



Kharazmi University

Generalized matrix functions, determinant and permanent

Mohammad Hossein Jafari¹  , Ali Reza Madadi² 

1. Department of Pure Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

✉E-mail: jafari@tabrizu.ac.ir

2. Department of Pure Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: a-madadi@tabrizu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received:
12 July 2020
Revised form:
4 November 2020
Accepted:
14 November 2020
Published online:
21 May 2022

Keywords:

Generalized matrix function;
Determinant;
Permanent;
Permutation matrix;
Symmetric matrix;
Irreducible character;
Class function.

Introduction

Since linear and multilinear algebra has many applications in different branches of sciences, the attention of many mathematicians has been attracted to it in recent decades. The determinant and the permanent are the most important functions in linear algebra and so a generalized matrix function, which is a generalization of the determinant and the permanent, becomes significant. Generalized matrix functions connect some branches of mathematics such as theory of finite groups, representation theory of groups, graph theory and combinatorics, and linear and multilinear algebra.

Let S_n be the symmetric group of degree n , G be a subgroup of S_n , and $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ be a function. The function

$$d_\chi^G : M_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$$

given by

$$d_\chi^G(A) = \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i\sigma(i)}$$

is called the generalized matrix function associated to G and χ . Note that if

$G = S_n$ and $\chi = 1_G$, the principal character of G , then $d_\chi^G = \text{per}$ is the permanent and if $G = S_n$ and $\chi = \varepsilon$, the alternating character of G , then

$d_\chi^G = \text{det}$ is the determinant.

Results

In this paper, using permutation matrices or symmetric matrices, necessary and sufficient conditions are given for a generalized matrix function to be the determinant or the permanent. We prove that a generalized matrix function is the determinant or the permanent if and only if it preserves the product of symmetric permutation matrices. Also we show that a generalized matrix function is the determinant if and only if it preserves the product of symmetric matrices. To be precise, we show that:

If $G \leq S_n$ and $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ is a nonzero function, then the following are equivalent:

- 1) $d_\chi^G = \det$ or $d_\chi^G = \text{per}$;
- 2) $\forall \sigma, \tau \in S_n, d_\chi^G(A_\sigma A_\tau) = d_\chi^G(A_\sigma) d_\chi^G(A_\tau)$;
- 3) $\forall \sigma, \tau \in T_n, d_\chi^G(A_\sigma A_\tau) = d_\chi^G(A_\sigma) d_\chi^G(A_\tau)$;

where A_σ is the permutation matrix induced by $\sigma \in S_n$ and $T_n = \{\sigma \in S_n \mid \sigma^r = 1\}$.

Also if $G \leq S_n$ and $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ is a nonzero function, then $d_\chi^G = \det$ if and only if for all symmetric matrices $A, B \in M_n(\mathbb{C})$, $d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(A) d_\chi^G(B)$.

How to cite: Jafari, M.h., Madadi, A.R.; (2022) Generalized matrix functions, determinant and permanent. *Mathematical Researches*, 8 (2), 1-13



© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University

توابع ماتریسی تعمیم‌یافته، دترمینان و پرمنت

محمد حسین جعفری^۱، علیرضا مددی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه ریاضی محض، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. پست الکترونیکی: jafari@tabrizu.ac.ir

۲. گروه ریاضی محض، دانشکده ریاضی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. پست الکترونیکی: a-madadi@tabrizu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

در این مقاله با استفاده از ماتریس‌های جایگشتی یا ماتریس‌های متقارن شرایط لازم و کافی برای اینکه یک تابع ماتریسی تعمیم‌یافته دترمینان یا پرمنت باشد، ارائه می‌شود. ثابت می‌کنیم که یک تابع ماتریسی تعمیم‌یافته، دترمینان یا پرمنت است اگر و فقط اگر حافظ ضرب ماتریس‌های جایگشتی متقارن باشد. همچنین نشان می‌دهیم که یک تابع ماتریسی تعمیم‌یافته، دترمینان است اگر و فقط اگر حافظ ضرب ماتریس‌های متقارن باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱

واژه‌های کلیدی:

تابع ماتریسی تعمیم‌یافته،
دترمینان،
پرمنت،
ماتریس جایگشتی،
ماتریس متقارن،
کاراکتر تحویل‌ناپذیر،
تابع کلاسی.

استناد: جعفری، محمد حسین؛ مددی، علیرضا؛ (۱۴۰۱). توابع ماتریسی تعمیم‌یافته، دترمینان و پرمنت. پژوهش‌های ریاضی، ۸ (۲)، ۱-۱۳.



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه خوارزمی

۱. مقدمه

با توجه به اینکه جبر خطی و جبر چندخطی دارای کاربردهای فراوانی در شاخه‌های مختلف علوم می‌باشند، در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از ریاضیدان‌ها به این شاخه از ریاضیات جلب شده است و کتب و مقالات با ارزشی در این زمینه چاپ شده است. از آنجا که تابع دترمینان و پرمینت در جبرخطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، بنابراین بررسی خواص توابع ماتریسی تعمیم‌یافته که تابع دترمینان و تابع پرمینت حالت خاصی از این گونه توابع هستند به همان اندازه از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار خواهد بود. مهمترین ویژگی توابع ماتریسی تعمیم‌یافته این است که چند شاخه از ریاضیات را به هم پیوند می‌دهد، شاخه‌هایی مانند نظریه گروه‌های متناهی، نظریه نمایش، نظریه گراف، نظریه ترکیبیات، جبر خطی و جبر چندخطی. هدف اصلی این مقاله، مطالعه و بررسی آن دسته از توابع ماتریسی تعمیم‌یافته می‌باشد که ضرب ماتریس‌های متقارن یا ضرب ماتریس‌های جایگشتی را حفظ می‌کنند. این مقاله در دو بخش تنظیم شده است. بخش اول شامل تعاریف و مفاهیم اولیه است. بخش دوم نیز به نتایج اصلی اختصاص دارد که در آن با استفاده از ماتریس‌های جایگشتی یا ماتریس‌های متقارن به مشخصه‌سازی توابع ماتریسی تعمیم‌یافته با یک ویژگی خاص پرداخته می‌شود.

۲. تعاریف و پیش‌نیازها

در سراسر این مقاله همه گروه‌ها متناهی هستند و گروه متقارن و گروه متناوب از درجه n به ترتیب با نمادهای \mathbb{S}_n و \mathbb{A}_n نشان داده می‌شوند. همچنین $M_n(\mathbb{C})$ نمایانگر مجموعه ماتریس‌های $n \times n$ روی \mathbb{C} و $GL_n(\mathbb{C})$ نیز نشان دهنده مجموعه ماتریس‌های وارون‌پذیر $n \times n$ روی \mathbb{C} است.

تعریف: برای جایگشت $\sigma \in \mathbb{S}_n$ ، ماتریس $A_\sigma = (\delta_{\sigma(i)j}) \in M_n(\mathbb{C})$ را ماتریس جایگشتی متناظر با σ می‌نامند. بدیهی است که اگر $\sigma = 1$ جایگشت همانی باشد آنگاه $A_\sigma = I_n$ و برعکس. همچنین تعداد ماتریس‌های جایگشتی $n \times n$ متناهی بوده و برابر با $n!$ می‌باشد.

قضیه ساده زیر برخی خواص ماتریس‌های جایگشتی را بیان می‌کند.

قضیه ۱. فرض کنید $\sigma, \tau \in \mathbb{S}_n$. در این صورت

$$(الف) \quad A_\sigma A_\tau = A_{\sigma\tau}$$

$$(ب) \quad \det A_\sigma = \text{sgn}(\sigma)$$

$$(ج) \quad A_\sigma \text{ وارون‌پذیر است و } (A_\sigma)^t = A_{\sigma^{-1}} = (A_\sigma)^{-1}$$

$$(د) \quad A_\sigma \text{ متقارن است اگر و فقط اگر } \sigma^2 = 1$$

اثبات. رجوع شود به فصل چهارم از مرجع ۷.

با توجه به قضیه فوق، مجموعه همه ماتریس‌های جایگشتی $n \times n$ زیرگروهی از $GL_n(\mathbb{C})$ یکرخیخت با \mathbb{S}_n است.

در ادامه، مطالبی از نظریه نمایش گروهها بیان می‌شود که برای جزئیات بیشتر، خواننده به مرجع ۲ ارجاع داده می‌شود.

تعریف: (الف) یک نمایش از گروه G یک هم‌ریختی مانند $\mathcal{X}: G \rightarrow GL_n(\mathbb{C})$ می‌باشد.

(ب) تابع $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ با ضابطه $\chi(g) = \text{tr}\mathcal{X}(g)$ را کاراکتر G پیشنهاد شده توسط نمایش \mathcal{X} می‌نامند و عدد طبیعی

$$\chi(1) = \text{tr}\mathcal{X}(1) = n$$

را درجه کاراکتر χ می‌نامند. همچنین هر کاراکتر از درجه ۱، کاراکتر خطی نامیده می‌شود.

به آسانی می توان دید که کاراکترهای خطی یک گروه در هیچ عضوی از آن گروه صفر نیستند و بنابراین کاراکتر χ از گروه G خطی است اگر و فقط اگر $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}^*$ همریختی باشد که \mathbb{C}^* گروه ضربی \mathbb{C} است. در حالت خاص، تابع 1_G که هر عضو G را به ۱ می نگارد، یک کاراکتر خطی است که آن را کاراکتر اصلی می نامند. همچنین اگر $G \leq S_m$ آنگاه تابع ε که جایگشت های زوج را به ۱ و جایگشت های فرد را به -1 می نگارد، یک کاراکتر خطی است که آن را کاراکتر متناوب می نامند. در حقیقت برای هر $\sigma \in G$ داریم، $\varepsilon(\sigma) = \text{sgn}(\sigma)$.

حال فرض کنید χ و ψ دو کاراکتر از G باشند که به ترتیب توسط نمایش های X و Y پیشنهاد شده اند و $n = \chi(1) + \psi(1)$. در این صورت تابع $Z: G \rightarrow GL_n(\mathbb{C})$ با ضابطه

$$Z(g) = \begin{bmatrix} X(g) & 0 \\ 0 & Y(g) \end{bmatrix}$$

یک نمایش از G است. بدیهی است که

$$(\chi + \psi)(g) = \chi(g) + \psi(g) = \text{tr}Z(g).$$

بنابراین $\chi + \psi$ کاراکتری از G پیشنهاد شده توسط نمایش Z می باشد. این نتیجه می دهد که مجموع کاراکترها نیز یک کاراکتر است. یک کاراکتر را تحویل ناپذیر گویند هرگاه نتوان آن را بصورت مجموع دو کاراکتر نوشت. بدیهی است که هر کاراکتر خطی تحویل ناپذیر است.

قضیه زیر اطلاعاتی در مورد کاراکترهای یک گروه ارائه می دهد.

قضیه ۲. فرض کنید G یک گروه و χ کاراکتری از آن باشد. در این صورت

(الف) χ یک تابع کلاسی است، یعنی روی هر کلاس تزویج G مقدار ثابتی دارد.

(ب) برای هر $g \in G$ ، $|\chi(g)| \leq \chi(1)$ و $\overline{\chi(g)} = \chi(g^{-1})$.

(ج) تعداد کاراکترهای تحویل ناپذیر G برابر است با تعداد کلاس های تزویج G .

(د) گروه G آبلی است اگر و فقط اگر هر کاراکتر تحویل ناپذیر G خطی باشد.

(ه) تعداد کاراکترهای خطی G برابر است با $|G: G'|$ ، که در آن G' زیرگروه مشتق G است.

اثبات. رجوع شود به فصل دوم از مرجع ۲.

چون زیرگروه مشتق گروه متقارن S_n برابر زیرگروه متناوب A_n است لذا نتیجه زیر از قضیه قبل حاصل می شود.

نتیجه ۳. کاراکتر اصلی و کاراکتر متناوب تنها کاراکترهای خطی گروه S_n می باشند.

قضیه ای منسوب به برنساید^۱ در مورد کاراکترهای غیرخطی به صورت زیر وجود دارد.

قضیه ۴. هر کاراکتر تحویل ناپذیر غیرخطی در یک عضو از گروه صفر است.

اثبات. رجوع شود به فصل سوم از مرجع ۲.

در ادامه این بخش توابعی را معرفی می کنیم که تعمیمی از تابع دترمینان هستند.

تعریف: فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع باشد. تابع

$$d_\chi^G: M_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}$$

با ضابطه

¹ Burnside

$$d_{\chi}^G(A) = \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i\sigma(i)}$$

را تابع ماتریسی تعمیم‌یافته نسبت به G و χ می‌نامند که $A = (a_{ij})$.

بدیهی است که اگر χ و ψ دو تابع مختلط روی G باشند و $\lambda \in \mathbb{C}$ آنگاه $d_{\chi+\lambda\psi}^G = d_{\chi}^G + \lambda d_{\psi}^G$. همچنین برای

هر تابع $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ ، تابع $\hat{\chi} : S_n \rightarrow \mathbb{C}$ با ضابطه

$$\hat{\chi}(g) = \begin{cases} \chi(g) & g \in G \\ \circ & g \in S_n - G \end{cases}$$

توسعی از χ به S_n می‌باشد که خارج G صفر است. بدیهی است که $d_{\chi}^G = d_{\hat{\chi}}^{S_n}$ و برای هر ماتریس جایگشتی A_{σ} داریم،

$\hat{\chi}(\sigma) = d_{\chi}^G(A_{\sigma})$. این بدین معنی است که یک تابع ماتریسی تعمیم‌یافته با استفاده از ماتریس‌های جایگشتی به طور کامل مشخص می‌شود.

مثال: فرض کنید $G = S_n$.

(الف) اگر $\chi = 1_G$ کاراکتر اصلی G باشد آنگاه $d_{\chi}^G = \text{per}$ همان تابع معروف پرممنت می‌باشد.

(ب) اگر $\chi = \varepsilon$ کاراکتر متناوب G باشد آنگاه $d_{\chi}^G = \text{det}$ همان تابع معروف دترمینان می‌باشد.

مارکوس^۱ در مرجع ۶ ثابت کرد که اگر χ کاراکتر خطی G باشد، که $G \leq S_n$ ، و d_{χ}^G روی ماتریس‌های وارون‌ناپذیر صفر شود آنگاه $G = S_n$ و $\chi = \varepsilon$. به عبارت دیگر، $d_{\chi}^G = \text{det}$. مریس^۲ نیز به حالت دوگان مسأله مارکوس توجه کرد. او در مراجع ۷ و ۸ ثابت کرد که اگر χ کاراکتر تحویل‌ناپذیری از G باشد و d_{χ}^G روی ماتریس‌های وارون‌پذیر غیرصفر باشد آنگاه $G = S_n$ و $\chi = \varepsilon$. در نتیجه $d_{\chi}^G = \text{det}$. قضیه بعدی، که توسط نویسندگان مقاله حاضر با دو روش متفاوت در مراجع ۳ و ۴ ثابت شده است، تعمیمی از نتایج مارکوس و مریس می‌باشد که نشان می‌دهد مضارب دترمینان تنها توابع ماتریسی تعمیم‌یافته هستند که شبیه دترمینان رفتار می‌کنند. در ادامه برای تطبیق با نمادهای مراجع ۳ و ۴، مجموعه ماتریس‌های وارون‌پذیر و مجموعه ماتریس‌های وارون‌ناپذیر از $M_n(\mathbb{C})$ را به ترتیب با \mathcal{N} و \mathcal{S} نشان می‌دهیم.

قضیه ۵. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

(الف) $\forall A \in \mathcal{N}, d_{\chi}^G(A) \neq \circ$

(ب) $\forall A \in \mathcal{S}, d_{\chi}^G(A) = \circ$

(ج) $G = S_n$ و $\chi = \chi(1)\varepsilon$.

اثبات. رجوع شود به قضیه ۱.۲ از مرجع ۳ یا قضیه ۱.۲ از مرجع ۴.

به عنوان کاربردی از قضیه فوق، نویسندگان حاضر علاوه بر نتایج دیگر، یک شرط معادل برای تساوی دو تابع ماتریسی تعمیم‌یافته روی \mathcal{N} یا روی \mathcal{S} به صورت زیر بدست آوردند.

قضیه ۶. فرض کنید $H, K \leq S_n$. اگر $\varphi : H \rightarrow \mathbb{C}$ و $\psi : K \rightarrow \mathbb{C}$ دو تابع باشند آنگاه شرایط زیر معادلند:

(الف) $\forall A \in \mathcal{N}, d_{\varphi}^H(A) = d_{\psi}^K(A)$

(ب) $\forall A \in \mathcal{S}, d_{\varphi}^H(A) = d_{\psi}^K(A)$ و $\varphi(1) = \psi(1)$

(ج) توابع φ و ψ روی $H \cap K$ برابر و خارج $H \cap K$ صفر هستند.

¹ Marcus

² Merris

اثبات. رجوع شود به قضیه ۲.۲ از مرجع ۳ .

لازم به ذکر است که قضایای ۵ و ۶ در مرجع ۵ به صورت دیگر تعمیم داده شده‌اند. همچنین سانگوانگ^۱ و رادتس^۲ در مرجع ۹ با تاثیر از مراجع ۳ و ۴، به یک شرط معادل برای تساوی دو تابع ماتریسی تعمیم یافته روی ماتریس‌های متقارن دست یافتند.

می‌دانیم که دترمینان حافظ ضرب ماتریس‌ها و تشابه ماتریس‌ها است. قضیه زیر و دو نتیجه آن نشان می‌دهند که تنها توابع ماتریسی تعمیم یافته که حافظ ضرب ماتریس‌ها و تشابه ماتریس‌ها می‌باشند مضاربی از دترمینان هستند.

قضیه ۷. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

$$\text{الف) } \forall A, B \in S, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(BA)$$

$$\text{ب) } \forall A, B \in N, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(BA)$$

$$\text{ج) } \forall A \in S, B \in N, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(BA)$$

$$\text{د) } \forall A, B \in N, d_\chi^G(B^{-1}AB) = d_\chi^G(A)$$

$$\text{ه) } \forall A \in S, B \in N, d_\chi^G(B^{-1}AB) = d_\chi^G(A)$$

$$\text{و) } \chi = \chi(1)\varepsilon \text{ و } G = S_n$$

اثبات. رجوع شود به قضیه ۲.۲ از مرجع ۴ .

نتیجه ۸. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

$$\text{الف) } \forall A, B \in S, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(A)d_\chi^G(B)$$

$$\text{ب) } \forall A \in S, B \in N, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(A)d_\chi^G(B)$$

$$\text{ج) } \chi = \chi(1)\varepsilon \text{ و } G = S_n$$

اثبات. رجوع شود به نتیجه ۲.۲ از مرجع ۴ .

نتیجه ۹. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

$$\text{الف) } \forall A, B \in N, d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(A)d_\chi^G(B)$$

$$\text{ب) } \chi = \varepsilon \text{ و } G = S_n$$

اثبات. رجوع شود به نتیجه ۲.۲ از مرجع ۴ .

۳. نتایج اصلی

در این بخش با استفاده از ماتریس‌های جایگشتی و ماتریس‌های متقارن رفتارهای توابع ماتریسی تعمیم یافته مورد بررسی قرار می‌گیرند. در حقیقت برخی از نتایج بخش قبل را نسبت به ماتریس‌های جایگشتی یا ماتریس‌های متقارن مورد مطالعه قرار داده و نتایج جدیدی را بدست می‌آوریم.

ابتدا با قضیه زیر شروع می‌کنیم که یک معیار برای تابع کلاسی بودن ارائه می‌دهد.

قضیه ۱۰. فرض کنید $G \leq S_n$. در این صورت تابع $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع کلاسی است اگر و فقط اگر

¹ Sanguanwong

² Rodtes

$$\forall \alpha, \beta \in G, d_{\chi}^G(A_{\alpha}A_{\beta}) = d_{\chi}^G(A_{\beta}A_{\alpha})$$

اثبات. \Leftarrow ابتدا فرض کنیم χ یک تابع کلاسی و $\alpha, \beta \in G$ دلخواه باشند. در این صورت از قضیه ۱ داریم،

$$\begin{aligned} d_{\chi}^G(A_{\alpha}A_{\beta}) &= d_{\chi}^G(A_{\alpha\beta}) \\ &= \chi(\alpha\beta) \\ &= \chi(\alpha^{-1}(\alpha\beta)\alpha) \\ &= \chi(\beta\alpha) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta\alpha}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta}A_{\alpha}). \end{aligned}$$

\Rightarrow برعکس نشان می‌دهیم χ تابع کلاسی است. پس اگر $\alpha, \beta \in G$ دلخواه باشند آنگاه از فرض و قضیه ۱ داریم،

$$\begin{aligned} \chi(\alpha) &= d_{\chi}^G(A_{\alpha}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{(\alpha\beta)\beta^{-1}}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\alpha\beta}A_{\beta^{-1}}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta^{-1}}A_{\alpha\beta}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta^{-1}\alpha\beta}) \\ &= \chi(\beta^{-1}\alpha\beta). \end{aligned}$$

نتیجه ۱۱. فرض کنید $n \leq 5$ ، $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ تابعی باشد به طوری که به ازای برخی $\sigma \in G$ ، $\chi(\sigma) \neq 0$. در این صورت اگر

$$\forall \alpha, \beta \in S_n, d_{\chi}^G(A_{\alpha}A_{\beta}) = d_{\chi}^G(A_{\beta}A_{\alpha})$$

آنگاه $G = S_n$ یا $G = A_n$.

اثبات. از فرض برای هر $\alpha, \beta \in S_n$ داریم $d_{\chi}^{S_n}(A_{\alpha}A_{\beta}) = d_{\chi}^{S_n}(A_{\beta}A_{\alpha})$ زیرا $d_{\chi}^G = d_{\chi}^{S_n}$. بنابراین از قضیه ۱۰، $\hat{\chi}$ یک تابع کلاسی S_n است و این نتیجه می‌دهد که $\hat{\chi}$ روی σ^{S_n} ، کلاس تزویج σ در S_n ، غیرصفر است زیرا $\chi(\sigma) \neq 0$. پس $\sigma^{S_n} \subseteq G$ و لذا $N = \langle \sigma^{S_n} \rangle \subseteq G$. اما N یک زیرگروه نرمال و غیربدیهی از S_n است و چون $n \leq 5$ بنابراین $N = S_n$ یا $N = A_n$ و حکم بدست می‌آید. برای بدست آوردن نتایج جالب دیگر در مورد توابع ماتریسی تعمیم‌یافته، نیاز داریم که لمی را به صورت زیر در مورد گروه‌های متقارن بیان و اثبات کنیم.

لم ۱۲. فرض کنید $\sigma \in S_n$ یک جایگشت غیر همانی و غیر ترانهش باشد. در این صورت جایگشت‌های $\alpha, \beta \in S_n$ وجود

دارند به طوری که

(الف) α و β هر دو به صورت حاصل ضرب ترانهش‌های مجزا هستند.

(ب) نقاط متحرک α و β زیرمجموعه نقاط متحرک σ است.

(ج) $\sigma = \alpha\beta$.

اثبات. ابتدا فرض کنیم $\sigma = (a_1 a_p \dots a_k)$ یک k -دور باشد که $3 \leq k$.

اگر $k = 2l$ زوج باشد آنگاه جایگشت‌های

$$\alpha = (a_1 a_k)(a_r a_{k-1}) \cdots (a_{l-1} a_{l+2})(a_l a_{l+1})$$

$$\beta = (a_r a_k)(a_r a_{k-1}) \cdots (a_{l-1} a_{l+2})(a_l a_{l+2})$$

هر دو به صورت حاصل ضرب ترانهش‌های مجزا هستند و داریم $\sigma = \alpha\beta$.

همچنین اگر $k = 2l + 1$ فرد باشد آنگاه جایگشت‌های

$$\alpha = (a_1 a_k)(a_r a_{k-1}) \cdots (a_{l-1} a_{l+2})(a_l a_{l+2})$$

$$\beta = (a_r a_k)(a_r a_{k-1}) \cdots (a_{l-1} a_{l+2})(a_l a_{l+2})$$

هر دو به صورت حاصل ضرب ترانهش‌های مجزا هستند و داریم $\sigma = \alpha\beta$.

اما می‌دانیم که هر جایگشت به صورت حاصل ضرب دوره‌های مجزا نوشته می‌شود بنابراین اگر

$$\sigma = \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_r \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_s$$

تجزیه σ به دوره‌های مجزا باشد که در آن τ_i ها ترانهش و σ_i ها دوره‌های به طول حداقل ۳ هستند آنگاه برای هر $1 \leq i \leq s$

، جایگشت‌های α_i و β_i وجود دارند به طوری که α_i و β_i هر دو به صورت حاصل ضرب ترانهش‌های مجزا هستند، نقاط

متحرک α_i و β_i زیرمجموعه نقاط متحرک σ_i است و $\sigma_i = \alpha_i \beta_i$. حال جایگشت‌های

$$\alpha = \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_r \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_s$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_s$$

به صورت حاصل ضرب ترانهش‌های مجزا هستند، نقاط متحرک α و β زیرمجموعه نقاط متحرک σ است و $\sigma = \alpha\beta$.

بنابراین حکم اثبات می‌شود.

در ادامه فرض کنیم $T_n = \{\sigma \in S_n \mid \sigma^2 = 1\}$. واضح است که $\sigma \in T_n$ اگر و فقط اگر σ به صورت حاصل ضرب

ترانهش‌های مجزا نوشته شود. به عبارت دیگر، $\sigma \in T_n$ اگر و فقط اگر ماتریس جایگشتی A_σ متقارن باشد. با این نمادگذاری،

قضیه فوق بیان می‌کند که هر عضو از S_n به صورت حاصل ضرب دو عضو از T_n است.

در مراجع ۶ و ۷، معادل بودن بندهای (الف) و (ج) از قضیه زیر به عنوان یک مساله بیان شده است. قضیه ۱۴.۳ از مرجع

۹ نیز بیان می‌کند که بندهای (الف)، (ج) و (د) معادلند. قضیه زیر از آن جهت حائز اهمیت است که یک شرط معادل دیگر

یعنی بند (ه) به آن اضافه شده است. همچنین در مرجع ۹ برای اثبات حالت (د) \Leftarrow (الف)، قضیه‌ای منسوب به فروبنیوس^۱

بکار برده شده است که بیان می‌کند هر ماتریس مربعی را می‌توان به صورت حاصل ضرب دو ماتریس متقارن نوشت. لازم به ذکر

است که بوش^۲ اثباتی مقدماتی برای قضیه فروبنیوس در مرجع ۱ داده است. در اثبات قضیه زیر، هیچ استفاده‌ای از قضیه

فروبنیوس نخواهد شد.

قضیه ۱۳. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi: G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع تابع باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

$$\forall \sigma \in G, \chi(\sigma) = \chi(\sigma^{-1}) \quad (\text{الف})$$

$$\forall \sigma \in G, d_\chi^G(A_\sigma) = d_\chi^G(A_{\sigma^{-1}}) \quad (\text{ب})$$

$$\forall A \in M_n(\mathbb{C}), d_\chi^G(A) = d_\chi^G(A^t) \quad (\text{ج})$$

$$d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(BA), A, B \in M_n(\mathbb{C}) \quad (\text{د})$$

¹ Frobenius

² Bosch

$$\forall \alpha, \beta \in T_n, d_{\chi}^G(A_{\alpha}A_{\beta}) = d_{\chi}^G(A_{\beta}A_{\alpha}) \quad (ه)$$

اثبات. واضح است که (الف) و (ب) معادلند زیرا برای هر $\alpha \in G$ ، $d_{\chi}^G(A_{\alpha}) = \chi(\alpha)$.
الف \Leftarrow ج: اگر $A = (a_{ij})$ و $A^t = (b_{ij})$ آنگاه از فرض داریم،

$$\begin{aligned} d_{\chi}^G(A) &= \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{i\sigma(i)} \\ &= \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma^{-1}) \prod_{i=1}^n a_{i\sigma(i)} \\ &= \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma^{-1}) \prod_{j=1}^n a_{\sigma^{-1}(j)j} \\ &= \sum_{\sigma \in G} \chi(\sigma^{-1}) \prod_{j=1}^n b_{j\sigma^{-1}(j)} \\ &= \sum_{\tau \in G} \chi(\tau) \prod_{j=1}^n b_{j\tau(j)} \\ &= d_{\chi}^G(A^t) \end{aligned}$$

ج \Leftarrow د: برای هر دو ماتریس متقارن A و B از فرض داریم،

$$d_{\chi}^G(AB) = d_{\chi}^G((AB)^t) = d_{\chi}^G(B^t A^t) = d_{\chi}^G(BA)$$

د \Leftarrow ه: بدیهی است.

ه \Leftarrow الف: فرض کنیم $\sigma \in G$ دلخواه باشد. اگر $\sigma^2 = 1$ آنگاه حکم بدیهی است. پس فرض کنیم $\sigma^2 \neq 1$. بنابراین از لم ۱۲، جایگشت‌های $\alpha, \beta \in T_n$ وجود دارند به طوری که $\sigma = \alpha\beta$. لذا از فرض و قضیه ۱ داریم،

$$\begin{aligned} \chi(\sigma) &= d_{\chi}^G(A_{\sigma}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\alpha}A_{\beta}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta}A_{\alpha}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\beta\alpha}) \\ &= d_{\chi}^G(A_{\sigma^{-1}}) \\ &= \chi(\sigma^{-1}). \end{aligned}$$

تذکر: اگر χ کاراکتر باشد آنگاه بنابه قضیه ۲، برای هر $\sigma \in G$ ، $\chi(\sigma^{-1}) = \overline{\chi(\sigma)}$ و لذا بند (الف) از قضیه ۱۳ معادل با این است که χ حقیقی مقدار باشد.

می‌دانیم که ماتریس‌های جایگشتی وارون‌پذیر هستند. در قضیه ۵ هم دیدیم که مضارب دترمینان تنها توابعی ماتریسی تعمیم‌یافته هستند که روی ماتریس‌های وارون‌پذیر غیرصفرند. حال اگر در قضیه ۵ به جای ماتریس‌های وارون‌پذیر فقط از ماتریس‌های جایگشتی استفاده کنیم آنگاه قضیه زیر را خواهیم داشت.

قضیه ۱۴. فرض کنید $G \leq S_n$ و χ یک کاراکتر تحویل‌ناپذیر G باشد. در این صورت $d_{\chi}^G = \text{per}$ یا $d_{\chi}^G = \det$ اگر و فقط اگر برای هر $\sigma \in S_n$ ، $d_{\chi}^G(A_{\sigma}) \neq 0$.

اثبات. \Leftarrow چون برای هر $\sigma \in S_n$ داریم، $\det(A_{\sigma}) = \varepsilon(\sigma) = \pm 1$ و $\text{per}(A_{\sigma}) = 1$ پس حکم بدست می‌آید.

\Rightarrow اگر $\sigma \in S_n$ آنگاه بنابه فرض داریم، $\hat{\chi}(\sigma) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) \neq \circ$. بنابراین $\chi(\sigma) = \hat{\chi}(\sigma) \neq \circ$ و $\sigma \in G$. این ایجاب می‌کند $G = S_n$ و χ یک کاراکتر تحویل‌ناپذیر S_n است که در هیچ عضوی از S_n صفر نیست. از قضیه ۴ نتیجه می‌شود که χ کاراکتر خطی است و بنابه نتیجه ۳، چون ε و 1_{S_n} تنها کاراکترهای خطی S_n هستند پس $\chi = \varepsilon$ یا $\chi = 1_{S_n}$. به عبارت دیگر، $d_{\chi}^G = \det$ یا $d_{\chi}^G = \text{per}$.

در مثال زیر نشان می‌دهیم که تحویل‌ناپذیری کاراکتر در قضیه فوق ضروری است.

مثال: چون مجموع کاراکترها، کاراکتر است پس $\chi = 1_{S_p} + \varepsilon$ کاراکتری از S_p است که تحویل‌ناپذیر نیست و برای هر $\sigma \in S_p$ داریم،

$$d_{\chi}^{S_p}(A_{\sigma}) = \chi(\sigma) = 1 + \varepsilon(\sigma) \neq \circ$$

همچنین برای جایگشت $\sigma = 1$ داریم،

$$d_{\chi}^{S_p}(A_{\sigma}) = \chi(\sigma) = 2$$

$$\text{per}(A_{\sigma}) = 1_G(\sigma) = 1$$

$$\det(A_{\sigma}) = \varepsilon(\sigma) = 1$$

بنابراین $d_{\chi}^{S_p} \neq \text{per}$ و $d_{\chi}^{S_p} \neq \det$.

با توجه به نتیجه ۹، دترمینان تنها تابع ماتریسی تعمیم‌یافته است که حافظ ضرب ماتریس‌ها است. قضیه زیر نشان می‌دهد که دترمینان و پرمونت تنها توابع ماتریسی تعمیم‌یافته هستند که حافظ ضرب ماتریس‌های جایگشتی هستند.

قضیه ۱۵. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت $d_{\chi}^G = \text{per}$ یا $d_{\chi}^G = \det$.

اگر و فقط اگر

$$\forall \sigma, \tau \in S_n, d_{\chi}^G(A_{\sigma} A_{\tau}) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) d_{\chi}^G(A_{\tau})$$

اثبات. \Leftarrow چون دترمینان حافظ ضرب ماتریس‌ها است پس حکم برای دترمینان برقرار است. همچنین از قضیه ۱ برای هر $\sigma, \tau \in S_n$ داریم،

$$\text{per}(A_{\sigma} A_{\tau}) = \text{per}(A_{\sigma\tau}) = 1_G(\sigma\tau) = 1 = 1_G(\sigma) 1_G(\tau) = \text{per}(A_{\sigma}) \text{per}(A_{\tau})$$

بنابراین حکم برای پرمونت نیز برقرار است.

\Rightarrow برعکس برای هر $\sigma, \tau \in S_n$ از فرض و قضیه ۱ داریم،

$$d_{\chi}^G(A_{\sigma\tau}) = d_{\chi}^G(A_{\sigma} A_{\tau}) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) d_{\chi}^G(A_{\tau}).$$

اگر $\sigma = \tau = 1$ آنگاه

$$\chi(1) = d_{\chi}^G(I) = d_{\chi}^G(I) d_{\chi}^G(I) = \chi(1)^2$$

بنابراین $\chi(1) = 1$ یا $\chi(1) = \circ$. اگر $\chi(1) = \circ$ آنگاه برای هر $\sigma \in G$ داریم،

$$\chi(\sigma) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) = d_{\chi}^G(A_{\sigma} I) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) d_{\chi}^G(I) = \chi(\sigma) \chi(1) = \circ$$

و این تناقض است زیرا χ یک تابع غیرصفر است. پس $\hat{\chi}(1) = \chi(1) = 1$. همچنین از فرض برای هر $\sigma, \tau \in S_n$ داریم،

$$\hat{\chi}(\sigma\tau) = d_{\chi}^G(A_{\sigma\tau}) = d_{\chi}^G(A_{\sigma}) d_{\chi}^G(A_{\tau}) = \hat{\chi}(\sigma) \hat{\chi}(\tau)$$

در حالت خاص داریم $\hat{\chi}(\sigma) \neq \circ$ ، زیرا

$$1 = \hat{\chi}(1) = \hat{\chi}(\sigma) \hat{\chi}(\sigma^{-1})$$

پس $G = S_n$ و $\hat{\chi} = \chi$. روابط فوق نشان می‌دهند که $\chi : S_n \rightarrow \mathbb{C}^*$ یک همریختی است و لذا یک کاراکتر خطی از S_n می‌باشد. چون بنابه نتیجه ۳، ε و 1_{S_n} تنها کاراکترهای خطی S_n هستند پس $\chi = \varepsilon$ یا $\chi = 1_{S_n}$. به عبارت دیگر، $d_\chi^G = \text{per}$ یا $d_\chi^G = \text{det}$.

قضیه زیر تعمیمی از قضیه ۱۵ می‌باشد که بیان می‌کند در ترمینان و پرمینت تنها توابع ماتریسی تعمیم یافته هستند که حافظ ضرب ماتریس‌های جایگشتی متقارن هستند.

قضیه ۱۶. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیر صفر باشد. در این صورت $d_\chi^G = \text{per}$ یا $d_\chi^G = \text{det}$ اگر و فقط اگر

$$\forall \sigma, \tau \in T_n, d_\chi^G(A_\sigma A_\tau) = d_\chi^G(A_\sigma) d_\chi^G(A_\tau)$$

اثبات. کافی است عکس قضیه را اثبات کنیم. اگر $\sigma \in T_n$ آنگاه از فرض داریم،

$$\chi(1) = d_\chi^G(1) = d_\chi^G(A_\sigma A_\sigma) = d_\chi^G(A_\sigma) d_\chi^G(A_\sigma) = \hat{\chi}(\sigma)^2 \quad (1)$$

در حالت خاص با فرض $\sigma = 1$ نتیجه می‌شود $\chi(1) = \chi(1)^2$ و لذا $\chi(1) = 1$ یا $\chi(1) = 0$. همچنین اگر $\sigma \in S_n - T_n$ آنگاه بنابه لم ۱۲، $\alpha, \beta \in T_n$ وجود دارند به طوری که $\sigma = \alpha\beta$. با استفاده مجدد از فرض داریم،

$$\hat{\chi}(\sigma) = d_\chi^G(A_\sigma) = d_\chi^G(A_\alpha A_\beta) = d_\chi^G(A_\alpha) d_\chi^G(A_\beta) = \hat{\chi}(\alpha) \hat{\chi}(\beta) \quad (2)$$

در حالت خاص اگر $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$ ترانهش‌های مجزا باشند آنگاه از (۲) به استقرا نتیجه می‌شود،

$$\hat{\chi}(\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_s) = \hat{\chi}(\alpha_1) \hat{\chi}(\alpha_2) \dots \hat{\chi}(\alpha_s) \quad (3)$$

اگر $\chi(1) = 0$ آنگاه از دو رابطه (۱) و (۲) نتیجه می‌شود که برای هر $\sigma \in S_n$ ، $\hat{\chi}(\sigma) = 0$ و این یعنی χ تابع صفر است که تناقض است. لذا $\chi(1) = 1$ و برای هر $\sigma \in S_n$ ، $\hat{\chi}(\sigma) = \pm 1$. این نتیجه می‌دهد $G = S_n$ و $\hat{\chi} = \chi$. اگر $n \leq 2$ آنگاه حکم بدیهی است. پس فرض کنیم $n \geq 3$. دوباره از رابطه (۲) برای هر دو ترانهش α و β داریم،

$$\chi(\alpha\beta) = \chi(\alpha)\chi(\beta)$$

پس از رابطه

$$(a_1 a_2 a_3) = (a_1 a_2)(a_1 a_3) = (a_2 a_3)(a_1 a_2) = (a_1 a_3)(a_2 a_3)$$

داریم،

$$\chi((a_1 a_2)) \chi((a_1 a_3)) = \chi((a_2 a_3)) \chi((a_1 a_2)) = \chi((a_1 a_3)) \chi((a_2 a_3))$$

ولذا

$$\chi((a_1 a_2)) = \chi((a_2 a_3)) = \chi((a_1 a_3))$$

همچنین اگر $n \leq 4$ آنگاه با بکاربردن رابطه فوق برای جایگشت $(a_2 a_3 a_4)$ داریم،

$$\chi((a_2 a_3)) = \chi((a_2 a_4)) = \chi((a_3 a_4))$$

دو رابطه اخیر نشان می‌دهند که مقدار χ روی همه ترانهش‌ها برابر است.

در نهایت از روابط (۲) و (۳) نتیجه می‌شود که اگر مقدار χ روی ترانهش‌ها برابر با ۱ باشد آنگاه $\chi = 1_G$ و $d_\chi^G = \text{per}$ و اگر مقدار χ روی ترانهش‌ها برابر با -۱ باشد آنگاه $\chi = \varepsilon$ و $d_\chi^G = \text{det}$.

در مرجع [۹] قضیه‌ای ثابت شده است که بیان می‌کند اگر χ کاراکتری از G باشد آنگاه $d_\chi^G = \text{det}$ اگر و فقط اگر d_χ^G حافظ ضرب ماتریس‌های متقارن باشد. نتیجه زیر تعمیمی از قضیه مذکور است که در آن شرط کاراکتر بودن χ حذف شده است.

نتیجه ۱۷. فرض کنید $G \leq S_n$ و $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ یک تابع غیرصفر باشد. در این صورت $d_\chi^G = \det$ اگر و فقط اگر
 برای هر دو ماتریس متقارن A و B . $d_\chi^G(AB) = d_\chi^G(A)d_\chi^G(B)$.
 اثبات. کافی است عکس نتیجه را اثبات کنیم. طبق قضیه ۱۶ داریم، $d_\chi^G = \det$ یا $d_\chi^G = \text{per}$. اگر $n = 1$ آنگاه
 $\det = \text{per}$ و حکم بدیهی است. پس فرض کنیم $2 \leq n$ و $d_\chi^G = \text{per}$ در این صورت با فرض

$$A = B = \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & I_{n-2} \end{array} \right)$$

داریم،

$$AB = \left(\begin{array}{cc|c} 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ \hline 0 & 0 & I_{n-2} \end{array} \right)$$

9

$$d_\chi^G(AB) = \text{per}(AB) = 2 \neq 4 = \text{per}(A)\text{per}(B) = d_\chi^G(A)d_\chi^G(B)$$

که یک تناقض است. پس $d_\chi^G = \det$ و حکم ثابت است.

References

1. A. J. Bosch, The factorization of a square matrix into two symmetric matrices, The American Mathematical Monthly, Vol. 93, No. 6, 1986, 462-464.
2. I. M. Isaacs, Character Theory of Finite Groups, Academic Press, New York, 1976.
3. M. H. Jafari, A. R. Madadi, On the equality of generalized matrix functions, Linear Algebra and its Applications, Vol. 456, 2014, 16-21.
4. M. H. Jafari, A. R. Madadi, Generalized matrix functions and determinants, Central European Journal of Mathematics, Vol. 12, No. 3, 2014, 464-469.
5. M. H. Jafari, A. R. Madadi, Generalized matrix functions, irreducibility and equality, Bulletin of the Korean Mathematical Society, Vol. 51, No. 6, 2014, 1615-1623.
6. M. Marcus, Finite Dimensional Multilinear Algebra, Part I, Marcel Dekker, 1973.
7. R. Merris, Multilinear Algebra, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
8. R. Merris, Generalized matrix functions: a research problem, Linear and Multilinear Algebra, Vol. 8, 1979, 83-86.
9. R. Sanguanwong and K. Rodtes, The equality of generalized matrix functions on the set of all symmetric matrices, Vol. 565, No. 15, 2019, 65-81.