

حل عددی معادلات انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه بالا با ضرایب متغیر با استفاده از بسط چبیشف

اسمعیل بابلیان، فاطمه چیت‌ساز
دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم ریاضی و کامپیوتر
علی داوری*

دانشگاه اصفهان، پردیس خوانسار، گروه ریاضی

پذیرش ۹۸/۰۹/۰۲

دریافت ۹۷/۰۵/۱۵

چکیده

ایده اصلی این مقاله، استفاده از چندجمله‌ای‌های چبیشف برای حل معادلات انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی با مراتب بالا است. معمولاً حل این معادلات به روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نیست یا در صورت امکان بسیار مشکل است. در این روش معادله مورد نظر به وسیله روابط ماتریسی بین چندجمله‌ای‌های چبیشف و مشتقات آنها به دستگاه معادلات خطی تبدیل می‌شود. ماتریس‌های عملیاتی عملگرهای تأخیر و مشتق همراه با روش تائو برای محاسبه ضرایب مجهول بسط چبیشف جواب استفاده می‌شوند. همگرایی روش بررسی شده است. مثال‌های عددی، اعتبار و کارایی روش ارائه شده را نشان می‌دهند. هم‌چنین نتایج حاصل از روش با نتایج موجود مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: معادله دیفرانسیل تأخیری، معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم، روش تائو، ماتریس عملیاتی، چندجمله‌ای‌های چبیشف.

مقدمه

معادلات انتگرال-دیفرانسیل تأخیری در پدیده‌های گوناگون مانند مدل‌سازی مسائل زیست‌شناسی، فیزیک و مهندسی ظاهر می‌شوند [۱]-[۶]. در سال‌های اخیر، تمایل و نیاز به حل عددی معادلات انتگرال-دیفرانسیل تأخیری رو به افزایش است. از آن‌جاکه حل تحلیلی این معادلات مشکل است، ناگزیر به استفاده از روش‌های عددی برای حل این معادلات هستیم. روش‌های عددی متعددی مانند روش موجک‌ها، روش موجک لژاندر، روش موجک گالرکین، روش تجزیه آدامین، روش هم‌محلی تیلور، روش سری‌های والش و غیره برای حل این معادلات به کار گرفته شده‌اند [۷]-[۱۸].

در این مقاله یک روش حل برای یافتن جواب عددی معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه S با ضرایب متغیر به صورت

$$\sum_{k=0}^S P_k(x) y^{(k)}(x) + \sum_{r=0}^l P_r^*(x) y^{(r)}(x-\tau) = f(x) + \int_{-1}^1 k(x,t) y(t-\tau) dt, \quad \tau \geq 0 \quad (1)$$

تحت شرایط مرکب

$$\sum_{k=0}^{s-1} (a_{ik} y^{(k)}(-1) + b_{ik} y^{(k)}(1) + c_{ik} y^{(k)}(0)) = \mu_i, \quad i = 0, 1, \dots, s-1, \quad (2)$$

به طوری که p_k, p_k^* و f توابع پیوسته معلوم هستند، ارائه می‌دهیم. در این جا ضرایب a_{ik}, b_{ik}, c_{ik} و μ_i ثابت‌های حقیقی هستند.

روش ما شامل تبدیل مسئله مورد نظر به دستگاه معادلات خطی با استفاده از بسط جواب بر حسب چندجمله‌ای‌های چبیشف است. ماتریس‌های عملیاتی عملگرهای تأخیر و مشتق به دست آورده می‌شود. این ماتریس‌ها همراه با روش تائو برای محاسبه ضرایب مجهول بسط به کار می‌روند.

روش تائو در ابتدا به وسیله لِنچوز [۱۹] برای حل معادلات دیفرانسیل معمولی مطرح شد، اورتیز [۲۰] آن را تعمیم داد.

روش شامل بسط جواب تقریبی مورد نظر بر حسب عناصر یک مجموعه کامل از چندجمله‌ای‌های متعامد است [۲۱]، [۲۲].

طی سال‌های اخیر تحقیقات متعددی از کاربردهای روش تائو برای حل مسائل مختلف انجام شده است [۲۳] - [۲۶].

بخش‌های این مقاله به این شرح است: بخش ۲ به روابط اصلی مورد نیاز از چندجمله‌ای‌های چبیشف در بخش‌های بعدی اختصاص داده شده است. بخش ۳ نحوه پیاده‌سازی روش تائو چبیشف برای حل مسئله (۱)-(۲) را بیان می‌کند. سپس یک دستگاه معادلات خطی تشکیل داده و یک جواب تقریبی از مسئله مورد نظر معرفی می‌شود. در بخش ۴ همگرایی روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در بخش ۵ روش پیشنهادی روی چند مثال عددی به کار برده می‌شود. مقایسه‌ای با روش‌های موجود انجام شده است. بخش ۶ به بیان نتایج مقاله می‌پردازد. لازم به ذکر است که برای انجام محاسبات از نرم‌افزار میپل استفاده کردیم.

مفاهیم و تعاریف مقدماتی

در این بخش مفاهیم، روابط و معادلاتی که در بخش‌های بعد به آنها نیاز داریم را معرفی می‌کنیم. چندجمله‌ای‌های متعامد چبیشف روی بازه $[-1, 1]$ به صورت $T_i(x) = \cos(i \arccos x)$ تعریف می‌شوند و با فرمول بازگشتی سه جمله‌ای زیر می‌توانند تعیین شوند:

$$T_{i+1}(x) = 2xT_i(x) - T_{i-1}(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

$$T_1(x) = x \text{ و } T_0(x) = 1 \text{ که}$$

شرط تعامد چندجمله‌ای‌های چبیشف عبارت است از

$$\int_{-1}^1 \frac{T_i(x)T_j(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = \begin{cases} \pi & i = j = 0 \\ \frac{\pi}{2} \delta_{ij} & o.w. \end{cases} \quad (3)$$

تابع \mathcal{Y} تابعی انتگرال‌پذیر روی بازه $[-1, 1]$ است و بسط آن بر حسب چندجمله‌ای‌های چبیشف بدین صورت در نظر گرفته می‌شود:

$$y(x) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j T_j(x),$$

علامت پریم در Σ' به معنای ضریب $\frac{1}{2}$ برای جمله اول است. ضرایب c_j بسط مذکور از این رابطه به دست می آیند:

$$c_j = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{y(x) T_j(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

قابل ذکر است که در عمل تنها $n + 1$ جمله اول بسط چبیشف در نظر گرفته می شود. پس داریم:

$$y_n(x) = \sum_{j=0}^n c_j T_j(x), \quad (4)$$

فرم ماتریسی رابطه (۴) به صورت (۵) است:

$$y_n(x) = T(x)C, \quad (5)$$

به علاوه

$$y_n^{(k)}(x) = T^{(k)}(x)C, \quad k = 0, 1, \dots, s, \quad (6)$$

که در آن بردار ضرایب چبیشف C و بردار چندجمله‌ای‌های چبیشف $T(x)$ به صورت (۷) تعریف می شوند:

$$T(x) = [T_0(x), T_1(x), \dots, T_n(x)], \quad C = [\frac{1}{2}c_0, c_1, \dots, c_n]^t. \quad (7)$$

به روش مشابه، تابع دو متغیره f نیز برای $-1 \leq x, t \leq 1$ بر حسب چندجمله‌ای‌های چبیشف به صورت (۸) تقریب زده می شود:

$$f_n(x, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n f_{ij} T_i(x) T_j(t) = T(x) F T^t(t), \quad (8)$$

که در آن ماتریس ضرایب چبیشف F بدین صورت است:

$$F = \frac{4}{\pi^2} \begin{bmatrix} \frac{f_{00}}{4} & \frac{f_{01}}{2} & \frac{f_{02}}{2} & \dots & \frac{f_{0n}}{2} \\ \frac{f_{10}}{2} & f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ \frac{f_{20}}{2} & f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_{n0}}{2} & f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{bmatrix},$$

به طوری که

$$f_{ij} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(x, t) \frac{T_i(t) T_j(x)}{\sqrt{1-t^2} \sqrt{1-x^2}} dx dt, \quad i, j = 0, 1, \dots, n. \quad (9)$$

یک نتیجه مفید از بسط بر اساس سری‌های چبیشف به صورت (۱۰) به دست می آید [۸]:

$$W = \int_{-1}^1 T^t(t) T(t) dt = [W_{ij}], \quad i, j = 0, 1, \dots, n, \quad (10)$$

به طوری که

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{1 - (i + j)^2} + \frac{1}{1 - (i - j)^2}, & \text{زوج } i + j, \\ 0, & \text{فرد } i + j. \end{cases}$$

به‌علاوه رابطه بین توان‌های x^n و چندجمله‌ای‌های چبیشف $T_j(x)$ بدین صورت است [۲۲]:

$$x^{2m} = 2^{-2m+1} \sum_{j=0}^m \binom{2m}{m-j} T_{2j}(x), \quad -1 \leq x \leq 1 \quad (11)$$

$$x^{2m+1} = 2^{-2m} \sum_{j=0}^m \binom{2m+1}{m-j} T_{2j+1}(x), \quad -1 \leq x \leq 1 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن معادلات (۱۱) و (۱۲) برای $m = 0, 1, \dots, \frac{n}{2}$ فرم ماتریسی متناظر به‌صورت (۱۳) به‌دست

می‌آید:

$$X(x) = T(x)M^t, \quad (13)$$

که در آن

$$X(x) = [1, x, x^2, \dots, x^n],$$

برای n فرد داریم،

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \binom{0}{0} 2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \binom{1}{0} 2^0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{2} \binom{2}{1} 2^{-1} & 0 & \binom{2}{0} 2^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \binom{n}{(n-1)/2} 2^{1-n} & 0 & \dots & \binom{n}{0} 2^{1-n} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

و برای n زوج داریم

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \binom{0}{0} 2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \binom{1}{0} 2^0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{1}{2} \binom{2}{1} 2^{-1} & 0 & \binom{2}{0} 2^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2} \binom{n}{n/2} 2^{1-n} & 0 & \binom{n}{(n-2)/2} 2^{1-n} & \dots & \binom{n}{0} 2^{1-n} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

حال از معادلات (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) به رابطه (۱۶) می‌رسیم.

$$T(x) = X(x)(M^t)^{-1}, \tag{16}$$

از این‌رو، داریم.

$$T^{(k)}(x) = X^{(k)}(x)(M^t)^{(-1)}, \quad k = 0, 1, \dots, s. \tag{17}$$

با استفاده از رابطه

$$X^{(k)}(x) = X(x)B^k, \quad k = 0, 1, \dots, s, \tag{18}$$

$X^{(k)}(x)$ را بر حسب $X(x)$ به‌دست می‌آوریم که در آن:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}. \tag{19}$$

با جای‌گذاری از روابط (۱۷) و (۱۸) در معادله (۶) و استفاده از رابطه (۱۳)، معادله (۲۰) نتیجه می‌شود:

$$y_n^{(k)}(x) = T(x)M^t(x)B^k(M^t)^{-1}C, \quad k = 0, 1, \dots, s. \tag{20}$$

با جای‌گذاری $x - \tau$ به‌جای x در معادله (۵) رابطه ماتریسی (۲۱) را داریم:

$$y(x - \tau) \simeq T(x - \tau)C. \tag{21}$$

مشابه (۱۸) رابطه ماتریسی (۲۲) بین $X(x)$ و $X(x - \tau)$ برقرار است.

$$X(x - \tau) = X(x)B_{-\tau}, \tag{22}$$

که در آن

$$B_{-\tau} = \begin{bmatrix} \binom{0}{0}(-\tau)^0 & \binom{1}{0}(-\tau)^1 & \binom{2}{0}(-\tau)^2 & \dots & \binom{n}{0}(-\tau)^n \\ 0 & \binom{1}{1}(-\tau)^0 & \binom{2}{1}(-\tau)^1 & \dots & \binom{n}{1}(-\tau)^{n-1} \\ 0 & 0 & \binom{2}{2}(-\tau)^0 & \dots & \binom{n}{2}(-\tau)^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \binom{n}{n}(-\tau)^0 \end{bmatrix}.$$

با مشتق‌گیری از دو طرف معادله (۲۲) نسبت به x و استفاده از (۱۸) داریم:

$$X^{(r)}(x - \tau) = X^{(r)}(x)B_{-\tau} = X(x)B^r B_{-\tau}, \quad r = 0, 1, \dots, t. \tag{23}$$

حال با استفاده از (۱۷) داریم:

$$T^{(r)}(x - \tau) = X^{(r)}(x - \tau)(M^t)^{-1} = X(x)B^r B_{-\tau}(M^t)^{-1}, \quad r = 0, 1, \dots, t, \quad (24)$$

با جای‌گزینی (۱۳) در (۲۴) و استفاده از معادله (۶) داریم:

$$y_n^{(r)}(x - \tau) = T(x)M^t B^r B_{-\tau}(M^t)^{-1}C, \quad r = 0, 1, \dots, t. \quad (25)$$

بیان حل مسئله (۱)–(۲)

برای حل کردن معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی (۱) تحت شرایط (۲)، در ابتدا توابع k, p_r^*, p_k

و f را با $(n + 1)$ جمله اول بسط چبیشف متناظر آن تقریب می‌زنیم:

$$p_{k,n}(x) = T(x)D_k, \quad k = 0, 1, \dots, s, \quad (26)$$

$$p_{r,n}^*(x) = T(x)D_r^*, \quad r = 0, 1, \dots, l, \quad (27)$$

$$f_n(x) = T(x)F, \quad (28)$$

$$k_n(x, t) = T(t)AT^t(x), \quad (29)$$

که بردارهای $F_k = [f_0, f_1, \dots, f_n]^t$ و $D_k = [\frac{1}{2}d_{k,0}, d_{k,1}, \dots, d_{k,n}]^t$ ، $D_r^* = [\frac{1}{2}d_{r,0}^*, d_{r,1}^*, \dots, d_{r,n}^*]^t$

معلوم هستند و طبق رابطه (۷) تعریف می‌شوند. ماتریس A معلوم است و طبق معادله (۸) تعریف می‌شود.

C بردار مجهولات مسئله است. حال با استفاده از (۲۰) و (۲۶) داریم:

$$\begin{aligned} p_{k,n}(x)y_n^k(x) &= T(x)D_k T(x)M^t(x)B^k(M^t)^{-1}C \\ &= D_k^t T^t(x)T(x)M^t(x)B^k(M^t)^{-1}C, \quad k = 0, 1, \dots, s. \end{aligned} \quad (30)$$

حال فرض کنید

$$D_k^t T^t(x)T(x) = T(x)Q_k, \quad (31)$$

که در آن Q_k یک ماتریس $(n + 1) \times (n + 1)$ است. برای تعیین Q_k معادله فوق می‌تواند بدین صورت نوشته شود.

$$\sum_{m=0}^n d_{k,m} T_m(x) T_j(x) = \sum_{m=0}^n [Q_k]_{mj} T_m(x), \quad j = 0, 1, \dots, n. \quad (32)$$

با ضرب کردن دو طرف تساوی (۳۲) در $T_i(x)$ و انتگرال‌گیری از -1 تا 1 نتیجه می‌شود:

$$\sum_{m=0}^n d_{k,m} \int_{-1}^1 \frac{T_i(x) T_j(x) T_m(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx = [Q_k]_{mj} \int_{-1}^1 \frac{T_i(x) T_j(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad i, j = 0, 1, \dots, n. \quad (33)$$

حال فرض کنید

$$w_{i,j,m} = \int_{-1}^1 \frac{T_i(x) T_j(x) T_m(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad i, j, m = 0, 1, \dots, n, \quad (34)$$

با استفاده از معادلات (۳)، (۳۳) و (۳۴) داریم:

$$[Q_k]_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^n d_{k,m} w_{i,j,m}, & i = j = 0, \\ \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^n d_{k,m} w_{i,j,m}, & i, j = 0, 1, \dots, n \text{ و } (i > 0 \text{ یا } j > 0). \end{cases} \quad (۳۵)$$

قابل توجه است که $w_{i,j,m}$ ها به راحتی محاسبه می‌شوند. با به کار بردن معادلات (۳۰) و (۳۱) داریم:

$$p_{k,n}(x)y_n^k(x) = T(x)Q_k M^t(x)B^k(M^t)^{-1}C, \quad k = 0, 1, \dots, s. \quad (۳۶)$$

با استفاده از معادلات (۲۵) و (۲۷) داریم:

$$\begin{aligned} p_{r,n}^* y_n^{(r)}(x-\tau) &= T(x)D_r^* T(x)M^t B^r B_{-\tau} (M^t)^{-1}C \\ &= D_r^* T^t(x)T(x)M^t B^r B_{-\tau} (M^t)^{-1}C, \quad r = 0, 1, \dots, l. \end{aligned} \quad (۳۷)$$

هم‌چنین قرار می‌دهیم

$$D_r^* T^t(x)T(x) = T(x)Q_r^*, \quad (۳۸)$$

که در آن Q_r^* یک ماتریس $(n+1) \times (n+1)$ است. با رابطه‌ای مشابه (۳۵) تعریف می‌شود.

از روابط (۳۷) و (۳۸) داریم:

$$p_{r,n}^* y_n^{(r)}(x-\tau) = T(x)Q_r^* M^t B^r B_{-\tau} (M^t)^{-1}C, \quad r = 0, 1, \dots, l. \quad (۳۹)$$

هم‌چنین با استفاده از (۱۰)، (۲۵) و (۳۰) داریم

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 k(x,t)y_n(t-\tau) dt &= T(x)A \left(\int_{-1}^1 T^t(x)T(x) dt \right) M^t B_{-\tau} (M^t)^{-1}C \\ &= T(x)AWM^t B_{-\tau} (M^t)^{-1}C. \end{aligned} \quad (۴۰)$$

با به کار بردن روابط (۲۸)، (۳۶)، (۳۹) و (۴۰) می‌توان معادله (۱) را بدین صورت نوشت:

$$T(x) \left\{ \left(\sum_{k=0}^s Q_k M^t B^k + \sum_{r=0}^t Q_r^* M^t B^r B_{-\tau} - AWM^t B_{-\tau} \right) (M^t)^{-1}C - F \right\} = T(x) \{ ZC - F \} = 0,$$

که

$$Z = \left(\sum_{k=0}^s Q_k M^t B^k + \sum_{r=0}^t Q_r^* M^t B^r B_{-\tau} - AWM^t B_{-\tau} \right) (M^t)^{-1}. \quad (۴۱)$$

به‌عنوان یک روش تائو ما $s + 1 - n$ معادله با استفاده از روابط

$$(ZC - F)_i = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n - s. \quad (۴۲)$$

تولید می‌کنیم.

به‌علاوه با جای‌گزینی از معادله (۵) در (۲) و استفاده از معادله (۲۰) به معادله (۴۳) می‌رسیم:

$$\sum_{k=0}^{s-1} (a_{ik} T(-1) + b_{ik} T(1) + c_{ik} T(0)) M^t B^k (M^t)^{-1}C = \mu_i, \quad i = 0, 1, \dots, s-1. \quad (۴۳)$$

قابل توجه است که:

$$T(1) = [1, 1, \dots, 1] \text{ و } T(-1) = [1, -1, \dots, (-1)^n].$$

با حل دستگاه $n + 1$ معادله و $n + 1$ مجهول (۴۲) و (۴۳) بردار C به دست می‌آید و در نتیجه $y_n(x)$ در معادله (۵) را می‌توان محاسبه کرد.

لازم به ذکر است اگر به جای معادله (۱) معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی به صورت (۴۴) داریم:

$$\sum_{k=0}^s p_k(x) y^{(k)}(x) + \sum_{r=0}^l p_r^*(x) y^{(r)}(x-\tau) = f(x) + \int_{-1}^1 k(x,t) y(t-\tau) dt + \int_{-1}^1 k^*(x,t) y(t) dt, \quad (44)$$

که در آن k^* تابع دو متغیره پیوسته معلوم است، باید ماتریس Z در (۴۱) را با عبارت ماتریسی زیر عوض کنیم.

$$Z = (\sum_{k=0}^s Q_k M^t B^k + \sum_{r=0}^l Q_r^* M^t B^r B_{-\tau} - AWM^t B_{-\tau})(M^t)^{-1} - A^*W, \quad (45)$$

که $k_n^*(x, t) = T(t)A^*T^t(x)$ است، و ماتریس A^* معلوم است و به صورت مشابه معادله (۸) به دست می‌آید.

برآورد خطا و تحلیل همگرایی

در این بخش به بررسی همگرایی روش عددی طرح شده می‌پردازیم.

قضیه ۱. فرض کنیم y جواب معادله (۱) و y_n تقریبی از آن باشد که با رابطه (۴) تعریف می‌شود. فرض کنیم ضرایب بسط متناظر از روش بخش ۳ به دست آمده باشد و توابع $k, p_r^*, r=0,1,\dots,l, p_k, k=0,1,\dots,s$ و f پیوسته باشند. اگر $e(x)$ تفاضل عبارات حاصل از جای‌گذاری $y(x)$ و $y_n(x)$ در معادله (۱) باشد در این صورت

$$\|e\|_{L^2(-1,1)}^2 \leq c_{0,1,\dots,s} n^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1,1)}^2 + c'_{0,1,\dots,l} \left(\frac{n}{2}\right)^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1-\tau,1-\tau)}^2. \quad (46)$$

اثبات: تحت شرایط مفروض قضیه از (۱) داریم:

$$\begin{aligned} |e(x)| &= \left| \sum_{k=0}^s p_k(x) (y^{(k)}(x) - y_n^{(k)}(x)) + \sum_{r=0}^l p_r^*(x) (y^{(r)}(x-\tau) - y_n^{(r)}(x-\tau)) \right. \\ &\quad \left. - \int_{-1}^1 k(x,t) (y(t-\tau) - y_n(t-\tau)) dt \right| \\ &\leq \sum_{k=0}^s |p_k(x)| |y^{(k)}(x) - y_n^{(k)}(x)| + \sum_{r=0}^l |p_r^*(x)| |y^{(r)}(x-\tau) - y_n^{(r)}(x-\tau)| \\ &\quad + \int_{-1}^1 |k(x,t)| |y(t-\tau) - y_n(t-\tau)| dt. \end{aligned}$$

اگر فرض کنیم $M_1 = \max_{0 \leq k \leq s} \|p_k\|_{L^\infty(-1,1)}$ و $M_2 = \max_{0 \leq r \leq l} \|p_r^*\|_{L^\infty(-1,1)}$ به علاوه فرض کنیم

$$M_3 = \max_{-1 \leq x, t \leq 1} |k(x,t)| \quad \text{و قرار دهیم } M = \max\{M_1, M_2, M_3\}, \text{ در این صورت داریم:}$$

$$\begin{aligned} |e(x)| &\leq M \sum_{k=0}^s |y^{(k)}(x) - y_n^{(k)}(x)| + M \sum_{r=0}^l |y^{(r)}(x-\tau) - y_n^{(r)}(x-\tau)| \\ &\quad + M \int_{-1}^1 |y(t-\tau) - y_n(t-\tau)| dt. \end{aligned}$$

بدون کاستن از کلیت فرض کنیم $l = s = 1$ در نتیجه

$$|e(x)| \leq M \left(\sum_{k=0}^1 |y^{(k)}(x) - y_n^{(k)}(x)| + \sum_{r=0}^1 |y^{(r)}(x-\tau) - y_n^{(r)}(x-\tau)| \right. \\ \left. + \int_{-1}^1 |y(t-\tau) - y_n(t-\tau)| dt \right).$$

پس

$$|e(x)|^2 \leq 2M^2 \left(\sum_{k=0}^1 |y^{(k)}(x) - y_n^{(k)}(x)|^2 + \sum_{r=0}^1 |y^{(r)}(x-\tau) - y_n^{(r)}(x-\tau)|^2 \right. \\ \left. + \left(\int_{-1}^1 |y(t-\tau) - y_n(t-\tau)| dt \right)^2 \right).$$

با انتگرال گیری از نامساوی فوق و استفاده از نامساوی کوشی-شوارتز داریم:

$$\|e\|_{L^2(-1,1)}^2 \leq 2M^2 \left(\sum_{k=0}^1 \|y^{(k)} - y_n^{(k)}\|_{L^2(-1,1)}^2 + \sum_{r=0}^1 \|y^{(r)} - y_n^{(r)}\|_{L^2(-1-\tau,1-\tau)}^2 \right. \\ \left. + \int_{-1}^1 \left(\int_{-1}^1 |y(t-\tau) - y_n(t-\tau)|^2 dt \right) dx \right).$$

با توجه به روابط (۳۳) و (۳۶) و مرجع [۲۱] برای $y \in H_m(-1,1)$ و $1 \leq m \leq n+1$ داریم:

$$\|y - y_n\|_{L^2(-1,1)} \leq cn^{-m} \left(\int_{-1}^1 \left(\frac{d^m y}{dx^m} \right)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

و

$$\left\| \frac{dy}{dx} - \frac{d}{dx} y_n \right\|_{L^2(-1,1)} \leq cn^{\frac{3}{2}-m} \left(\int_{-1}^1 \left(\frac{d^m y}{dx^m} \right)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

و در نتیجه برای هر $y \in H_m(a,b)$ و $1 \leq m \leq n+1$ با فرض $h = b - a$ داریم:

$$\|y - y_n\|_{L^2(a,b)} \leq ch^m n^{-m} \left(\int_a^b \left(\frac{d^m y}{dx^m} \right)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

و

$$\left\| \frac{dy}{dx} - \frac{d}{dx} y_n \right\|_{L^2(a,b)} \leq ch^{m-1} n^{\frac{3}{2}-m} \left(\int_a^b \left(\frac{d^m y}{dx^m} \right)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

پس

$$\|e\|_{L^2(-1,1)}^2 \leq 2M^2 \left(c_0 n^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1,1)}^2 + c_1 n^{\frac{3}{2}-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1,1)}^2 + c_0' 2^m n^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1-\tau,1-\tau)}^2 \right. \\ \left. + c_1' 2^{m-1} n^{\frac{3}{2}-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1-\tau,1-\tau)}^2 + 2c_0'' 2^m n^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1-\tau,1-\tau)}^2 \right)$$

با قرار دادن

$$c_{0,1} = 2M^2(c_0 + c_1 n^{\frac{3}{2}}) \text{ و } c_{0,1}' = 2M^2(c_0' + c_1' n^{\frac{3}{2}} + 2c_0'')$$

داریم:

$$\|e\|_{L^2(-1,1)}^2 \leq c_{0,1} n^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1,1)}^2 + c'_{0,1} \left(\frac{n}{2}\right)^{-m} \|y^{(m)}\|_{L^2(-1-\tau, 1-\tau)}^2,$$

بنابراین نامساوی (۴۶) در حالت $l = s = 1$ به دست آمد. برای $l, s > 1$ روند قابل تعمیم است.

نامساوی (۴۶) نشان می‌دهد که خطا از مرتبه $o\left(\left(\frac{n}{2}\right)^{-m}\right)$ است و با افزایش n و m خطا کاهش می‌یابد. اگر n و m به بی‌نهایت میل کنند خطا به صفر میل می‌کند.

مثال‌های عددی

در این بخش روش طرح شده را برای چند مثال به کار می‌بریم و نتایج حاصل را بررسی می‌کنیم.

مثال ۱. معادله انتگرال - دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه اول زیر

$$y'(x) - y(x) + xy'(x-1) + y(x-1) = x - 2 + \int_{-1}^1 (x+t)y(t-1) dt,$$

با شرط $y(-1) - 2y(0) + y(1) = 0$ را در نظر می‌گیریم [۱۸].

در این مثال داریم: $\tau = 1$ ، $p_0(x) = -1$ ، $p_1(x) = 1$ ، $p_0^*(x) = 1$ ، $p_1^*(x) = x$ ، $p_1^*(x) = x - 2$ و

$$k(x, t) = x + t$$

جواب دقیق این مسئله $y(x) = 3x + 4$ است.

با استفاده از تکنیک ارائه شده در بخش قبلی برای $n = 2$ جواب را به صورت (۴۷) تقریب می‌زنیم.

$$y_2(x) = T(x)C = \frac{c_0}{2}T_0(x) + c_1T_1(x) + c_2T_2(x), \quad (47)$$

داریم:

$$D_0 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_0^* = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_1^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

قابل توجه است که $d_{00} = -2$ ، $d_{10} = 2$ ، $d_{00}^* = 2$ ، $d_{10}^* = 0$ و $f_0 = -4$ ، بنابراین

$$Q_0 = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & -2 \end{bmatrix}, \quad Q_1 = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad Q_0^* = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$Q_1^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0.5 \\ 1 & 0.5 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \frac{-2}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ \frac{-2}{3} & 0 & \frac{14}{15} \end{bmatrix}.$$

بنابراین

$$\begin{aligned} Z &= (Q_0 M^t + Q_0 M^t B + Q_0^* M^t B_{-1} + Q_1^* M^t B B_{-1} - A W M^t B_{-1})(M^t)^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{-2}{3} & \frac{32}{3} \\ -2 & 3 & \frac{-22}{3} \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

با استفاده از معادله (۴۲) داریم:

$$-23c_1 + 92c_2 = -2, \quad -2c_0 + 3c_1 - 223c_2 = 1, \quad (48)$$

همچنین با استفاده از (۴۳) داریم:

$$4c_2 = 0. \quad (49)$$

با حل کردن دستگاه معادلات خطی (۴۸) و (۴۹) داریم:

$$c_0 = 8, \quad c_1 = 3, \quad c_2 = 0.$$

با جای گذاری ضرایب به دست آمده در معادله (۴۵) داریم $y_2(x) = 3x + 4$ که همان جواب دقیق مسئله است.**مثال ۲.** معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه سه با ضرایب متغیر

$$\begin{aligned} y'''(x) - (x-1)y''(x) + (x-1)y'(x) - y(x) + y'(x-1) &= \\ e^{(x-1)} + x\left(ex - \frac{x}{e} - \frac{2}{e}\right) + \int_{-1}^1 (xt - x^2)y(t) dt, \end{aligned}$$

با شرایط $y(0) = y'(0) = y''(0) = 1$ را در نظر می گیریم.

با استفاده از معادله (۴۴) داریم:

$$\begin{aligned} \tau = 1, p_0(x) = -1, p_1(x) = x-1, p_2(x) = -(x-1), p_3(x) = 1, p_0^*(x) = 0, \\ p_1^*(x) = 1, f(x) = e^{(x-1)} + x\left(ex - \frac{x}{e} - \frac{2}{e}\right), k(x, t) = 0 \text{ و } k^*(x, t) = xt - x^2. \end{aligned}$$

جواب دقیق مسئله $y(x) = e^x$ است.تقریب جواب معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری خطی در دسته ای از نقاط متناظر با $n = 3$ و $n = 4$ به دست آمده است. نتایج عددی در جدول ۱ قابل مشاهده است.**مثال ۳.** معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه دوم با ضرایب متغیر زیر را

$$\begin{aligned} (x+4)^2 y''(x) - (x+4)y'(x) + y(x-1) - y'(x-1) &= \\ \ln(x+3) - \frac{1}{x+3} + 3\ln(3) - 5\ln(5) + \int_{-1}^1 y(t) dt, \end{aligned}$$

جدول ۱. آنالیز خطای مثال ۲

x	n = 3		n = 4	
	$y_n(x)$	$ y(x) - y_n(x) $	$y_n(x)$	$ y(x) - y_n(x) $
0.5	1.6456	0.31e-02	1.6500	0.13e-02
0.4	1.4905	0.13e-02	1.4925	0.70e-03
0.3	1.3494	0.50e-03	1.3502	0.30e-03
0.2	1.2213	0.10e-03	1.2216	0.20e-03
0.1	1.1052	0.0000	1.1052	0.0000
0.0	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
-0.1	0.90484	0.0000	0.90484	0.0000
-0.2	0.81868	0.50e-04	0.81861	0.12e-03
-0.3	0.74056	0.50e-03	0.74040	0.42e-03
-0.4	0.66947	0.85e-03	0.66933	0.99e-03
-0.5	0.60443	0.21e-02	0.60461	0.19e-02

با شرایط $y(0) = \ln(4)$ و $y'(0) = \frac{1}{4}$ در نظر بگیرید. جواب دقیق مسئله $y(x) = \ln(x+4)$ است. با استفاده از معادله (۴۴) داریم:

$$\tau = 1, p_0(x) = 0, p_1(x) = -(x+4), p_2(x) = (x+4)^2, p_0^*(x) = 1, p_1^*(x) = -1,$$

$$f(x) = \ln(x+3) - \frac{1}{x+3} + 3\ln(3) - 5\ln(5), k(x, t) = 0, k^*(x, t) = 1.$$

جواب عددی برای معادله انتگرال-دیفرانسیل تأخیری خطی متناظر با $n = 3$ و $n = 4$ به دست می‌آید. نتایج عددی را در جدول ۲ ببینید.

جدول ۲. آنالیز خطای مثال ۳

x	n = 3		n = 4	
	$y_n(x)$	$ y(x) - y_n(x) $	$y_n(x)$	$ y(x) - y_n(x) $
0.5	1.50764	0.447e-02	1.50778	0.370e-02
0.4	1.48394	0.281e-02	1.48404	0.244e-02
0.3	1.45996	0.154e-02	1.46002	0.140e-02
0.2	1.43570	0.680e-03	1.43573	0.650e-03
0.1	1.41114	0.170e-03	1.41116	0.170e-03
0.0	1.38629	0.00000	1.38629	0.00000
-0.1	1.36114	0.170e-03	1.36116	0.180e-03
-0.2	1.33570	0.650e-03	1.33573	0.730e-03
-0.3	1.30994	0.144e-02	1.31000	0.167e-02
-0.4	1.28388	0.253e-02	1.28398	0.305e-02
-0.5	1.25752	0.391e-02	1.25766	0.490e-02

بحث و نتیجه‌گیری

این مقاله تأیید می‌کند که روش تقریبی ما که بر پایه روش تائو-چبیشف است، معادلات انتگرال-دیفرانسیل تأخیری فردهلم خطی مرتبه بالا با ضرایب متغیر را به دستگاه معادلات جبری خطی تبدیل می‌کند، روشی کارآمد است. نتایج عددی نشان می‌دهد که این روش برای حل مسئله می‌تواند مؤثر باشد. تقریب، با چند تغییر می‌تواند برای حل معادلات دیفرانسیل تأخیری و معادلات انتگرال-دیفرانسیل فردهلم به کار رود.

منابع

1. Jackiewicz Z., Rahman M., Welfert B. D., "Numerical solution of a Fredholm integro-differential equation modelling neural networks", *Appl. Numer. Math.* 56 (2006) 423-432.
2. Cao J., Wang J., "Delay-dependent robust stability of uncertain nonlinear systems with time delay", *Appl. Math. Comput.* 154 (2004) 289-297.
3. Wazwaz A. M., "A First Course in Integral Equations, World Scientific", River Edge, NJ, (1997).
4. Wang W., Lin C., "A new algorithm for integral of trigonometric functions with mechanization", *Appl. Math. Comput.* 164 (1) (2005) 71-82.
5. Rashed M. T., "Numerical solution of functional differential integral and integro-differential equations", *Appl. Numer. Math.* 156 (2004) 485-492.
6. Maleknejad K., Mahmoudi Y., "Numerical solution of linear Fredholm integral equation by using hybrid Taylor and block-pulse functions", *Appl. Math. Comput.* 149 (2004) 799-806.
7. Dehghan M., Shakeri F., "Solution of an integro-differential equation arising in oscillating magnetic fields using He's homotopy perturbation method", *Progr. In Electromagn. Res., PIER* 78 (2008) 361-376.
8. Gulsu M., Ozturk Y., Sezer M., "A new collocation method for solution of mixed linear integro-differential-difference equations", *Appl. Math. Comput.* 216 (2010) 2183-2198.
9. Delves L. M., Mohamed J. L., "Computational Methods for Integral Equations", Cambridge University Press, Cambridge (1985).
10. Bellman R., Cook K., "Differential-Difference Equations", Academic Press (1963).
11. Maleknejad K., Aghazadeh N., "Numerical solutions of Volterra integral equations of the second kind with convolution kernel by using Taylor-series expansion method", *Appl. Math. Comput.* 161 (3) (2005) 915-922.
12. Karamete A., Sezer M., "A Taylor collocation method for the solution of linear integro-differential equations", *Int. J. Comput. Math.* 79 (9) (2002) 987-1000.
13. Tavassoli Kajani M., Ghasemi M., Babolian E., "Numerical solution of linear integro-differential equation by using sine-cosine wavelets", *Appl. Math. Comput.* 180 (2006) 569-574.
14. Razzaghi M., Yousefi S., "Legendre wavelets method for the nonlinear Volterra-Fredholm integral equations", *Math. Comput. Simul.* 70 (2005) 1-8.
15. Asady B., Tavassoli Kajani M., HadiVencheh A., Heydari A., "Solving second kind integral equations with hybrid Fourier and block-pulse functions", *Appl. Math. Comput.* 160 (14) (2005) 517-522.
16. Nas S., Yalcinbas S., Sezer M., "A Taylor polynomial approach for solving high order linear

- Fredholm integro-differential equations", *Int. J. Math. Educ. Sci. Technol.* 31 (2) (2000) 213-225.
17. Zhao J., Corless R. M., "Compact finite difference method for integro-differential equations, *Appl. Math. Comput.* 177 (2006) 271-288.
18. Gulsu M., Sezer M., "Approximations to the solution of linear Fredholm integro-differential-difference equation of high order", *J. Franklin Inst.* 343 (2006) 720-737.
19. Lanczos C., "Trigonometric interpolation of empirical and analytic functions", *J. Math. Phys.* 17 (1938) 123-199.
20. Ortiz E. L., "The Tau method, *SIAM J. Numer. Anal. Optim.* 12 (1969) 480-492.
21. Canuto C., Hussaini M. Y., Quarteroni A., Zang T. A., "Spectral Methods: Fundamentals in Single Domains", Springer, Berlin (2006).
22. Mason J. C., Handscomb D. C., "Chebyshev Polynomials", CRC Press (2002).
23. Dehghan M., Saadatmandi A., "A Tau method for the one-dimensional parabolic inverse problem subject to temperature overspecification", *Comput. Math. Appl.* 52 (2006) 933-940.
24. Pour-Mahmoud J., Rahimi-Ardabili M. Y., Shahmorad S., "Numerical solution of the system of Fredholm integro-differential equations by the Tau method", *Appl. Math. Comput.* 168 (2005) 465-478.
25. Hosseini S. M., Shahmorad S., "A matrix formulation of the Tau method and Volterra linear integro-differential equations", *Korean J. Comput. Appl. Math.* 9 (2) (2002) 497-507.
26. Kalla S. L., Khajah H. G., "Tau approximation method of the Hubbell rectangular source integral", *Radiat. Phys. Chem.* 59 (1) (2000) 17-21.