باقی‌مانده در مقصد می‌شود. در همین راستا سینگ و سینگوس [۳] تلاش‌هایی جهت افزایش سرعت پاسخ و مقاومت این نوع کنترلر به تغییرات فرکانس نوسانات آزاد بار، که به فاصله بار تا محل تعلیق آن بستگی دارد، انجام دادند. سورنسن و همکارانش [۴] از ترکیب شکل‌دهنده ورودی با یک کنترلر مکان PD به علاوه یک کنترلر نوسان بار، برای جابجایی بار بین دو نقطه استفاده کردند. در مجموع این روش‌ها به تغییر پارامترها و اغتشاش خارجی حساس می‌باشند. در ضمن برای اینکه به درستی عمل کنند، لازم است زاویه اولیه بار صفر باشد. در غیر اینصورت ممکن است شکل‌دهی ورودی حتی باعث تشدید نوسان بار نیز گردد. در روش‌های تعیین مسیر بهینه سعی می‌شود با تولید پروفیل‌های سرعت، چه با سعی و خطا چه از طریق محاسبات، اهدافی نظیر حداقل کردن زمان برداشتن بار، جابجایی ارابه، دفع نوسان بار یا ترکیبی از این دو حالت اخیر برآورده شود [۱]. لازم به ذکر است که اکثر استراتژی‌های کنترل در این دسته از پروفیل شتاب بنگ-بنگ استفاده می‌کنند. این پروفیل فشار زیادی به ساختار جرثقیل وارد می‌کند و مشکل می‌توان آنرا به طور دقیق توسط موتورهای صنعتی ایجاد کرد. این روش‌ها روی جرثقیل‌های صنعتی پیاده‌سازی نشده‌اند [۵].

کنترلرهای حلقه بسته نیز در تحقیقات گذشته برای کنترل موقعیت و نوسان بار به صورت گسترده‌ای استفاده شده‌اند. این کنترلرها از یک سیستم اندازه‌گیری نوسان بار، در حلقه کنترلی مربوط به دفع نوسان بار بهره می‌برند. به همین دلیل این دسته از کنترلرها، نسبت به تغییرات طول کابل و اغتشاش خارجی مقاوم‌تر هستند. یک نوع از این کنترلرهای حلقه بسته که به وفور بکار گرفته شده‌است، کنترلر فازی می‌باشد. به عنوان نمونه می‌توان به کار محفوف و همکارانش [۶] اشاره کرد. آنها از کنترلرهای فازی و مدل غیرخطی جرثقیل سقفی برای کنترل موقعیت و حذف نوسان بار در محیط شبیه‌سازی استفاده کردند. چانگ و همکارانش [۷]، کنترلی برای موقعیت و نوسان بار ارائه و بر روی مدل آزمایشگاهی پیاده‌سازی کردند. در این روش از دو کنترلر فازی برای مکان و نوسان بار، به علاوه یک الگوریتم کلیدزنی فازی برای عبور از ناحیه مرده موتور استفاده شده، تا سبب بهبود عملکرد کنترلر در دفع نوسان بار و موقعیت دهی شود. آسا و همکارانش [۸] یک روش چهار مرحله‌ای برای طراحی و پیاده‌سازی کنترلر فازی روی مدل آزمایشگاهی جرثقیل سقفی ارائه کردند.

علاوه بر کنترلرهای فازی، روش‌های متنوع دیگری نیز مورد توجه بوده است. مندز و همکاران [۹]، از شبکه‌های عصبی برای کنترل یک مدل آزمایشگاهی از جرثقیل سقفی بهره بردند. سو و همکاران [۱۰] از یک الگوریتم طراحی مسیر و یک کنترلر که ترکیبی از شبکه عصبی و کنترلر پیشگو بود، استفاده کردند. روش آنها قابلیت جابجایی بار در یک محیط سه بعدی را به صورت تمام خودکار برای یک جرثقیل مدل آزمایشگاهی ایجاد می‌کرد. مسعود و همکاران [۱۱] با استفاده از کنترلر فیدبک تأخیریافته به کنترل یک جرثقیل سقفی که مدل بار آن یک مکانیزم ۴ میله‌ای بود، پرداختند. هوا و همکاران [۱۲]، با به کارگیری کنترلر تطبیقی و کنترل غیرخطی، برتری آن را نسبت به کنترلر PD به صورت تجربی نشان دادند. احمد و

همکارانش [۱۳] توسط دو کنترلر فیدبک تاخیر یافته و مد لغزشی به دفع نوسان بار جرثقیل سقفی پرداختند، در کار آنها اثر اغتشاش خارجی نیز مورد بررسی قرار گرفت. بطور کلی هنگام استفاده از کنترلرهای حلقه بسته باید توجه داشت که به دلیل مشکل تنظیم دو کنترلر موقعیت و ضد نوسان بار به صورت همزمان، پیچیدگی کنترلر بالا می‌رود. در این حالت معمولاً به دلیل بزرگ بودن خطای موقعیت در ابتدای حرکت جرثقیل، سهم کنترل موقعیت بیش از کنترل نوسان بار است، لذا نوسانات بزرگی ایجاد می‌شود. ولی در انتهای حرکت و با کم شدن خطای موقعیت، نوسان بار به خوبی دفع می‌شود. این باعث می‌شود که در مسیرهای طولانی نوسانات بار در طول مسیر وجود داشته باشد. به منظور رفع این مشکل باید سهم هر کنترلر برای نواحی مختلف حرکت طراحی و تنظیم گردد که کار مشکل و زمانبری است. روش برنامه‌ریزی بهره<sup>۱</sup> نمونه‌ای از این کنترلرها می‌باشد.

در این مقاله نوعی از کنترلرهای شبکه عصبی طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرد که خود تنظیم‌کننده<sup>۲</sup> نام دارند. در حالت کلاسیک ساختار یک کنترلر خود تنظیم‌کننده از دو قسمت اصلی تشکیل شده است؛ الف) کنترلر فیدبکی ب) تخمین‌زننده که وظیفه تامین پارامترهای کنترلر فیدبکی را بر عهده دارد. در کنترلر ارائه شده در این مقاله، از شبکه عصبی در قسمت تخمین‌زننده و از یک کنترلر PD و یک کنترلر P به ترتیب به عنوان قسمت کنترلر فیدبکی مربوط به موقعیت و نوسان بار استفاده می‌شود. کنترلرهای PID بخش اعظمی از کنترلرهای حلقه بسته صنعتی را تشکیل می‌دهند [۱۴] و به عنوان کنترلری ساده و کارا شناخته شده‌اند. این کنترلرها برای اینکه در محدوده‌ها و شرایط مختلف و در حضور عوامل غیرخطی کارایی خود را حفظ نمایند، احتیاج به تنظیم ضرائب کنترلر دارند. به این منظور همانطور که پیشتر اشاره گردید می‌توان از یک شبکه عصبی برای تنظیم ضرائب کنترلر در قسمت تخمین‌زننده کنترلر خود تنظیم‌کننده استفاده کرد تا یک کنترلر PID غیرخطی و با قابلیت بالاتر نسبت به PID خطی بدست آید. مزیت استفاده از چنین ترکیبی، بهره‌گیری تلفیقی از یک کنترلر ساده، رایج و مقاوم مانند PID و همچنین قابلیت یادگیری و غیرخطی بودن شبکه‌های عصبی می‌باشد. به این ترتیب می‌توان کنترلر را طوری تعلیم داد که در ابتدای حرکت نوسان بار گرفته شود و بار با نوسان کوچکی تا مقصد جابجا گردد. در تعلیم کنترلر، از نحوه دفع نوسان بار توسط شکل دهنده‌های ورودی الهام گرفته شده است. در ادامه از کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم‌کننده پیشنهادی جهت اختصار با NNST نام برده می‌شود.

در این مقاله ابتدا معادلات دینامیک جرثقیل سقفی ارائه می‌گردند. پس از آن نحوه طراحی کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم‌کننده و روش تعلیم پیشنهاد شده توضیح داده می‌شود. در قسمت بعد، نتایج شبیه‌سازی این کنترلر نشان داده می‌شوند و نقاط قوت کنترلر مشخص می‌گردند. در انتها نیز به ارائه نتایج پیاده‌سازی تجربی کنترلر و مروری بر نتایج پرداخته شده است.

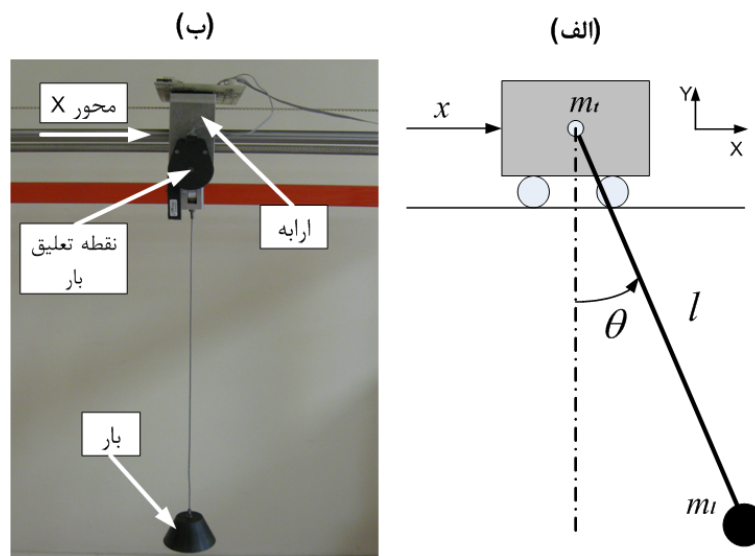
<sup>1</sup> Gain Scheduling

<sup>2</sup> Self Tuner

## ۲- دینامیک جرثقیل سقفی

در مدلسازی دینامیکی جرثقیل، بار به صورت جرم نقطه‌ای و کابل بدون جرم در نظر گرفته می‌شود [۱۵]. در نتیجه بار و مکانیزم نگهدارنده آن به شکل آونگ مانند شکل (۱) مدل می‌شود. در این شکل  $x$  جابجایی افقی ارابه،  $m_t$  جرم ارابه،  $m_l$  جرم بار،  $l$  طول کابل نگهدارنده بار و  $\theta$  زاویه انحراف بار از محور عمودی می‌باشند.

به طور کلی عملکرد جرثقیل شامل ۵ مرحله می‌شود: گرفتن، بلند کردن، جابجایی بین دو نقطه، پایین بردن و در نهایت رها کردن بار. از بین این ۵ مرحله، جابجایی بین دو نقطه زمانبرترین بخش است که احتیاج به اپراتور ماهر دارد [۱۶]. معمولاً برای رعایت احتیاط در این مرحله از حرکت، طول کابل ثابت نگه داشته می‌شود. لذا در ادامه با فرض ثابت بودن طول کابل، مدل سازی جرثقیل انجام می‌شود.



شکل ۱- (الف) آونگ ساده در دو بعد (ب) مدل آزمایشگاهی جرثقیل سقفی

با استفاده از روش لاگرانژ داریم :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = T_i, \quad (i=1,2) \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{2} (m_t + m_l) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_l (l^2 \dot{\theta}^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l \cos\theta) \quad (2)$$

$$U = m_l g l (1 - \cos\theta) \quad (3)$$

که در اینجا  $L = K - U$  لاگرانژین،  $K$  انرژی جنبشی و  $U$  انرژی پتانسیل سیستم می‌باشد.  $q_i$  مختصه‌های عمومی و  $T_i$  نیروی خارجی در امتداد هر مختصه می‌باشد. با توجه به این که  $T_2 = 0$  است، معادلات به صورت معادلات (۴) و (۵) تبدیل می‌شوند:

$$(m_t + m_l)\ddot{x} + m_l\ddot{\theta}\cos\theta - m_l\dot{\theta}^2\sin\theta = f_x \quad (۴)$$

$$m_l l^2 \ddot{\theta} + m_l l \ddot{x} \cos\theta + m_l g l \sin\theta = 0 \quad (۵)$$

در این معادلات  $f_x$  نیروی وارد به ارابه جرثقیل در امتداد محور حرکت  $X$  می‌باشد. برای نوسانات کوچک حول نقطه تعادل می‌توان فرضیات (۶) را انجام داد.

$$\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1, \dot{\theta}^2 \approx 0 \quad (۶)$$

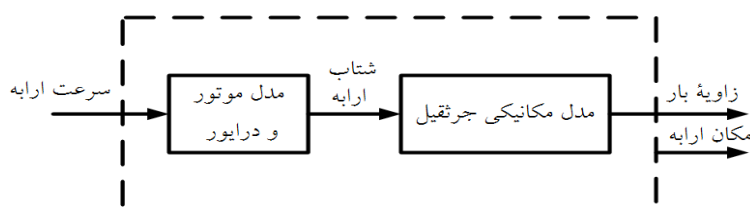
در نتیجه معادلات به شکل روابط (۷) و (۸) ساده می‌شوند:

$$(m_t + m_l)\ddot{x} + m_l\ddot{\theta} = f_x \quad (۷)$$

$$l\ddot{\theta} + g\theta + \ddot{x} = 0 \quad (۸)$$

برای شبیه‌سازی رفتار جرثقیل، با توجه به اینکه مدل آزمایشگاهی جرثقیل موجود دارای تقویت‌کننده‌های مجهز به کنترلر سرعت می‌باشد، از معادله غیرخطی (۵) استفاده گردیده است. در ادامه باید رفتار موتور و درایور آن در شبیه‌سازی منظور شود که آنرا می‌توان با یک سیستم درجه دوم مطابق معادله (۹) مدل‌سازی کرد. ورودی این سیستم فرمان سرعت موتور ( $V_{in}$ ) و خروجی آن شتاب ارابه ( $A_{out}$ ) خواهد بود. نمودار جعبه‌ای مدل شبیه‌ساز در شکل (۲) آمده است. به این ترتیب با بدست آمدن سرعت ارابه در خروجی کنترلرهای مورد استفاده و اعمال آن به درایور موتور، موقعیت و نوسانات بار جرثقیل کنترل می‌شود.

$$\frac{A_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{4000s}{s^2 + 90s + 4000} \quad (۹)$$



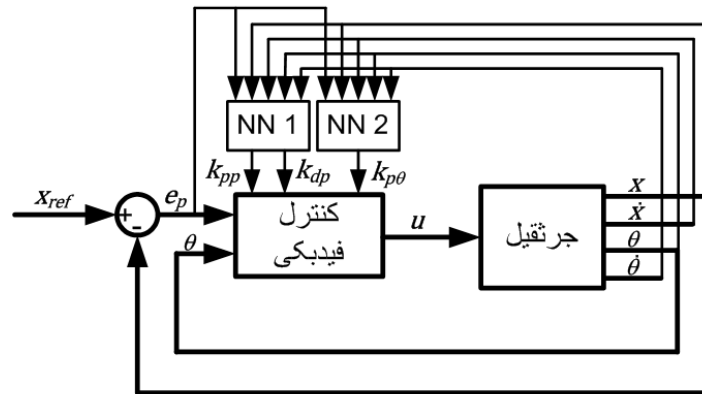
شکل ۲- نمودار جعبه‌ای مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی

### ۳- طراحی کنترلر

طراحی کنترلر در سه بخش شامل ساختار کنترلر، نحوه آموزش و تعلیم با الهام از شکل دهنده ورودی ارائه می‌شود.

### ۳-۱- ساختار کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده

همانطور که ذکر گردید در این مقاله از یک کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده، برای کنترل موقعیت و نوسانات بار جرثقیل سقفی استفاده می شود. ساختار کنترلر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده

در این ساختار دو شبکه عصبی برای تولید ضرائب کنترلر موقعیت و نوسان بار در نظر گرفته شده اند. انتخاب دو شبکه عصبی به منظور همگرایی بهتر پاسخ شبکه های عصبی انجام شده است. ورودی ها، حالت های سیستم اند که عبارتند از: موقعیت ارابه ( $x$ )، سرعت ارابه ( $\dot{x}$ )، زاویه نوسان بار ( $\theta$ )، نرخ تغییرات زاویه نوسان بار ( $\dot{\theta}$ ) و خطای موقعیت ارابه ( $e_p$ ). انتخاب این متغیرها به عنوان ورودی برای لحاظ نمودن دینامیک سیستم است که با توجه به آن، هر شبکه عصبی یاد می گیرد که در حالت های مختلف جرثقیل، خروجی های متناظر را تولید کند. خروجی های تولید شده نیز در قانون کنترلی (۱۰)، برای کنترل هدف مورد نظر مورد استفاده قرار می گیرند.

$$u = [K_{pp}e_p + K_{dp}\dot{e}_p + K_{p\theta}e_{\theta}] \quad (10)$$

که در اینجا

$$e_p = x_{ref} - x, \quad e_{\theta} = \theta_{ref} - \theta \quad (11)$$

$x_{ref}$  مقصد نهایی جرثقیل است که مقداری مشخص و ثابت دارد. همچنین مقدار مطلوب  $\theta_{ref}$  نیز همیشه صفر می باشد بنابراین:

$$\dot{x}_{ref} = 0, \quad \dot{e}_p = -\dot{x}, \quad \theta_{ref} = 0 \quad (12)$$

پس:

$$u = [K_{pp}e_p - K_{dp}\dot{x} - K_{p\theta}\theta] \quad (13)$$

u خروجی کنترلر، فرمان سرعت ارابه می‌باشد. در این سیستم فرو تحریک، دو متغیر موقعیت ارابه و زاویه بار هر دو توسط u کنترل می‌شوند، لذا قانون کنترلی تلفیقی از موقعیت ارابه و نوسان بار می‌باشد. برای قسمت تخمین‌زننده پارامترهای کنترلر فیدبکی از شبکه عصبی پرسپترون با یک لایه پنهان و تابع فعال‌سازی سیگموئید دوقطبی (تانژانت سیگموئید)<sup>۱</sup> و تابع خطی<sup>۲</sup> در لایه خروجی استفاده شده‌است. به طور کلی چنین شبکه عصبی، یک تقریب زننده عمومی است و در صورت وجود تعداد لازم نورون در لایه پنهان، می‌تواند اکثر توابع را تقریب بزند [۱۷]. برای تعیین پارامترهای شبکه اعم از وزن‌ها و بایاس‌ها به منظور تقریب تابع نامعلوم، از الگوریتم تعلیم پسانتشار خطا استفاده می‌شود که یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های تعلیم مربوط به شبکه‌های عصبی چند لایه است. این الگوریتم براساس حرکت در جهت خلاف گرادیان خطای خروجی شبکه عصبی نسبت به وزن‌های شبکه، عملیات تعلیم روی وزن‌های شبکه‌های چند لایه را انجام می‌دهد.

### ۳-۲- تعلیم کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم‌کننده

مسئله‌ای که از بکاربردن شبکه عصبی در کنترلر مهم‌تر است، چگونگی تعلیم کنترلر شبکه عصبی است. به این معنا که شبکه عصبی کی، چگونه و چه مقدار تعلیم ببیند، که در این قسمت به آن پرداخته می‌شود. به منظور تعلیم شبکه‌های عصبی بکار رفته در کنترلر شکل (۳)، نیاز به یک تابع هزینه است که به صورت (۱۴) تعریف می‌گردد.

$$J = \frac{1}{2} P_1 e_p^2 + \frac{1}{2} P_2 (\dot{x}_d - \dot{x})^2 + \frac{1}{2} P_3 \theta^2 + \frac{1}{2} P_4 \dot{\theta}^2 \quad (14)$$

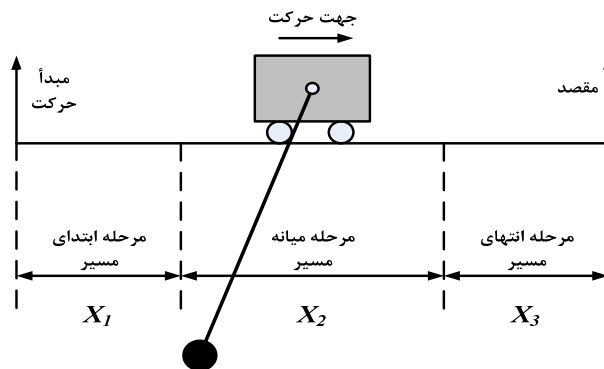
این تابع هزینه از چهار جمله تشکیل شده‌است و وزن جملات از  $P_1$  تا  $P_4$  می‌باشند که برای بهینه نمودن تابع هزینه در حین کار تعیین می‌شوند. دو جمله اول تابع هزینه مربوط به متغیرهای ارابه و دو جمله آخر مربوط به نوسان بار می‌باشند. جمله  $\frac{1}{2} P_1 e_p^2$  به منظور تعلیم شبکه‌های عصبی در جهت کم کردن خطای موقعیت ارابه بکار برده می‌شود. با توجه به اینکه در قسمت کنترلر فیدبکی یک کنترلر PD برای کنترل موقعیت ارابه وجود دارد و این کنترلر به مرور سعی در کم کردن خطای موقعیت می‌کند، جمله اول در تابع هزینه دینامیک کم شدن خطا را در نظر نمی‌گیرد و فعال بودن آن باعث افزایش بیش از حد خروجی‌های شبکه‌های عصبی می‌شود. بنابراین از این جمله بهتر است فقط در دفعه اول تعلیم و راه‌اندازی کنترلر استفاده شود و جمله دیگری برای در نظر گرفتن نرخ کم شدن خطا در نظر گرفته شود. جمله دوم در تابع هزینه یعنی  $\frac{1}{2} P_2 (\dot{x}_d - \dot{x})^2$  به همین منظور است. طبق این جمله شبکه‌های عصبی سعی در تعلیم خروجی‌هایی می‌کنند که توسط آنها سرعت جابجایی ارابه به مقدار مطلوب  $\dot{x}_d$  نزدیک شود. با این کار سرعت کوچک شدن مقدار خطای موقعیت افزایش می‌یابد. جمله سوم و چهارم تابع هزینه نیز باعث یادگیری شبکه‌های عصبی در جهت تولید خروجی‌هایی می‌گردند که زاویه نوسان بار را کم و میرا می‌کنند. باید دقت کرد که سریع حرکت کردن ارابه در تضاد با کوچک ماندن دامنه نوسان بار است. در نتیجه فعال

<sup>1</sup> Tangent sigmoid

<sup>2</sup> Linear function

کردن هر چهار جمله بالا حین تعلیم شبکه عصبی باعث خنثی شدن اثر آنها توسط همدیگر و مختل شدن روند تعلیم می‌گردد. به ناچار باید فرایند تعلیم را مرحله‌بندی کرد و در هر مرحله جملات موثر در زاویه نوسان بار یا موقعیت ارابه را فعال نمود. در اینجا فعال و غیرفعال سازی اثر هر جمله، براساس بخشی از کل مسیر، انجام می‌گردد که در ادامه توضیح آن خواهد آمد.

نحوه نظارت بر روند تعلیم شامل دو سطح می‌شود. سطح بالا، که مربوط به پاسخ کلی سیستم است و مشخص می‌کند که آیا ادامه تعلیم کنترلر لازم است یا خیر. این سطح می‌تواند ناظر انسانی باشد. سطح پایین، که مربوط به نظارت حین تعلیم است، در اینجا مشخص می‌شود کنترلر چه مدتی و با چه هدفی تعلیم ببیند. از آنجایی که این نوع نظارت در حین روند تعلیم انجام می‌شود باید به صورت خودکار انجام شود، زیرا انجام آن توسط ناظر انسانی تقریباً غیرممکن است. شکل (۴) تفاوت این دو سطح ناظر و نحوه کار آنها را مشخص می‌کند. هدف از تعلیم کنترلر NNST، شروع حرکت از حالت:  $\theta=0, \dot{\theta}=0, x=0, \dot{x}=0$  و رسیدن به مقصد  $\theta=0, \dot{\theta}=0, x=x_{ref}, \dot{x}=0$  است. یعنی بار از مبدا به یک مقصد از پیش تعیین شده دیگر جابجا شود و در مقصد، بار و ارابه ساکن شوند.



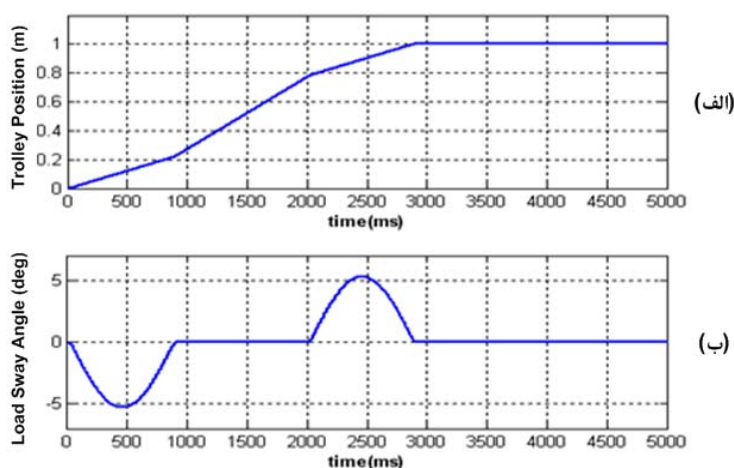
شکل ۴- مرحله بندی مسیر حرکت جرتقیل به سمت مقصد

در این حالت اگر ناظر سطح بالا از عملکرد کلی کنترلر رضایت داشته باشد، تعلیم متوقف خواهد شد. در غیر اینصورت باید کنترلر در مسیر مذکور چندین بار تعلیم ببیند تا عملکرد دلخواه بدست آید. هر دور تعلیم کنترلر شامل یک بار طی کردن مسیر موردنظر و فعال بودن الگوریتم تعلیم کنترلر می‌باشد. پس از تعیین لزوم تعلیم کنترلر، نظارت بر نحوه تعلیم کنترلر در هر دور تعلیم توسط ناظر سطح پایین انجام می‌شود. در این سطح با مرحله بندی مسیر مطابق شکل (۴) سعی می‌شود جملات مختلف در تابع هزینه (۱۴) به منظور تعیین هدف تعلیم، فعال یا غیرفعال شود. اصولاً در مرحله ابتدا و انتهای مسیر بهتر است کنترلر در جهت کم کردن زاویه نوسان بار تعلیم ببیند و در مرحله میانه مسیر وزن تعلیم کنترلر به نگردها داشتن سرعت ارابه روی مقدار مطلوب داده شود. یعنی در قسمت‌های ابتدا و انتهای مسیر  $P_2$  صفر و  $P_4$  و  $P_3$  غیرصفر و در میانه مسیر این ضرایب حالت برعکس پیدا می‌کنند. لازم به ذکر است که ضریب  $P_1$  بنا به توضیحاتی که پیشتر ذکر گردید بهتر است فقط در اولین دور تعلیم کنترلر و به منظور راه‌اندازی در قسمت ابتدای مسیر فعال گردد. در گام بعدی لازم است که زمانهای فعال و غیر فعال کردن  $P_2$  تا  $P_4$  به صورت دقیق‌تری مشخص گردد.



### ۳-۳- تعلیم کنترلر با الهام از شکل دهنده ورودی ZV

شکل‌دهنده‌های ورودی علیرغم کاربردهایی که دارند، دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشند. موضوعی که در اینجا اهمیت دارد، نحوه دفع نوسان بار توسط این کنترلرهاست. در حالت ایده‌آل، هنگام استفاده از این کنترلرها مشاهده می‌شود که پس از شروع حرکت ارابه و وقوع حرکت نوسانی در بار، کنترلر مذکور پس از زمان معینی، که به نوع کنترلر و دوره تناوب نوسانات آزاد بار بستگی دارد، نوسان بار را به طور کامل حذف می‌کند. لذا در ادامه مسیر ارابه با سرعت ثابت و بدون انحراف بار از محور عمود، به حرکت خود ادامه می‌دهد (شکل ۵.ب). روندی معکوس نیز هنگام توقف انجام می‌شود. این نوع حرکت از این نظر اهمیت دارد که در بخش میانی مسیرهای طولانی، که عمده مسیر را تشکیل می‌دهد، نوسانی در بار مشاهده نمی‌شود. هنگام استفاده از کنترلرهای حلقه بسته دستیابی به چنین حرکتی، با توجه به توضیحات مقدمه، مشکل می‌باشد. در ادامه برای تعلیم کنترلر NNST جهت تولید حرکت تقریباً بدون نوسان در میانه مسیر، از مزایای کنترلر شکل‌دهنده ورودی ZV<sup>۱</sup> استفاده می‌گردد.



شکل ۵ - استفاده از روش شکل‌دهنده ورودی ZV برای کنترلر نوسانات بار در جراثیل سقفی

شکل‌دهنده ورودی ZV، پس از شروع حرکت ارابه و طی شدن زمانی به اندازه نصف دوره تناوب نوسانات آزاد بار، نوسان بار را دفع می‌کند و ارابه با سرعت ثابت بقیه مسیر را طی می‌کند. لذا در اینجا برای بدست آمدن عملکردی مشابه توسط کنترلر NNST، طول قسمت ابتدای مسیر با توجه به دوره تناوب نوسانات آزاد بار و سرعتی که ارابه باید به آن برسد می‌تواند متغیر باشد. در حالت ایده‌آل، شکل‌دهنده ورودی برای انجام عمل دفع نوسان حرکاتی با شتاب خیلی بالا و به صورت حلقه باز انجام می‌دهد. از آنجا که حرکات با شتاب بالا باعث استهلاک بدنه جراثیل می‌شود و می‌تواند باعث ناپایداری کنترلر حلقه بسته مورد استفاده در اینجا شود، بهتر است که فرصت بیشتری به کنترلر NNST برای دفع نوسان داده شود، یعنی اندکی بیش از نصف دوره تناوب نوسان آزاد بار. بنابراین فرض می‌شود کنترلر بتواند در  $0/6$  دوره تناوب نوسان آزاد بار، نوسان آن

<sup>1</sup> Zero Vibration

را دفع کند. در این مدت باید سرعت ارابه نیز از صفر به یک مقدار معلوم برسد و ثابت نگه داشته شود. بنابراین مسافت تقریبی که در این مدت طی می شود طبق رابطه (۱۵) بدست می آید.

$$x_d = \frac{\dot{x}_d \times 0.6T}{2} \quad (15)$$

$\dot{x}_d$  سرعتی است که ارابه باید به آن برسد و آن را حفظ کند،  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$  دوره تناوب نوسانات آزاد بار و  $x_d$  مسافت طی شده در این مدت است. بنابراین می توان طول قسمت های ابتدا و انتهای مسیر که  $P_3$  و  $P_4$  باید در آنها فعال باشند را تعیین کرد. در میانه مسیر نیز کنترلر در جهت ثابت نگه داشتن سرعت ارابه روی مقدار  $\dot{x}_d$  تعلیم می بیند. در نتیجه طول مراحل مختلف مسیر که در شکل (۴) نشان داده شده است، مطابق رابطه (۱۶) می باشد.

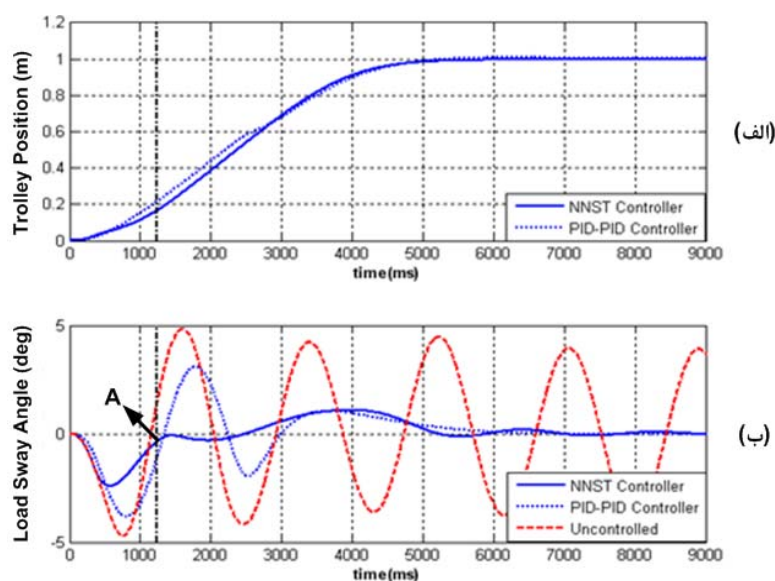
$$x_1 = x_3 = x_d, \quad x_2 = x_{ref} - 2x_d \quad (16)$$

با مشخص شدن نحوه تعلیم، کنترلر با استفاده از معادلات مربوط به تعلیم توسط الگوریتم پس انتشار خطا، که در پیوست ۱ آمده است، تعلیم داده می شود. در کار حاضر، کنترلر با مقادیر وزن های تصادفی اولیه نزدیک به صفر مقداردهی شده و تعلیم آن آغاز شده است. مقادیر اختیار شده برای وزن های جملات تابع هزینه نیز عبارتند از:

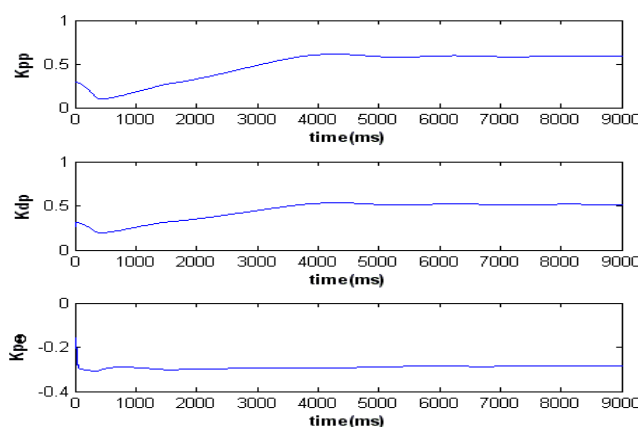
$$P_1 = 0/1, \quad P_2 = 0/2, \quad P_3 = 0/5, \quad P_4 = 0/125 \quad (17)$$

#### ۴- بررسی عملکرد کنترلر پیشنهادی در محیط شبیه سازی

برای بررسی عملکرد کنترلر شبکه عصبی و مقایسه آن با دو کنترلر دیگر که در ادامه می آیند، فرض می شود که بار به جرم ۱ کیلوگرم، با طول کابل ۰/۷۵ متر باید به میزان ۱ متر جابجا شود.  $\dot{x}_d$  نیز ۰/۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. انتخاب این ویژگی ها برای مطابقت با مدل آزمایشگاهی موجود و فراهم شدن امکان بررسی و مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی می باشد. حاصل تعلیم کنترلر در محیط شبیه سازی Matlab و عملکرد کنترلر برای جابجایی باری با مشخصات فوق الذکر و پس از ۱۲ بار تعلیم کنترلر در شکل (۶) آمده است. قسمت (الف) در شکل (۶) موقعیت ارابه و قسمت (ب) میزان انحراف بار از محور عمود را نشان می دهد که همان مقادیر  $x$  و  $\theta$  در شکل (۱) می باشند. نحوه تغییر ضرائب کنترلر فیدبکی در طول مسیر نیز در شکل (۷) نشان داده شده است.



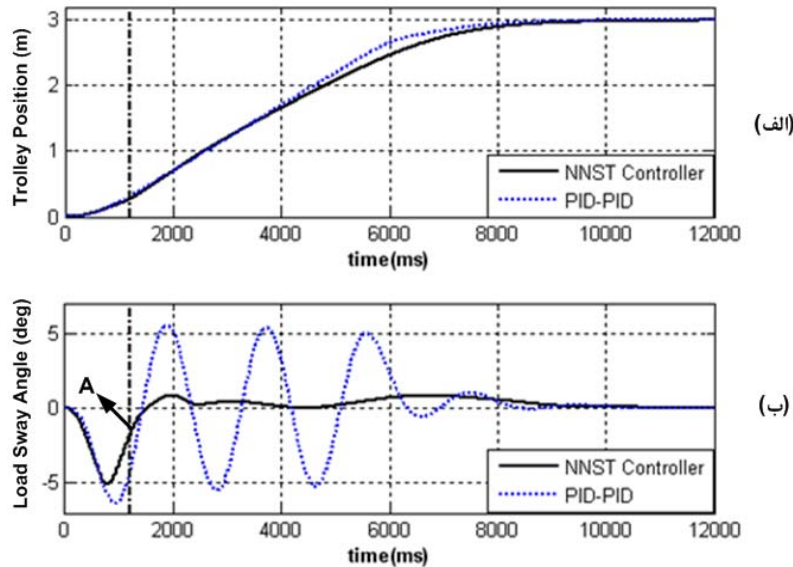
شکل ۶- شبیه‌سازی کنترل نوسانات بار جرثقیل سقفی توسط کنترلر NNST و PID-PID با ضرائب ثابت



شکل ۷- نحوه تغییر ضرائب کنترلر فیدبکی در شبیه‌سازی کنترل نوسانات بار جرثقیل سقفی توسط کنترلر NNST

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که کنترلر NNST در زمانی مشابه با کنترلر PID-PID با ضرائب ثابت، بار را به مقصد می‌رساند، اما رفتار نوسانی بار هنگام استفاده از کنترلر NNST، هم از نظر بیشترین مقدار انحراف بار از محور عمود و هم از نظر نبودن نوسان بار در میانه مسیر، ظاهر مطلوب‌تری دارد. در این حالت، کنترلر NNST پس از بالا رفتن مقدار نوسان بار تا  $2/39$  درجه و گذشتن زمان  $1/2$  ثانیه از شروع حرکت، یعنی نقطه A در شکل (۶)، به شکل قابل ملاحظه‌ای موفق به دفع نوسان بار می‌گردد. در حالیکه با توجه به شکل، بیشترین مقدار انحراف بار از محور عمود در طول حرکت برای کنترلر PID-PID با ضرائب ثابت  $3/8$  درجه می‌باشد و پس از نقطه A بار دارای دامنه نوسان بزرگی است. برای اینکه نقطه قوت کنترلر NNST بیشتر

مشخص شود، بهتر است مزایای آن در جابجایی بار طی مسافت‌های طولانی‌تر ارزیابی گردد. لذا عملکرد این کنترلر با کنترلر PID-PID با ضرائب ثابت، هنگام جابجایی بار به نقطه‌ای در فاصله ۳ متری در شکل (۸) مقایسه شده است.



شکل ۸- مقایسه عملکرد کنترلر NNST با کنترلر PID-PID با ضرائب ثابت

برای مسافت ۳ متری

همانطور که در شکل (۸.ب) مشاهده می‌شود، هنگام استفاده از کنترلر PID-PID با ضرائب ثابت، علی‌رغم دفع نوسان بار در نقطه مقصد، بار با دامنه زیادی در میانه مسیر در حال نوسان است. دلیل پاسخ نوسانی کنترلر PID-PID در طول مسیر حرکت، اشباع ورودی یعنی فرمان سرعت ارابه است. ثابت شدن سرعت، یعنی حرکت غیرشتابدار در میانه مسیر باعث می‌شود که بار حالت غیرنوسانی یا نوسانی خود را حفظ کند [۱۸]. در اینجا هنگام راه افتادن ارابه، حرکت نوسانی در بار بوجود می‌آید و در میانه مسیر، پس از ثابت شدن سرعت روی مقدار بیشینه، این رفتار نوسانی باقی می‌ماند. در مقایسه کنترلر NNST، پس از راه‌اندازی ارابه و زیاد شدن زاویه نوسان تا مقدار ۵ درجه، موفق به دفع قسمت قابل توجهی از زاویه نوسان تا نقطه A در شکل (۸.ب) شده‌است. در میانه مسیر نیز بار دارای انحراف کمی از محور عمود است و هنگام توقف زاویه نوسان افزایش قابل توجهی پیدا نمی‌کند. این برتری NNST بواسطه تغییر ضرائب کنترلر فیدبکی توسط شبکه‌های عصبی در طول مسیر می‌باشد.

همانطور که مشاهده گردید، کنترلر NNST قادر است مانند شکل دهنده‌های ورودی در ابتدای حرکت جرثقیل نوسان بار را دفع کند.

## ۵- پیاده‌سازی تجربی

بستر آزمایشگاهی جرثقیل سقفی مورد استفاده برای پیاده‌سازی تجربی کنترلر، در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شده‌است. شکل (۹) این مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با استفاده از این مدل می‌توان بار را در صفحه افقی جابجا کرد. هر محور حرکت دارای یک سرو موتور DC بدون جاروبک، مجهز به درایور با قابلیت کنترل سرعت می‌باشند. از انکودرهای نوری که مستقیماً به محور موتورها متصل‌اند، به عنوان حسگرهای مکان اربه جرثقیل استفاده می‌شود. برای هر محور نوسان یک انکودر نوری در مکانیزم لولای محل اتصال کابل در نظر گرفته شده‌است تا زاویه آن محور را قرائت کند. این حسگرها در این مدل آزمایشگاهی به عنوان مرجع اندازه‌گیری زاویه نوسان بار استفاده می‌شوند. در سیستم جمع‌آوری اطلاعات، پردازنده‌ی اصلی PC از طریق برد DAQ PCI 1711 شرکت ادونتک و دو برد اصلی و جانبی، طی پروتکل مشخصی اقدام به جمع‌آوری اطلاعات زاویه بار و مکان اربه می‌کند. فرمان کنترلی هر موتور پس از محاسبات لازم توسط پردازنده اصلی PC، از طریق برد DAQ و یک مدار صفر و گسترده‌سازی<sup>۱</sup> به درایور موتورها ارسال می‌شود. زمان نمونه برداری اطلاعات و انجام عمل کنترلی، برابر با ۸ میلی ثانیه است. در این مقاله با توجه به استقلال حرکت در جهت x و y، از یک بعد حرکت جرثقیل استفاده شده است. بیشترین مقدار سرعت اربه جرثقیل در این بعد، ۰/۵ متر بر ثانیه است. پس از بررسی کنترلرها در محیط شبیه‌سازی، برای پیاده‌سازی کنترلرها به صورت تجربی از کارگاه بلادرنگ<sup>۲</sup> متلب استفاده می‌شود. کدهای مربوط به کنترلر NNST و الگوریتم تعلیم، با استفاده از تابع نهفته متلب<sup>۳</sup> نوشته شده‌است.



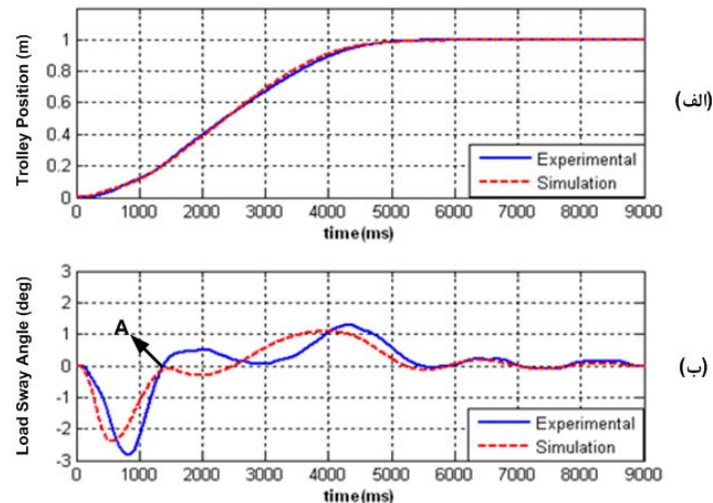
شکل ۹- مدل آزمایشگاهی جرثقیل سقفی ساخته شده در دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>1</sup> Zero and Span

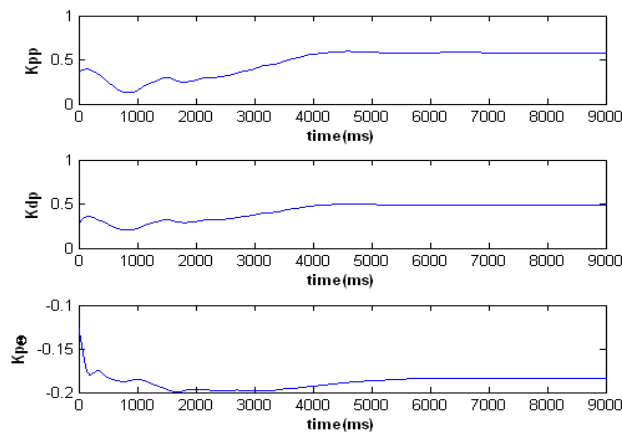
<sup>2</sup> Real time workshop

<sup>3</sup> Matlab Embedded Function

شکل (۱۰) نتایج تجربی پیاده سازی کنترلر NNST را با شرایطی مشابه شبیه سازی در شکل (۶)، یعنی جابجایی بار به جرم ۱ کیلوگرم، با طول کابل ۰/۷۵ متر و به میزان ۱ متر را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، نتایج آزمایش تجربی از نظر رفتار کنترلر مطابقت خوبی با نتایج شبیه سازی انجام شده دارند. در آزمایش تجربی نیز ابتدا زاویه نوسان بار زیاد می شود و در میانه حرکت، بعد از عبور از نقطه A، بار دارای مقدار کوچکی انحراف از محور عمود می باشد. در انتهای حرکت جرثقیل نیز کمی میزان انحراف بار زیاد می شود و سپس از بین می رود. نحوه تغییر ضرائب کنترلر در طول زمان نیز مطابق شکل (۱۱) می باشد.



شکل ۱۰- مقایسه شبیه سازی و نتایج تجربی کنترل نوسانات بار جرثقیل سقفی توسط کنترلر NNST



شکل ۱۱- نحوه تغییر ضرائب کنترلر فیدبکی در آزمایش تجربی کنترل نوسانات بار جرثقیل سقفی توسط کنترلر NNST

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترلر NNST برای کنترل موقعیت و نوسانات بار جرثقیل سقفی ارائه گردید. برای تعلیم این کنترلر، مسیر حرکت جرثقیل به مراحل مختلف تقسیم شد تا در هر مرحله، کنترلر برای کم کردن نوسان بار یا کم کردن زمان جابجایی بار تعلیم ببیند. برای تعیین طول قسمت‌های مختلف مسیر از نحوه دفع نوسان توسط شکل‌دهنده ورودی ZV الهام گرفته شد. مشاهده گردید که کنترلر NNST دارای قابلیت است که کنترلر PID با ضرائب ثابت آن را دارا نمی‌باشد. کنترلر NNST می‌تواند در ابتدای حرکت جرثقیل بخش اعظمی از نوسان بار را دفع کند و بار با نوسان کمی جابجا شود. این نحوه دفع نوسان بار، در مسافت‌های طولانی بیشتر جلب توجه می‌کند. برای اینکه چنین قابلیت‌هایی در کنترلر PID ایجاد شود باید از روش برنامه‌ریزی بهره استفاده کرد. در این روش جدولی برای نواحی کاری مختلف سیستم تولید می‌شود که در آن نواحی، ضرائب مورد استفاده توسط کنترلر مقادیر مختلفی دارند. معمولاً انجام چنین کاری خسته‌کننده و وقت‌گیر است، که در مورد جرثقیل سقفی به دلیل وجود دو متغیر خروجی پیچیده‌تر می‌شود. این مشکل هنگام استفاده از کنترلر NNST قابل حل است. کافی است کنترلر موردنظر در مسیر مربوطه چند بار تعلیم ببیند تا به صورت خودکار ضرائب تنظیم شوند.

## سپاسگزاری

مجریان این تحقیق بر خود لازم می‌دانند که از حمایت‌های پژوهشکده فناوری‌های نو و معاونت پژوهشی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تشکر به عمل آورند. کلیه آزمایش‌ها با استفاده از امکانات آزمایشگاه تحقیقاتی ربات‌های سیار، مشترک بین دانشکده‌های مهندسی مکانیک و برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است.

## مراجع

- [1] Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A.H., and Masoud, Z.N., "Dynamics and Control of Cranes: A Review", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 9, pp. 863-908, (2003).
- [2] Singhose, W.E., Porter, L.J., and Seering, W.P., "Input Shaped Control of a Planar Gantry Crane with Hoisting", *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 1, pp. 97-100, (1997).
- [3] Singh, T., and Singhose, W., "Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures", *American Control Conference, IEEE*, Vol. 3, pp. 1717-1731, (2002).
- [4] Sorensen, K.L., Singhose, W., and Dickerson, S., "A Controller Enabling Precise Positioning and Sway Reduction in Bridge and Gantry Cranes", *Control Engineering Practice Journal*, Vol. 15, pp. 825-837, (2006).

- [5] Gustafsson, T., and Heidenback, C., "Automatic Control of Unmanned Cranes at the Pasir Panjang Terminal", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference of Control Applications, Vol. 1, pp.180-185, (2002).
- [6] Mahfouf, M., Kee, C. H., Abbod, M. F., and Linkens, D. A., "Fuzzy Logic-based Anti-Sway Control Design for Overhead Cranes", Neural Computing and Application Journal, Vol. 9, pp. 38-43, (2000).
- [7] Chang, C.Y., "The Switching Algorithm for the Control of Overhead Crane", Neural Computing & Applications Journal, Vol. 15, pp. 350-358, (2006).
- [8] Assa, A., Raie, A.A., Attar Kashani, A., Gorji, S., and Naraghi, M., "A Four Step Design Procedure for an Improved Fuzzy Crane Control", 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, Wellington, New Zealand, pp. 133 – 137, (2009).
- [9] Méndez, J.A., Acosta, L., Moreno, L., Torres, S., and Marichal, G.N., "An Application of a Neural Self-tuning Controller to an Overhead Crane", Neural Computing and Application Journal, Vol. 8, pp. 143–150, (1999).
- [10] Suh, J.H., Lee, J.W., Lee, Y.J., and Lee, K.S., "An Automatic Travel Control of a Container Crane using Neural Network Predictive PID Control Technique", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 7, pp. 35-41, (2006).
- [11] Masoud, Z.N., and Nayfeh, A.H., "Sway Reduction on Container Cranes using Delayed Feedback Controller", Nonlinear Dynamics Journal, Vol. 34, pp. 347–358, (2003).
- [12] Hua, Y.J., and Shine, Y.K., "Adaptive Coupling Control for Overhead Crane Systems", Mechatronics Journal, Vol. 17, pp. 143–152, (2007).
- [13] Ahmad, M.A., Ismail, R.M.T.R., Nasir, A.N.K., and Ramli, M.S., "Anti-sway Control of a Gantry Crane System Based on Feedback Loop Approaches", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore, pp. 1094 – 1099, (2009).
- [14] Hang, C.C., Ho, W.K., and Lee, T.H., "*Adaptive Control*", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, USA, (1993).
- [15] Kees, M., Burnham, K.J., and Tabor, J.H., "Modeling and Simulation Considerations for an Industrial Crane", International Conference on Simulation 98, University of York, York, England, pp. 249 - 252, (1998).
- [16] Omar, H.M., "Control of Gantry and Tower Cranes", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, (2003).
- [17] Hagan, M.T., and Demuth, H.B., "Neural Networks for Control", Invited Tutorial, American Control Conference, San Diego, CA, USA, pp. 1642-1656, (1999).
- [18] Haulin, J., "Feed forward Anti-sway Control for Overhead Cranes", M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, Uppsala University, Uppsala, Sweden, (2005).



## فهرست نمادهای انگلیسی

$A_{out}$	: شتاب ارابه
$c$	: لحظه‌ای از زمان
$e_p$	: خطای موقعیت ارابه
$\dot{e}_p$	: نرخ تغییرات خطای موقعیت ارابه
$e_\theta$	: خطای زاویه نوسان بار
$f_x$	: نیروی وارد به ارابه جرثقیل در امتداد محور حرکت X
$g$	: شتاب گرانش
$i$	: شمارنده
$j$	: شمارنده
$J$	: تابع هزینه
$K$	: انرژی جنبشی
$K_{dp}$	: ضریب مشتق‌گیر کنترلر موقعیت ارابه در کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده
$K_{pp}$	: ضریب تناسبی کنترلر موقعیت ارابه در کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده
$K_{p\theta}$	: ضریب تناسبی کنترلر ضدنوسان بار در کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده
$l$	: طول کابل نگهدارنده بار
$L$	: لاگرانژین
$m_l$	: جرم بار
$m_t$	: جرم ارابه
$n$	: شمارنده خروجی شبکه عصبی
$NNST$	: کنترلر شبکه عصبی خود تنظیم کننده
$P_i$	: وزن جملات تابع هزینه
$q_i$	: مختصه‌های عمومی
$t$	: زمان
$T$	: دوره تناوب نوسانات آزاد بار
$T_i$	: نیروی خارجی در امتداد هر مختصه
$\Delta T$	: فواصل زمانی نمونه برداری
$u$	: خروجی کنترلر
$U$	: انرژی پتانسیل سیستم
$V_{in}$	: سرعت مطلوب موتور
$W_{mij}$	: وزن متصل کننده ورودی $i$ ام به خروجی $j$ ام در لایه $l$ ام شبکه عصبی
$x$	: جابجایی افقی ارابه
$x_i$	: طول مراحل مختلف مسیر

$X_d$ :	مسافت طی شده برای دفع نوسان بار توسط کنترلر شبکه عصبی خودتنظیم کننده در ابتدای حرکت
$X_{ref}$ :	مقصد نهایی جرثقیل
$\dot{X}$ :	سرعت ارابه
$\dot{X}_d$ :	سرعت مطلوب ارابه پس از دفع نوسان بار
$\dot{X}_{ref}$ :	سرعت مرجع ارابه
$Y$ :	خروجی سیستم

### نمادهای یونانی

$\theta$ :	زاویه نوسان بار
$\dot{\theta}$ :	نرخ تغییرات زاویه نوسان بار
$\theta_{ref}$ :	زاویه نوسان مرجع بار
$\varepsilon$ :	ضریب مُمنتوم در الگوریتم یادگیری
$\eta$ :	ضریب یادگیری

### پیوست ۱- روابط مربوط به الگوریتم تعلیم کنترلر

همانطور که گفته شد شبکه عصبی باید به نحوی تعلیم ببیند که تابع هزینه کم شود، بنابراین قانون تعلیم وزن های شبکه به صورت (۱) می شوند.

$$w_{mij}(c+1) = w_{mij}(c) + \Delta w_{mij}(c) \quad (1)$$

$$\Delta w_{mij}(c) = -\eta \frac{\partial J(c)}{\partial w_{mij}(c)} + \varepsilon \Delta w_{mij}(c-1) \quad (2)$$

در این روابط  $c$  لحظه ای از زمان است که یادگیری در حال انجام می باشد.  $\eta$  و  $\varepsilon$  نیز به ترتیب ضرایب یادگیری و مُمنتوم هستند و  $w_{mij}$  وزن متصل کننده ورودی  $i$  ام به خروجی  $j$  ام در لایه  $m$  ام شبکه عصبی است. طبق روابط (۱) و (۲) در هر مرحله یادگیری، وزن های شبکه عصبی با طول گام های مشخص به سمت کم کردن تابع هزینه حرکت می کنند. همچنین با در نظر گرفتن اثرات حرکات قبلی که در قسمت مُمنتوم ظاهر می شود، سعی در عبور از مینیمم های محلی و جلوگیری از نویزی شدن فرایند یادگیری می نمایند. برای تعلیم وزن ها باید مقدار (۳) محاسبه شود.

$$\frac{\partial J(c)}{\partial w_{mij}(c)} \quad (3)$$

اگر خروجی های شبکه های عصبی  $\{q_i, i=1 \dots n\}$  نامیده شوند که در اینجا  $n=3$  است، می توان پس از محاسبه مقدار (۴)، از روش تعلیم پس انتشار خطا استفاده کرد.

$$\frac{\partial J(c)}{\partial q_i(c)} \quad (4)$$

که به صورت (۵) بدست می آید.

$$\frac{\partial J(c)}{\partial q_i(c)} = \frac{\partial J(c)}{\partial y(c)} \frac{\partial y(c)}{\partial u(c)} \frac{\partial u(c)}{\partial q_i(c)} \quad (5)$$

در اینجا  $y$  خروجی سیستم یعنی  $\dot{x}$ ،  $\dot{\theta}$  و  $\theta$  می باشد و  $u$  خروجی کنترلر فیدبکی یا همان ورودی سیستم است. مقادیر هر یک از جمله های (۵) توسط (۶) و (۷) بدست می آیند.

$$\frac{\partial J}{\partial x} = -P_1 e_p, \quad \frac{\partial J}{\partial \dot{x}} = -P_2 (\dot{x}_d - \dot{x}), \quad \frac{\partial J}{\partial \theta} = P_3 \theta, \quad \frac{\partial J}{\partial \dot{\theta}} = P_4 \dot{\theta} \quad (6)$$

بنابراین به صورت تقریبی،  $\frac{\partial y(c)}{\partial u(c)}$  به شکل (۷) محاسبه می شود:

$$\frac{\partial x}{\partial u} \approx \frac{\Delta T}{2}, \quad \frac{\partial \dot{x}}{\partial u} \approx 1, \quad \frac{\partial \theta}{\partial u} = -\frac{\Delta T}{l}, \quad \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial u} = -\frac{\Delta T}{2l} \quad (7)$$

که در اینجا  $l$  طول کابل و  $\Delta T$  زمان نمونه برداری (۸ میلی ثانیه) می باشد. با استفاده از رابطه (۱۰) و با توجه به اینکه  $q_1 = K_{pp}$ ،  $q_2 = K_{dp}$  و  $q_3 = K_{p\theta}$  است، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u(k)}{\partial q(k)} = [e_p - \dot{x} - \theta] \quad (8)$$

با محاسبه مقادیر بالا می توان بقیه روند تعلیم را با استفاده از روش پس انتشار خطا ادامه داد. آموزش شبکه در حین کار سیستم انجام می شود و در هر زمان نمونه برداری  $C$ ، یکبار عملیات زیر باید تکرار شود [۶]:

۱- جمع آوری مقادیر  $\theta, \dot{\theta}, u, \dot{x}, e_p$

۲- محاسبه مقدار  $\frac{\partial J(c)}{\partial q(c)}$  و سپس استفاده از پس انتشار خطا برای تعلیم وزن ها

۳- محاسبه  $q$  های جدید پس از این مرحله تعلیم و محاسبه  $u$  جدید برای اعمال به سیستم

۴- صبر کردن تا لحظه  $C+1$

۵- تکرار عملیات از مرحله ۱

همانطور که ذکر گردید، شبکه عصبی مورد استفاده در اینجا یک شبکه پرسپترون با یک لایه پنهان است. توابع فعال سازی مورد استفاده در لایه پنهان و لایه خروجی به ترتیب سیگموئید دو قطبی و خطی هستند. برای هر دو شبکه عصبی طبق توضیحات شکل (۳)، پنج ورودی در نظر گرفته شده است. تعداد نورون های لایه پنهان ۲۰ عدد و تعداد خروجی های شبکه های عصبی اول و دوم به ترتیب ۲ و ۱ است. ضریب یادگیری و مومنتوم،  $\eta = 0.06$  و ضریب مومنتوم  $\epsilon = 0.9$  می باشند. برای تعیین تعداد نورون های لایه پنهان و ضریب یادگیری و مومنتوم، می توان سرعت همگرا شدن شبکه های عصبی را به چند خروجی مطلوب متفاوت بررسی کرد. این کار به صورت آفلاین انجام می شود. همچنین باید در نظر داشت که مقادیر ورودی های شبکه عصبی در

مقیاس‌های مختلفی است. برای اینکه اثر هر کدام از آنها در خروجی شبکه عصبی به طور صحیح مشخص گردد باید همگی دارای یک مقیاس باشند. مثلاً سرعت ارابه در محدوده  $\pm 0/5$  متر بر ثانیه است ولی سرعت زاویه‌ای و مقدار زاویه نوسان بار به ترتیب در محدوده  $\pm 0/3$  رادیان بر ثانیه و  $\pm 0/15$  رادیان می‌باشند.

**Abstract**

The rapid and sway-less conveyance of load has been an essential task and a field of research; considering the broad application of transportation of goods, materials and pieces by the use of cranes. In this paper, a neural network self tuner controller, aimed to move the load of gantry crane precisely as well as to eliminate its sway, is presented. By the use of this algorithm, the controller is able to remove the majority of load sway, at the outset of transportation, and transport it with a slight sway. Results indicate that in comparison with constant gains PID controller, in the same period of transportation, the neural network self tuner controller can remove the sway of load in a better manner and is more appropriate for long distances. Using a lab scale gantry crane model, the feasibility of empirical implementation is proved and results are verified.