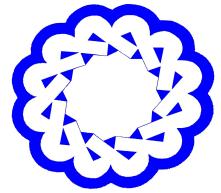


موجک‌ها و جبرخطی

<http://wala.vru.ac.ir>



دانشگاه ولیعصر (عج)

رفسنجان

بررسی پایداری معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی با یک رویکرد جدید

مصطفی اسلامی*، هادی رضازاده ب

آ گروه ریاضی، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران
ب دانشکده فناوری‌های مهندسی، دانشگاه دولتی تخصصی فناوری‌های نوین آمل، آمل، ایران

چکیده

بررسی پایداری معادلات دیفرانسیل بدون حل صریح آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تعاریف مختلفی در ارتباط با پایداری دستگاه معادلات دیفرانسیل موجود است که در اینجا از تعریف پایداری به مفهوم لیاپانوف استفاده خواهیم کرد. در این مقاله، ابتدا با به کارگیری خاصیت بسط مجانبی تابع میتگ-لفلر به بررسی پایداری معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی می پردازیم، سپس برای نشان دادن کارایی و تصدیق نتایج مطرح شده در بررسی پایداری این نوع معادلات، یک دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی را با استفاده از روش تبدیل دیفرانسیل کسری چندگامی مورد بررسی قرار می دهیم.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت شده: ۱۷ دی ۱۳۹۶
پذیرفته شده: ۶ تیر ۱۳۹۷
دسترسی آنلاین: ۷ مرداد ۹۷
ادیتور رابط: فاطمه پنجه‌علی‌بیک

کلمات کلیدی:

مشق کسری از مرتبه
توزیعی، مقادیر ویژه،
معادلات دیفرانسیل
کسری.

حسابان کسری نامی است برای مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری از مرتبه دلخواه که تعمیمی برای مشتق و انتگرال از مرتبه صحیح است. از آنجا که قدمت این مفاهیم کسری به اواخر قرن هفدهم میلادی برمی‌گردد لذا بر شمردن این شاخه از ریاضیات به‌عنوان یک موضوع جدید مطلقاً اشتباه است. اگرچه این موضوع دارای سابقه‌ای بیش از ۳۰۰ سال می‌باشد، اما حدود ۵۰ سال پیش پس از نخستین کنفرانس بین‌المللی حسابان کسری که در دانشگاه نیوهاون^۱ به همت پروفیسور برترام راس^۲ برگزار گردید [۱۴]، نوع نگاه‌ها به این موضوع که حسابان کسری در حوزه ریاضیات محض قرار دارد تغییر کرد و از آن زمان تاکنون به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدل‌سازی بسیاری از پدیده‌های مهندسی مورد توجه دانشمندان زیادی قرار گرفت. به این علت که اولاً معادلات دیفرانسیل کسری به دلیل خصوصیت غیرموضعی بودنشان در اکثر دامنه‌ها دقیقتر عمل می‌کنند، ثانیاً مشتقات کسری روی دامنه‌های ناهموار نیز قابل تعریف هستند. با توجه به اهمیت موضوع، تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر در زمینه بررسی پایداری دستگاه‌هایی با مشتقات کسری ارائه گردید. به‌عنوان مثال، ماتیگنون^۳ و دنگ^۴ به ترتیب پایداری دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل کسری و دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه کسری با تأخیر چندگانه را مطالعه کردند [۱۲، ۸]. ایده اولیه مشتقات کسری از مرتبه توزیعی توسط کپوتو مطرح شد [۶] و در ادامه توسط خود کپوتو^۵ [۷]، باگلی و تورویک^۶ توسعه یافت [۴، ۵]. سپس محققین دیگر اقدام به ارائه مدل‌های ریاضی که در ساختار آنها مشتقات کسری از مرتبه توزیعی استفاده می‌شد، نمودند. برای مثال دیتلم^۷ با بیان یک روش عددی مبتنی بر دستگاه معادلات کسری، بسیاری از پدیده‌های فیزیکی و مسائل مهندسی را مورد تحلیل و بررسی قرار داد [۹]. از آنجایی که پایداری چنین دستگاه‌هایی از اهمیت بالایی برخوردار است، برای اولین بار صابری نجفی و همکارانش در سال ۲۰۱۰ به بررسی پایداری دستگاه‌های دیفرانسیل خطی

*نویسنده مسئول

آدرس ایمیلها: Mostafa.eslami@umz.ac.ir (مصطفی اسلامی)، H.rezazadeh@ausmt.ac.ir (هادی رضازاده).
 موجک‌ها و جبرخطی (۱۳۹۷) © <http://doi.org/10.22072/wala.2018.78897.1144>

¹New Haven university²Bertram Ross³Matignon⁴Deng⁵Caputo⁶Bagley and Torvik⁷Diethelm

کسری از مرتبه توزیعی با تابع چگالی نامنفی پرداختند [۱۳]. در ادامه امینی‌خواه و همکارانش دستگاه معادلات دیفرانسیل غیرخطی کسری از مرتبه توزیعی و همچنین دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی با تأخیر چندگانه را معرفی و در مورد پایداری این معادلات نتایجی را ارائه نمودند [۲، ۳]. در این مقاله قصد داریم روش جدیدی را برای بررسی پایداری دستگاه معادلات کسری از مرتبه توزیعی ارائه دهیم. این روش شامل دو مرحله زیر است:

مرحله اول. با به‌کارگیری یک روش انتگرال‌گیری مناسب معادله کسری از مرتبه توزیعی، به معادله دیفرانسیل چندمرتبه‌ای کسری^۸ تبدیل می‌شود.

مرحله دوم. معادله دیفرانسیل چندمرتبه‌ای کسری حاصل از مرحله اول را هم ارز با دستگاه معادلات کسری N بعدی می‌نماییم، سپس به بررسی پایداری دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری حاصل می‌پردازیم. در ادامه این مقاله، در بخش دوم پس از معرفی تابع میتگ-لفلر^۹ که نقشی مهم و اساسی در حساب کسری ایفا می‌کند، به ارائه معروف‌ترین مشتق کسری مطرح شده در حساب کسری یعنی، کپوتو می‌پردازیم، سپس مشتق کسری از مرتبه توزیعی را تعریف می‌نماییم. در بخش سوم با استفاده از انتگرال‌گیری عددی دوزنقه‌ای به بررسی پایداری دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی خواهیم پرداخت.

۲. حساب دیفرانسیل کسری

در این بخش، بعضی از نمادها و تعاریف حساب دیفرانسیل کسری را بیان می‌کنیم.

تعریف ۱.۰۲. همان طور که تابع نمایی نقش مهمی در حساب دیفرانسیل و انتگرال معمولی بازی می‌کند، تابع میتگ-لفلر نیز نقشی بسیار مهم در حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری ایفا می‌کند. این تابع در سال ۱۹۰۲ توسط ریاضیدان سوئدی به نام جی. ام. میتگ-لفلر^{۱۰} مورد مطالعه قرار گرفت که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰]:

$$E_{\alpha}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}, \quad \alpha > 0, \quad z \in \mathbb{C}, \quad (1.2)$$

⁸Multi-order fractional differential equation

⁹Mittag-Leffler

¹⁰J. M. Mittag-Leffler

در واقع تابع میتگ-لفلر تعمیمی از تابع نمایی می‌باشد.

تعریف ۲.۲. فرض کنید A یک ماتریس عددی $n \times n$ باشد. آنگاه تابع میتگ-لفلر ماتریسی را به صورت

$$E_{\alpha}(At^{\alpha}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^k t^{\alpha k}}{\Gamma(\alpha k + 1)}, \quad \alpha > 0, \quad (2.2)$$

نشان می‌دهند.

در ادامه لمی را بیان می‌کنیم که در مورد بسط تابع میتگ-لفلر اشاره دارد و ما را در بررسی پایداری دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل کسری یاری خواهد رساند.

لم ۳.۲. فرض می‌کنیم $0 < \alpha < 2$ ، در این صورت برای هر عدد صحیح $p \geq 1$ داریم:
الف. هرگاه $|arg(z)| \leq \frac{\alpha\pi}{4}$ و $|z| \rightarrow \infty$ بسط تابع میتگ-لفلر به صورت زیر خواهد بود:

$$E_{\alpha}(z) = \frac{1}{\alpha} z \exp(z^{1/\alpha}) - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1 - \alpha k)} \frac{1}{z^k} + O\left(\frac{1}{|z|^{p+1}}\right), \quad (3.2)$$

ب. هرگاه $|arg(z)| > \frac{\alpha\pi}{4}$ و $|z| \rightarrow \infty$ بسط تابع میتگ-لفلر به صورت زیر است:

$$E_{\alpha}(z) = - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1 - \alpha k)} \frac{1}{z^k} + O\left(\frac{1}{|z|^{p+1}}\right). \quad (4.2)$$

تعریف ۴.۲. انتگرال کسری ریمان-لیوویل از مرتبه کسری $\alpha < 0$ ، برای تابع $f(t) \in [a, b]$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$${}_a I_t^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau, \quad t \geq 0. \quad (5.2)$$

تعاریف مختلفی برای مشتقات کسری در ادبیات حسابان کسری موجود می‌باشد [۱۰]، که در ادامه ساده‌ترین و راحت‌ترین تعریف مورد استفاده در این حوزه را بیان می‌کنیم.

تعریف ۵.۲. مشتق کسری کپوتو، برای تابع $f(t)$ در سال ۱۹۶۷ توسط کپوتو معرفی شد، به صورت زیر بیان می‌شود

$${}^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t (t-\tau)^{n-\alpha-1} f^{(n)}(\tau) d\tau = {}_a I_t^{n-\alpha} f^{(n)}(t), \quad (6.2)$$

که $n-1 < \alpha < n$.

برای سادگی و بدون از دست دادن کلیت موضوع در ادامه فرض می‌کنیم که $a = 0$ و

$${}^C D_t^\alpha f(t) = {}^C D_t^\alpha f(t)$$

تبدیل لاپلاس مشتق کسری کپوتو به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathcal{L}\{{}^C D_t^\alpha f(t)\} = s^\alpha \mathcal{L}\{f(t)\} - \sum_{k=0}^{n-1} f^{(k)}(0) s^{\alpha-1-k}, \quad (7.2)$$

که $n-1 < \alpha \leq n$ و s پارامتر تبدیل لاپلاس است.

لم ۶.۲. با استفاده از تبدیل لاپلاس جواب دستگاه

$${}^C D_t^\alpha x(t) = Ax(t), \quad x(0) = x_0, \quad (8.2)$$

را می‌توان برحسب توابع میتگ-لفلر به صورت

$$x(t) = x_0 E_\alpha(At^\alpha), \quad (9.2)$$

بیان نمود که در آن $x \in \mathbb{R}^n$ ، ماتریس $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ، $x_0 = (x_{10}, \dots, x_{n0})^T$ به طوری که $0 < \alpha < 1$.

تعریف ۷.۲. دستگاه (۸.۲) را می‌گوییم پایدار است اگر و تنها اگر برای هر x_0 وجود داشته باشد $\varepsilon > 0$

به قسمی که $\|x(t)\| \leq \varepsilon$ برای $t \geq 0$.

همچنین این دستگاه به طور مجانب پایدار^{۱۱} است اگر و تنها اگر $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t)\| = 0$.

¹¹Asymptotically stable

تعریف ۸.۲. عملگر مشتق کسری از مرتبه توزیعی نسبت به تابع چگالی نامنفی $b(\alpha)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D^{b(\alpha)} = \int_{m-1}^m b(\alpha) \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} d\alpha, \quad m-1 < \alpha \leq m, \quad m \in \mathbb{N}, \quad (10.2)$$

که در واقع تعمیمی از عملگر مشتق کسری می‌باشد.

حال اگر از تعریف مشتق کسری کپوتو که در رابطه (۶.۲) بیان شد، برای محاسبه مشتق کسری داخل انتگرال استفاده نمائیم در این صورت مشتق کسری کپوتو از مرتبه توزیعی نسبت به تابع چگالی نامنفی $b(\alpha)$ برای تابع $f(t)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$${}^C D_t^{b(\alpha)} f(t) = \int_{m-1}^m b(\alpha) {}^C D_t^\alpha f(t) d\alpha, \quad m-1 < \alpha \leq m, \quad m \in \mathbb{N}, \quad (11.2)$$

که در واقع تعمیمی از عملگر مشتق کسری کپوتو می‌باشد.

۳. بررسی پایداری معادلات دیفرانسیل از مرتبه توزیعی با مشتق کسری

هدف اصلی ما در این بخش از مقاله بررسی پایداری معادلات دیفرانسیل از مرتبه توزیعی با مشتق کسری می‌باشد، که به راحتی می‌توان این نتایج را برای بررسی پایداری دستگاه‌های از مرتبه توزیعی با مشتق کسری گسترش داد.

معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی با مشتق کسری با شرایط اولیه به صورت

$${}^C D_t^{b(\alpha)} x(t) = f(x(t)), \quad t > 0, \quad (1.3)$$

$$x(0) = x_0,$$

می‌باشد که در آن $f(t) \in \mathbb{R}$, $x(t) \in \mathbb{R}$ تابع‌ای پیوسته و

$${}^C D_t^{b(\alpha)} x(t) = \int_0^1 b(\alpha) {}^C D_t^\alpha x(t) d\alpha, \quad 0 < \alpha \leq 1,$$

مشتق کسری کپوتو از مرتبه توزیعی $x(t)$ نسبت به تابع چگالی نامنفی $b(\alpha)$ می‌باشد. اکنون با به‌کارگیری روش ذوزنقه‌ای مرکب با k قسمت مساوی روی بازه $[0, 1]$ ، معادله (۱.۳) به معادله چندمرتبه‌ای با مشتق کسری

$$\frac{1}{k} \left[\frac{b_0}{\alpha_0} {}^C D_t^{\alpha_0} x(t) + b_1 {}^C D_t^{\alpha_1} x(t) + b_2 {}^C D_t^{\alpha_2} x(t) + \dots + b_{k-1} {}^C D_t^{\alpha_{k-1}} x(t) \right. \\ \left. + \frac{b_k}{\alpha_k} {}^C D_t^{\alpha_k} x(t) \right] \approx f(x(t)), \quad t > 0, \quad (2.3)$$

با مقدار اولیه

$$x(0) = x_0, \quad (3.3)$$

تبدیل می‌شود که در آن $b(\alpha_i) = b_i$ ، $i = 0, 1, \dots, k$. همچنین برای $i = 0, 1, \dots, k$ ، مرتبه α_i ها اعداد گویا هستند به‌طوری‌که $0 < \alpha_i < 1$ و $\alpha_k > \alpha_{k-1} > \alpha_{k-2} > \dots > \alpha_1 > \alpha_0$. بدون از دست دادن کلیت مسئله فرض می‌کنیم، برای $i = 0, 1, \dots, k$ اعداد صحیح مثبت v_i و u_i وجود دارند به‌طوری‌که

$$\alpha_i = v_i/u_i,$$

و v_i و u_i نسبت به هم اول باشند.

همچنین قرار می‌دهیم $\omega = 1/M$ که در آن M کوچک‌ترین مضرب مشترک u_i ها می‌باشد.

نکته ۱.۳. [۱۱] معادله (۲.۳) با مقدار اولیه (۳.۳) هم ارز با دستگاه معادلات کسری N -بعدی

$${}^C D_t^\omega x(t) = x_{\backslash}(t),$$

$${}^C D_t^\omega x_{\backslash}(t) = x_{\gamma}(t),$$

$$\vdots$$

$${}^C D_t^\omega x_{\alpha \circ M - \backslash}(t) = x_{\alpha \circ M}(t),$$

$${}^C D_t^\omega x_{\alpha \circ M}(t) = x_{\alpha \circ M + \backslash}(t),$$

$$\vdots$$

$${}^C D_t^\omega x_{\alpha \backslash M - \backslash}(t) = x_{\alpha \backslash M}(t),$$

$${}^C D_t^\omega x_{\alpha \backslash M}(t) = x_{\alpha \backslash M + \backslash}(t),$$

$$\vdots$$

$${}^C D_t^\omega x_{\alpha_k M - \backslash}(t) \approx \frac{\gamma}{b_k} \left(k f(x(t)) - b_{k-\backslash} x_{\alpha_{k-\backslash} M}(t) - \dots - b_{\backslash} x_{\alpha \backslash M}(t) - \frac{b_{\circ}}{\gamma} x_{\alpha \circ M}(t) \right),$$

با شرایط اولیه

$$x_{i(\circ)} = \begin{cases} x_{\circ}, & i = \alpha_k M - \backslash, \\ \circ, & \text{در غیر این صورت.} \end{cases} \quad (5.3)$$

است. دستگاه معادلات (۴.۳) با شرایط اولیه وابسته به آنرا می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$${}^C D_t^{\omega, \beta} X(t) = BX(t), \quad t > \circ, \quad (6.3)$$

با شرایط اولیه

$$X(\circ) = [\circ, \circ, \dots, \circ, x_\circ]^T,$$

که در آن

$$B = \begin{pmatrix} \circ & \backslash & \circ & \circ & \dots & \circ \\ \circ & \circ & \backslash & \circ & \dots & \circ \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \dots & \backslash \\ d_{N1} & d_{N2} & d_{N3} & d_{N4} & \dots & d_{NN} \end{pmatrix},$$

و

$$d_{Nj} = \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x}|_{x=\circ}, & j = 1, \\ -b_{k-i}, & j = \alpha_i M, \quad i = 1, 2, \dots, k-1, \\ \circ, & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

و $N = \alpha_k M$.

قضیه ۲.۳. جواب صفر معادله (۱.۳)

الف) به‌طور مجانب پایدار است هرگاه $|\arg(\lambda(B))| > \omega\pi/2$ ، که λ جواب معادله مشخصه

$$\det(\lambda I - B) = \circ, \tag{۷.۳}$$

و I ماتریس همانی $N \times N$ می‌باشد.

ب) پایدار است نه به‌طور مجانب، هرگاه همه مقادیر ویژه‌ی B در

$$|\arg(\lambda(B))| \geq \omega\pi/2,$$

صدق کنند و مقادیر ویژه صادق در $|\arg(\lambda(B))| = \omega\pi/2$ ، دارای تکرار هندسی^{۱۲} و جبری^{۱۳} یکسان باشند.

(ج) ناپایدار است هرگاه λ_0 ی (λ_0 مقدار ویژه B است) وجود داشته باشد به طوری که

$$|\arg(\lambda_0)| < \omega\pi/2.$$

اثبات. الف) براساس رابطه (۹.۲) داریم

$$x(t) = X(\circ)E_\omega(Bt^\omega).$$

همان طور که می‌دانیم ماتریس وارون‌پذیری مانند P وجود دارد به طوری که $P^{-1}BP = J$ ، که در آن J فرم کانونی جردن ماتریس B است. دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم:
حالت اول) اگر $J = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ ، آنگاه

$$E_\omega(Bt^\omega) = P [E_\omega(Jt^\omega)] P^{-1} = P \text{diag}(E_\omega(\lambda_1 t^\omega), \dots, E_\omega(\lambda_n t^\omega)) P^{-1}.$$

مطابق رابطه (۴.۲) هنگامیکه $t \rightarrow +\infty$ برای هر $1 \leq i \leq n$ خواهیم داشت

$$E_\omega(\lambda_i t^\omega) = - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{(\lambda_i t^\omega)^k} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i t^\omega|^{p+1}}\right) \rightarrow 0,$$

بنابراین

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|E_\omega(Jt^\omega)\| = \lim_{t \rightarrow +\infty} \|\text{diag}(E_\omega(\lambda_1 t^\omega), \dots, E_\omega(\lambda_n t^\omega))\| = 0.$$

¹²Algebraic multiplicity

¹³Geometric multiplicity

در نتیجه

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t)\| = \lim_{t \rightarrow +\infty} \|X(\circ)E_\omega(Bt^\omega)\| = \lim_{t \rightarrow +\infty} \|P[X(\circ)E_\omega(Jt^\omega)]P^{-1}\| = \circ.$$

حالت دوم) فرض کنید $J = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_s)$ و J_i و $1 \leq i \leq s$ به صورت

$$\begin{bmatrix} \lambda_i & 1 & \circ & \dots & \circ \\ \circ & \lambda_i & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \circ & \ddots & \ddots & \circ \\ \circ & \ddots & \ddots & \lambda_i & 1 \\ \circ & \circ & \dots & \circ & \lambda_i \end{bmatrix}_{n_i \times n_i},$$

باشد. در این صورت

$$\begin{aligned} E_\omega(Bt^\omega) &= P[E_\omega(Jt^\omega)]P^{-1} = P \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\text{diag}(J_1^k, J_2^k, \dots, J_s^k)t^{\omega k}}{\Gamma(\omega k + 1)} P^{-1} \\ &= P \text{diag}(E_\omega(J_1 t^\omega), E_\omega(J_2 t^\omega), \dots, E_\omega(J_s t^\omega)) P^{-1}. \end{aligned}$$

ماتریس $E_\omega(J_i t^\omega)$ ، $1 \leq i \leq s$ ، را می‌توان به شرح ذیل محاسبه کرد:

$$T(E_\omega(\lambda t^\omega)) \Big|_{\lambda=\lambda_i},$$

که در آن عملگر T به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\partial}{\partial \lambda} & \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda}\right)^2 & \cdots & \frac{1}{(n_i-1)!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda}\right)^{n_i-1} \\ & 1 & \frac{\partial}{\partial \lambda} & \cdots & \frac{1}{(n_i-2)!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda}\right)^{n_i-2} \\ & & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & & 1 & \frac{\partial}{\partial \lambda} \\ & & & & 1 \end{pmatrix}_{n_i \times n_i}.$$

همه‌ی عناصر غیرصفر تابع ماتریسی $E_\omega(J_i t^\omega)$ به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{1}{(j-1)!} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial \lambda}\right)^{j-1} E_\omega(\lambda t^\omega) \right\} \Big|_{\lambda=\lambda_i} \quad j = 1, 2, \dots, n_i, \quad 1 \leq i \leq s.$$

اگر $|\arg(\lambda_i)| > \omega\pi/2$ و $t \rightarrow \infty$ ، در این صورت بنا بر لم (۳.۲) داریم:

$$E_\omega(\lambda_i t^\omega) = - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{(\lambda_i t^\omega)^k} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i t^\omega|^{p+1}}\right),$$

هنگامیکه $t \rightarrow \infty$ داریم $|E_\omega(\lambda_i t^\omega)| \rightarrow 0$ و

$$\begin{aligned} \frac{1}{(j-1)!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_i}\right)^{j-1} E_\omega(\lambda_i t^\omega) &= \frac{1}{(j-1)!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_i}\right)^{j-1} \left\{ - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{(\lambda_i t^\omega)^k} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i t^\omega|^{p+1}}\right) \right\} \\ &= - \sum_{k=1}^p \frac{(-1)^{j-1} (k+j-2) \dots (k+1)k}{(j-1)! \Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{\lambda_i^{k+j-1} t^{\omega k}} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i|^{p+j} |t^\omega|^{p+1}}\right) \\ &= - \sum_{k=1}^p \frac{(-1)^{j-1} (k+j-2)!}{(j-1)! (k-1)! \Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{\lambda_i^{k+j-1} t^{\omega k}} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i|^{p+j} |t^\omega|^{p+1}}\right), \end{aligned}$$

هنگامیکه $t \rightarrow \infty$ ، برای هر $1 \leq j \leq n_i$ داریم:

$$\left| \frac{1}{(j-1)!} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \right)^{j-1} E_{\omega}(\lambda_i t^{\omega}) \right| \rightarrow 0.$$

بنابراین برای هر مقدار اولیه غیرصفر $X(0)$ نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|X(t)\| = \lim_{t \rightarrow +\infty} \|X(0)E_{\alpha}(At^{\omega})\| = 0.$$

ب) بدون از دست دادن کلیت مسئله فرض می‌کنیم مقدار ویژه بحرانی به نام λ_i وجود داشته باشد به طوری که $|\arg(\lambda_i)| = \omega\pi/2$ و تکرار جبری و هندسی یکسان با یک داشته باشد. در این صورت از (۹.۲) جوابی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$x(t) = X(0)E_{\omega}(Bt^{\omega}) = X(0)P \text{diag}(E_{\omega}(J_1 t^{\omega}), E_{\omega}(J_2 t^{\omega}), \dots, E_{\omega}(J_s t^{\omega}))P^{-1},$$

که J_k ها بلوک‌های جردن ماتریس از مرتبه n_k هستند به طوری که $|\arg(\lambda_k)| > \omega/2$ و

$$\sum_{k=1}^{i-1} n_k + \sum_{k=i+1}^s n_k + 1 = n, \quad k = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, s.$$

حال از رابطه ۳.۲ داریم:

$$E_{\omega}(\lambda_i t^{\omega}) = \frac{1}{\omega} \exp(t\lambda_i^{1/\omega}) - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{\lambda_i^k} \frac{1}{t^{\omega k}} + O\left(\frac{1}{|\lambda_i t^{\omega}|^{p+1}}\right).$$

فرض می‌کنیم $\lambda_i = \left(r(\cos \frac{\omega\pi}{4} + i \sin \frac{\omega\pi}{4})\right)$ که r قدر مطلق λ_i است. در این صورت

$$\begin{aligned}
E_{\omega}(\lambda i t^{\omega}) &= \frac{1}{\omega} \exp \left\{ t \left(r \left(\cos \frac{\omega \pi}{\gamma} + i \sin \frac{\omega \pi}{\gamma} \right) \right)^{1/\omega} \right\} \\
&- \sum_{k=1}^p \frac{\left(r \left(\cos \frac{\omega \pi}{\gamma} + i \sin \frac{\omega \pi}{\gamma} \right) \right)^{-k} t^{-\omega k}}{\Gamma(1 - \omega k)} + O \left(\left| r \left(\cos \frac{\omega \pi}{\gamma} + i \sin \frac{\omega \pi}{\gamma} \right) \right|^{-p-1} |t|^{-\omega p - \omega} \right) \\
&= \frac{1}{\omega} \exp \left\{ r^{1/\omega} t \left(\cos \frac{\pi}{\gamma} + i \sin \frac{\pi}{\gamma} \right) \right\} - \sum_{k=1}^p \frac{r^{-k} t^{-\omega k} \left(\cos \frac{-k \omega \pi}{\gamma} + i \sin \frac{-k \omega \pi}{\gamma} \right)}{\Gamma(1 - \omega k)} + O(t^{-\omega p - \omega}) \\
&= \frac{1}{\omega} \exp \left\{ i r^{1/\omega} t \right\} - \sum_{k=1}^p \frac{r^{-k} t^{-\omega k} r \left(\cos \frac{k \omega \pi}{\gamma} - i \sin \frac{k \omega \pi}{\gamma} \right)}{\Gamma(1 - \omega k)} + O(t^{-\omega p - \omega}),
\end{aligned} \tag{۸.۳}$$

مقدار قدر مطلق اولین جمله سمت راست تساوی بالا برابر با $\frac{1}{\omega}$ است در حالی که جملات باقیمانده وقتی

$t \rightarrow \infty$ ، به صفر میل می‌کنند. از اثبات قسمت (الف) این قضیه، برای $E_{\omega}(J_k t^{\omega})$

$k = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, r$ ، هنگامیکه $t \rightarrow \infty$ ، به صفر میل می‌کنند. بنابراین نتیجه می‌گیریم

که جواب صفر دستگاه (۱.۳) پایدار است و به‌طور مجانب پایدار نیست.

(ج) ابتدا فرض می‌کنیم B ماتریس قطری باشد، لذا طبق رابطه (۳.۲)، وقتی $t \rightarrow +\infty$ داریم:

$$E_{\omega}(\lambda_{\circ} t^{\omega}) = \frac{1}{\omega} \exp(t \lambda_{\circ}^{1/\omega}) - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1 - \omega k)} \frac{1}{\lambda_{\circ}^k} \frac{1}{t^{\omega k}} + O \left(\frac{1}{|\lambda_{\circ} t^{\omega}|^{p+1}} \right) \rightarrow +\infty,$$

همچنین

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t)\| = \lim_{t \rightarrow +\infty} \|X(\circ) E_{\omega}(B t^{\omega})\| = +\infty.$$

حال فرض می‌کنیم $B = P J P^{-1}$ شکل کانونی جردن ماتریس B باشد. از رابطه ۳.۲ داریم:

$$\frac{1}{(j-1)!} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_0} \right)^{j-1} E_{\omega}(\lambda_0 t^{\omega}) \right\} = \frac{1}{(j-1)!} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_0} \right)^{j-1} \left(\frac{1}{\omega} \exp(\lambda_0^{1/\omega} t) - \sum_{k=1}^p \frac{1}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{\lambda_0^k t^{\omega k}} + O\left(\frac{1}{|\lambda_0 t^{\omega}|^{p+1}} \right) \right) \right\}$$

$$\frac{1}{\lambda_0 (j-1)!} \left\{ \frac{(1-\omega)(1-2\omega)\dots(1-(j-1)\omega)}{\omega^j} \lambda_0^{(1/\omega)-(j-1)} t + \dots \right.$$

$$\left. \frac{\left(\frac{(j-1)j}{2} - (j-1)\omega - \frac{(j-1)(j-2)}{2} \omega \right)}{\omega^j} \lambda_0^{(1/\omega)j-2-(j-1)} t^{j-2} + \dots \right.$$

$$\left. \frac{1}{\omega^j} \lambda_0^{(1/\omega)j-1} t^{j-1} \right\} \exp(\lambda_0^{1/\omega} t)$$

$$- \frac{1}{(j-1)!} \sum_{k=1}^p \frac{(-k)(-k-1)\dots(-k-j+2)}{\Gamma(1-\omega k)} \frac{1}{\lambda_0^{k+j-1} t^{\omega k}} + O\left(\frac{1}{|\lambda_0|^{p+j} t^{(p+1)\omega}} \right).$$

بنابراین، برای t به قدر کافی بزرگ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
& \left| \frac{1}{(j-1)!} \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_0} \right)^{j-1} E_{\omega}(\lambda_0 t^{\omega}) \right\} \right| \geq \frac{1}{(j-1)!} \left\{ \left| \frac{1}{\omega^j} \lambda_0^{(\omega/\omega)^{j-1} - (j-1)} t^{j-1} \right| \right. \\
& \quad \left. - \left| \frac{\left(\frac{(j-1)j}{\omega} - (j-1)\omega - \frac{(j-1)(j-2)\omega}{\omega} \right)}{\omega^j} \lambda_0^{(\omega/\omega)^{j-2} - (j-1)} t^{j-2} \right| - \dots \right. \\
& \quad \left. - \left| \frac{(\omega-1)(\omega-2)\omega \dots (\omega-(j-2)\omega)}{\omega^j} \lambda_0^{(\omega/\omega) - (j-1)} t \right\} \exp\left(|\lambda_0|^{\omega/\omega} \cos\left(\frac{\arg(\lambda_0)}{\omega} \right) t \right) \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{(j-1)!} \sum_{k=1}^p \frac{|(-k)(-k-1)\dots(-k-j+1)|}{|\Gamma(\omega-k)|} \frac{1}{|\lambda_0^{k+j} t^{\omega k - j + 1}|} + O\left(\frac{1}{|\lambda_0|^{p+j} t^{(p+1)\omega}} \right) \right) \\
& = \frac{1}{(j-1)!} \left\{ \frac{t^{j-1}}{\omega^j} |\lambda_0|^{(\omega/\omega)^{j-1} - (j-1)} - \frac{\left(\frac{(j-1)j}{\omega} - (j-1)\omega - \frac{(j-1)(j-2)\omega}{\omega} \right)}{\omega^j} t^{j-2} \right. \\
& \quad \left. |\lambda_0|^{(\omega/\omega)^{j-2} - (j-1)} - \dots - \frac{(\omega-1)(\omega-2)\omega \dots (\omega-(j-2)\omega)}{\omega^j} t \right. \\
& \quad \left. |\lambda_0|^{(\omega/\omega) - (j-1)} \right\} \exp\left(|\lambda_0|^{\omega/\omega} \cos\left(\frac{\arg(\lambda_0)}{\omega} \right) t \right) \\
& \quad - \frac{1}{(j-1)!} \sum_{k=1}^p \frac{|(-k)(-k-1)\dots(-k-j+1)|}{|\Gamma(\omega-k)|} \frac{1}{|\lambda_0^{k+j} t^{\omega k - j + 1}|} + O\left(\frac{1}{|\lambda_0|^{p+j} t^{(p+1)\omega}} \right).
\end{aligned}$$

از آنجاییکه $\left| \frac{\arg(\lambda_0)}{\omega} \right| < \pi/2$ ، داریم $\cos\left(\frac{\arg(\lambda_0)}{\omega} \right) > 0$. بنابراین از اولین جمله نامساوی اخیر نتیجه می‌شود که جواب صفر دستگاه (۱.۳) ناپایدار است. □

نکته ۳.۳. اگر $b(\alpha) = \sum_{j=1}^n c_j \delta(\alpha - j\gamma)$ ($0 < n\gamma \leq 1$) آنگاه معادله دیفرانسیل از مرتبه توزیعی با مشتق کسری (۱.۳) تبدیل به معادله دیفرانسیل چندمرتبه‌ای کسری (۲.۳) می‌شود لذا دیگر نیازی به استفاده از مرحله اول نیست، که در آن $\delta(t)$ ، تابع دلتای دیراک^{۱۴} می‌باشد.

مثال ۴.۳. دستگاه معادلات دیفرانسیل خطی کسری از مرتبه توزیعی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} {}^C D_t^{b_1(\alpha)} x_1(t) &= a x_1(t) + b x_2(t), \\ {}^C D_t^{b_2(\alpha)} x_2(t) &= c x_1(t) + d x_2(t), \end{aligned} \quad (9.3)$$

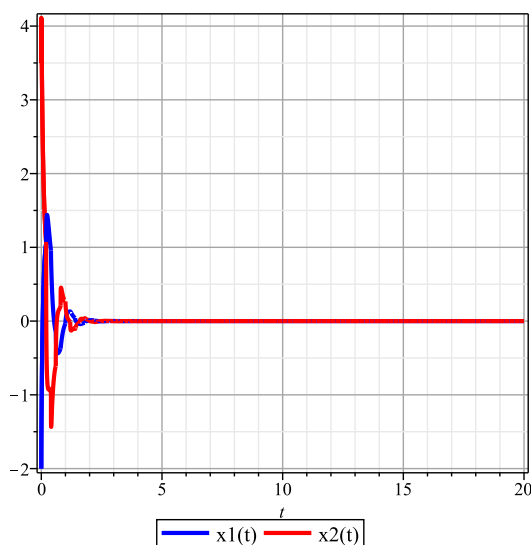
با شرایط اولیه $(x_1(0), x_2(0)) = (x_{10}, x_{20})$ ، که $b_i(\alpha)$ برای $i = 1, 2$ تابع چگالی نامنفی از مرتبه $\alpha \in (0, 1]$ و a, b, c, d اعداد ثابت هستند. حال با فرض

$$b_1(\alpha) = \delta(\alpha - \frac{1}{p}),$$

$$b_2(\alpha) = \delta(\alpha - \frac{1}{q}),$$

و با استفاده از ملاحظه (۱.۳) دستگاه (۹.۳) را به دستگاه مشتق کسری زیر تبدیل می‌نمائیم:

¹⁴Dirac Delta function



شکل ۱: نقطه تعادلی دستگاه (۹.۳) با شرایط اولیه $(-۲, ۳/۵)$ به طور مجانب پایدار است.

$${}^c D_t^{\frac{1}{6}} x_1(t) = y_1(t),$$

$${}^c D_t^{\frac{1}{6}} y_1(t) = y_2(t),$$

$${}^c D_t^{\frac{1}{6}} y_2(t) = a x_1(t) + b x_2(t), \quad (۱۰.۳)$$

$${}^c D_t^{\frac{1}{6}} x_2(t) = y_3(t),$$

$${}^c D_t^{\frac{1}{6}} y_3(t) = c x_1(t) + d x_2(t),$$

با شرایط اولیه $(0, 0, x_{10}, 0, x_{20})$ ، در این صورت دستگاه خطی کسری (۱۰.۳) تنها دارای یک نقطه تعادلی $(0, 0, 0, 0, 0)$ است. اکنون در مرحله‌ای هستیم که می‌توانیم از بررسی پایداری دستگاه (۱۰.۳) برای دستگاه (۹.۳) استفاده کنیم. بنابراین اگر $a = 1$ ، $b = 2$ ، $c = -1/5$ و $d = -2/2$ در نظر

بگیریم، آنگاه معادله مشخصه دستگاه (۱۰.۳) برای $\omega = \frac{1}{\epsilon}$ برابر با

$$\det(\lambda I - J) = 0, \quad (11.3)$$

است که در آن J ماتریس ژاکوبین دستگاه (۱۰.۳) حول نقطه تعادلش، به شکل

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1/5 & 0 & 0 & -2/2 & 0 \end{pmatrix},$$

می‌باشد. از آنجایی که تمام جواب‌های معادله (۱۱.۳)، در شرایط

$$|\arg(\lambda_i)| \geq \pi/12,$$

برای $i = 1, \dots, 5$ صدق می‌کنند بنابراین دستگاه (۹.۳) به‌طور مجانب پایدار است.

جواب تقریبی دستگاه با مشتق کسری از مرتبه توزیعی (۹.۳) با شرایط اولیه $(-2, 3/5)$ در شکل (۱) با به‌کارگیری از روش تبدیل دیفرانسیل کسری چندگامی [۱] نشان داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری از مرتبه توزیعی را تبدیل به دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری کرده سپس با استفاده از خاصیت بسط مجانبی تابع میتگ-لفلر به بررسی پایداری دستگاه معادلات دیفرانسیل کسری پرداختیم. در ادامه مثالی برای این نوع دستگاه‌ها ارائه داده‌ایم تا نتایج خودمان را تصدیق کنیم.

سپاس‌گزاری

این مقاله با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی دانشگاه مازندران انجام شده است.

مراجع

- [1] E. Abuteen, S. Momani and A. Alawneh, Solving the fractional nonlinear Bloch system using the multi-step generalized differential transform method, *Comput. Math. Appl.*, **68**(12) (2014), 2124–2132.
- [2] H. Aminikhah, A. Refahi Sheikhan, H. Rezazadeh, Stability analysis of distributed order fractional Chen system, Research Article, *The Scientific World Journal*, (2013).
- [3] H. Aminikhah, A. Refahi Sheikhan and H. Rezazadeh, Stability analysis of linear distributed order fractional system with multiple time delays, *U.P.B. Sci. Bull., Series A.*, **77**(2) (2015), 207–218.
- [4] R.L. Bagley and P.J. Torvik, On the existence of the order domain and the solution of distributed order equations-Part I, *Int. J. Appl. Math.*, **2**(7) (2000), 865–882.
- [5] R.L. Bagley and P.J. Torvik, On the existence of the order domain and the solution of distributed order equations-Part II, *Int. J. Appl. Math.*, **2** (2000), 965–988.
- [6] M. Caputo, *Elasticità e dissipazione*. Zanichelli, 1969.
- [7] M. Caputo, Mean fractional-order-derivatives differential equations and filters, *Ann. Univ. Ferrara.*, **41**(1) (1995), 73–84.
- [8] W. Deng, C. Li and J. Lü, Stability analysis of linear fractional differential system with multiple time delays, *Nonlinear Dyn.*, **48**(4) (2007), 409–416.
- [9] K. Diethelm and N.J. Ford, Numerical analysis for distributed-order differential equations, *J. Comput. Appl. Math.*, **225**(1) (2009), 96–104.
- [10] A.A. Kilbas, H.M. Srivastava and J.J. Trujillo, *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*, Elsevier Science Limited, 2006.
- [11] C. Li, F. Zhang, J. Kurths and F. Zeng, Equivalent system for a multiple-rational-order fractional differential system, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., A, Math. Phys. Eng. Sci.*, **371** (2013), 1-30.
- [12] D. Matignon, Stability results for fractional differential equations with applications to control processing, *In Computational engineering in systems applications*, **2** (1996), 963–968.

- [13] H.S. Najafi, A.R. Sheikhani and A. Ansari, Stability analysis of distributed order fractional differential equations, Research Article, *Abstr. Appl. Anal.*, (2011).
- [14] K.B. Oldham and J. Spanier, *The Fractional Calculus*, Academic Press, NewYork, 1974.