

## بررسی ویژگی‌های طیف آروسون بر ابرگروه‌های موضعاً فشرده

سید محمد طباطبایی، سیده بنت الهدی سادات حسینی\*

دانشگاه قم، گروه ریاضی

پذیرش ۹۷/۰۴/۰۴

دریافت ۹۶/۰۲/۰۹

### چکیده

در این مقاله به بررسی بیش‌تر مفهوم طیف‌های آروسون<sup>۱</sup> بر ابرگروه‌های موضعاً فشرده می‌پردازیم و خواص اساسی آن را به گروه‌های آبلی موضعاً فشرده و رده‌مهمی از ابرگروه‌ها را توسعه می‌دهیم که فشرده و شمارای نامتناهی هستند. به‌ویژه ثابت می‌کنیم  $M(\pi, E_1)M(\pi, E_2) \subseteq M(\pi, \overline{E_1 * E_2})$  که در آن  $(M, K, \pi)$  یک  $W^*$ -سیستم<sup>۲</sup> و  $E_1$  و  $E_2$  زیرمجموعه‌های بسته از  $\hat{K}$  هستند.

واژه‌های کلیدی: ابرگروه، طیف آروسون، زیرفضای طیفی،  $W^*$ -جبر

### مقدمه

طیف‌های آروسون و کون<sup>۳</sup> ابزارهایی کلیدی برای رده‌بندی جبرهای فون نویمان<sup>۴</sup> هستند [۳]، [۸]. نخستین بار مدقالچی و طباطبایی مفهوم طیف آروسون و زیرفضای طیفی را بر ابرگروه‌های موضعاً فشرده تعریف کردند [۹]. در این مقاله برخی خواص اساسی طیف آروسون را بر گروه‌های موضعاً فشرده و نیز رده‌مهمی از ابرگروه‌های دانکل<sup>۵</sup> و رامیرز<sup>۶</sup> در [۵] را توسعه می‌دهیم که ابرگروه‌هایی فشرده و شمارای نامتناهی هستند. (لازم به ذکر است که برخلاف حالت گروهی که هر گروه فشرده نامتناهی لزوماً ناشمارا است، در ابرگروه‌ها این اتفاق نمی‌افتد. به‌عبارت دیگر، ابرگروه‌های فشرده‌ای وجود دارند که شمارای نامتناهی هستند [۵]). این خواص نقشی مهم در سایر بررسی‌ها در این زمینه دارند. در واقع نشان می‌دهیم که  $\text{sp}_\pi(x_1 x_2) \subseteq \text{sp}_\pi(x_1) * \text{sp}_\pi(x_2)$  که در آن  $x_1, x_2 \in M$  و  $(M, K, \sigma)$  یک  $W^*$ -سیستم است. در تذکر ۶ خاصیت  $(\alpha)$  را بیان کرده‌ایم که برای اثبات قضیه اصلی ۸ لازم است. در بخش ۴ مثال‌هایی از ابرگروه‌ها را بیان می‌کنیم که خاصیت  $(\alpha)$  برای آن‌ها برقرار است.

در بخش دو به بیان تعریف و برخی خواص بنیادین ابرگروه‌های موضعاً فشرده می‌پردازیم. در این مقاله  $K$  یک فضای هاسدورف موضعاً فشرده است. مجموعه همه اندازه‌های رادون مختلط بر  $K$  را با  $M(K)$  و مجموعه همه اعضای نامنفی  $M(K)$  را با  $M^+(K)$  نشان می‌دهیم. محل هر عضو  $\mu$  از  $M(K)$  را با  $\text{supp } \mu$  نشان می‌دهیم. فرض

Sb.sadathosseini@stu.qom.ac.ir

\*نویسنده مسئول

1. Arveson  
2.  $W^*$ -system  
3. Connes  
4. Von Neumann  
5. Dunkl  
6. Ramirez

کنید  $E$  زیر مجموعه‌ای از  $K$  باشد. در این صورت بستار  $E$  را با  $\bar{E}$  و تابع مشخصه روی  $E$  را با  $\chi_E$  و متمم  $E$  را با  $E^c$  نشان می‌دهیم. همچنین اندازه دیراک در نقطه  $x$  را با  $\delta_x$  و مجموعه همه توابع مختلط مقدار پیوسته با محمل فشرده روی  $K$  را با  $C_c(K)$  نشان می‌دهیم.

$C^*$ -جبر  $M$ ، یک  $W^*$ -جبر نامیده می‌شود اگر برای جبر باناخی مانند  $M_*$  رابطه  $M_*^* = M$  برقرار باشد که در آن  $(M_*)^*$  فضای مزدوج  $M_*$  است ( $M_*$  پیش‌دوگان  $M$  نامیده می‌شود). هر  $W^*$ -جبر یک‌دار است (با واحد  $1_M$ ) [8]. جبرهای فون نویمان نمونه‌ای از  $W^*$ -جبرها هستند.

مجموعه همه عملگرهای  $(\sigma(M, M_*), \sigma(M, M_*))$ -پیوسته بر  $W^*$ -جبر  $M$  را با  $B_\sigma(M)$  نشان می‌دهیم.

### تعاریف و قضیه‌های مقدماتی

ابری‌گروه‌ها را در دهه ۱۹۷۰ (میلادی) جویت<sup>۱</sup> [۷]، دانکل [۴]، و اسپکتور [۱۱] تعریف کردند. گروه‌های موضعاً فشرده، ابری‌گروه‌های هم‌دسته دوگان و ابری‌گروه‌های چندجمله‌ای مثال‌هایی از ابری‌گروه‌ها هستند. برای مثال‌های بیشتر به [۱] مراجعه کنید.

در این بخش تعاریف و مفاهیم مرتبط با ابری‌گروه‌های موضعاً فشرده را بیان می‌کنیم. منابع اصلی ما [۱] و [۴] هستند.

۱. **تعریف.** فرض کنید  $K$  یک فضای هاسدورف، موضعاً فشرده و ناتهی باشد و در خواص زیر صدق کند:

۱. یک عمل دوتایی مانند  $M(K) \times M(K) \rightarrow M(K) : *$  موجود باشد که  $(M(K), +, *, *)$  را به یک جبر مختلط (شرکت‌پذیر) تبدیل می‌کند.

۲. برای هر  $\mu, \nu \in M^+(K)$  و نگاشت  $\mu * \nu \in M^+(K)$  از  $(\mu, \nu) \mapsto \mu * \nu$

به توی  $M^+(K)$  پیوسته باشد، که در آن  $M^+(K)$  را با توپولوژی مخروطی<sup>۲</sup> در نظر می‌گیریم.

۳. برای هر  $x, y \in K$ ،  $\delta_x * \delta_y$  یک اندازه احتمال با محمل فشرده است.

۴. نگاشت  $(x, y) \mapsto \text{supp}(\delta_x * \delta_y)$  از  $K \times K$  به  $\varphi(K)$  پیوسته باشد، که  $\varphi(K)$  فضای همه زیرمجموعه‌های

فشرده ناتهی  $K$  با توپولوژی مایکل<sup>۳</sup> است. (توپولوژی مایکل توپولوژی تولید شده به کمک زیرپایه‌های

$$\varphi_{U,V} := \{A \in \varphi(K) : A \cap U \neq \emptyset, A \subseteq V\}$$

۵. عنصر منحصر به فرد  $e \in K$  چنان وجود داشته باشد که به‌ازای هر عضو  $x \in K$ ،

$$\delta_x * \delta_e = \delta_e * \delta_x = \delta_x.$$

۶. یک هم‌سان‌ریختی  $x \mapsto x^-$  از  $K$  به روی  $K$  موجود باشد به‌طوری‌که برای هر  $x, y \in K$ ،  $(x^-)^- = x$ ،

$$(\delta_x * \delta_y)^- = \delta_{y^-} * \delta_{x^-}$$

$$\int_K f(t) d\mu^-(t) = \int_K f(t^-) d\mu(t) \quad (f \in C_0(K)).$$

1. Jewett  
2. Cone topology  
3. Michael

۷. برای هر  $x, y \in K$ ،  $e \in \text{supp}(\delta_x * \delta_y)$  اگر و تنها اگر  $x = y^-$ .

در این صورت  $K \equiv (K, *, ^-, e)$  یک ابرگروه نامیده می‌شود.

توجه کنید که در یک ابرگروه  $K$ ،  $\delta_x * \delta_y$  لزوماً یک اندازه دیراک نیست.

مجموعه  $\{ \text{supp}(\delta_x * \delta_y) \mid x, y \in K \}$  تک‌عضوی است  $Z(K) := \{x \in K \mid \text{supp}(\delta_x * \delta_y) \text{ تک‌عضوی است}\}$  را مرکز  $K$  می‌نامند.

با عمل  $(x, y) \mapsto x.y$  یک گروه موضعاً فشرده است که در آن  $x, y \in Z(K)$  و عضو یکتای موجود در مجموعه  $\text{supp}(\delta_x * \delta_y)$  است.

ابرگروه  $K$  جابه‌جایی نامیده می‌شود اگر برای هر  $x, y \in K$ ،  $\delta_x * \delta_y = \delta_y * \delta_x$ . در [۱۲] نشان داده شده

است که هر ابرگروه جابه‌جایی  $K$  دارای اندازه رادون مثبت مخالف صفر  $m$  است به طوری که برای هر  $x \in K$ ،  $\delta_x * m = m$  (چنین اندازه  $m$  ای اندازه هر ابرگروه  $K$  نامیده می‌شود).

در سراسر این مقاله فرض می‌کنیم  $K$  یک ابرگروه جابه‌جایی با اندازه  $m$  است. فرض کنید  $f$  و  $g$  توابع بورل مختلط مقدار بر  $K$  باشند و  $\mu \in M(K)$ . برای هر  $x, y \in K$  قرار می‌دهیم

$$f_x(y) = f(x * y) := \int_K f d(\delta_x * \delta_y).$$

هم‌چنین تعریف می‌کنیم

$$(\mu * f)(x) := \int_K f(y^- * x) d\mu(y),$$

$$(f * g)(x) := \int_K f(x * y)g(y^-) dm(y).$$

فرض کنید  $A, B \subseteq K$ . در این صورت قرار می‌دهیم

$$A * B = \bigcup_{x \in A, y \in B} \{x * y\}, \quad \{x * y\} = \text{supp}(\delta_x * \delta_y), \quad A^- = \{x^- : x \in A\}$$

تابع پیوسته مختلط  $\xi$  روی  $K$  را ضربی می‌نامیم اگر برای هر  $x, y \in K$ ،  $\xi(x * y) = \xi(x)\xi(y)$ . فضای همه توابع ضربی و کران‌دار بر  $K$  را با  $X_b(K)$  نشان می‌دهیم. تابع ضربی، کران‌دار و مخالف صفر  $\xi$  بر  $K$  کاراکتر نامیده می‌شود در صورتی که برای هر  $x \in K$ ،  $\xi(x^-) = \overline{\xi(x)}$ . فضای هاسدورف و موضعاً فشرده همه کاراکترها با توپولوژی همگرایی یک‌نواخت بر زیرمجموعه‌های فشرده  $K$  را دوگان  $K$  می‌نامیم و با  $\hat{K}$  نشان می‌دهیم.  $K$  را یک ابرگروه قوی می‌نامیم در صورتی که  $\hat{K}$  با نگاشت مزدوج مختلط به‌عنوان بازگشت و با ضرب نقطه‌ای به‌عنوان پیچش یعنی:

$$\mu(x)\chi(x) = \int_{\hat{K}} \xi(x)d(\delta_\mu * \delta_\chi)(\xi) \quad \forall \mu, \chi \in \hat{K}, x \in K$$

و تابع ثابت به‌عنوان همانی ابرگروه باشد.

فرض کنید  $\tau$  اندازه پلانچرل مرتبط با  $m$  بر  $\hat{K}$  باشد [۱]. در این صورت برای  $1 \leq p < \infty$ ،  $L^p(K, m)$  را با

$L^p(K)$  و  $L^p(\hat{K}, \tau)$  را با  $L^p(\hat{K})$  نشان می‌دهیم. فرض کنید  $f \in L^1(K)$  و  $\mu \in M(K)$ . در این صورت

تبدیل فوریه  $f$  و  $\mu$  را به ازای هر  $\xi \in \hat{K}$  چنین تعریف می‌کنیم:

$$\hat{f}(\xi) = \int_K \overline{\xi(t)}f(t)dm(t) \quad , \quad \hat{\mu}(\xi) = \int_K \overline{\xi(t)}d\mu(t).$$

برای هر  $f, g \in L^2(K)$  داریم  $\hat{f} * \hat{g} = (\widehat{fg})$  و  $\hat{f}, \hat{g} \in L^2(\hat{K})$ . [۱]. بر خلاف حالت گروهی، در ابرگروه‌ها فضای ساختاری جبر باناخ  $L^1(K)$  لزوماً برابر با  $\hat{K}$  نیست. در اینجا فقط تساوی  $\Delta(L^1(K)) = X_b(K)$  برقرار است و این در حالی است که  $\hat{K} \subseteq X_b(K)$ . در این مقاله فرض می‌کنیم  $K$  یک ابرگروه قوی و جابه‌جایی باشد و  $\hat{K} = X_b(K)$  (این شرایط را با  $(\wp)$  نشان می‌دهیم). واضح است که هر گروه آبلی موضعاً فشرده در این شرایط صدق می‌کند. هم‌چنین اگر  $G$  یک گروه آبلی موضعاً فشرده و  $\mathcal{H}$  زیرگروه فشرده از  $\text{Aut}(G)$  (گروه همه خودریختی‌های  $G$ ) باشد آن‌گاه فضای  $G_H$  شامل همه  $-H$  مدارها، ابرگروهی جابه‌جایی است که در شرایط  $(\wp)$  صدق می‌کند. در حقیقت  $(G_H) \cong (\hat{G})_H$ . برای جزئیات بیش‌تر به [۱۰] مراجعه شود. فرض کنید  $G$  گروهی موضعاً فشرده باشد و  $Z$  را برابر با مجموعه  $\{x \in G \mid xy = yx, y \in G\}$  در نظر می‌گیریم. بفرض  $G/Z$  فشرده و  $K$  ابرگروه همه رده‌های تزویج  $G$  است. به عبارت دیگر،  $K := \{[a] : a \in G\}$  که در آن  $[a] := \{b \in G : \exists g \in G; b = gag^{-1}\}$ . در این صورت  $K$  و دوگان آن  $\hat{K}$  در شرایط  $(\wp)$  صدق می‌کنند [۱].

در ادامه به بیان دو لم که در بخش‌های بعدی از آن‌ها استفاده می‌کنیم می‌پردازیم. اثبات این دو لم را می‌توان در [۱] و [۲] مشاهده کرد.

لم ۲. فرض کنید  $C$  و  $U$  دو زیرمجموعه از  $\hat{K}$  باشند به طوری که  $C$  فشرده،  $U$  باز و  $C \subseteq U$  باشد. در این صورت  $f \in L^1(K)$  موجود است به طوری که  $0 \leq \hat{f} \leq 1$  و  $\hat{f} = 1$  روی  $C$  و  $\text{supp}(\hat{f}) \subseteq U$ . در ادامه قرار می‌دهیم:

$$\mathbf{K}^1(K) := \{f \in L^1(K) : \text{supp}(\hat{f}) \text{ فشرده باشد}\}.$$

لم ۳.  $\mathbf{K}^1(K)$  در  $L^1(K)$  چگال است.

### طیف آروسون بر ابرگروه‌ها

فرض کنید  $A$  یک جبر باناخ جابه‌جایی باشد و  $E \subseteq A$ . در این صورت غلاف  $E$  را با  $\text{hull}(E)$  نشان می‌دهیم و چنین تعریف می‌کنیم:

$$\text{hull}(E) := \{\varphi \in \Delta(A) : \forall a \in E, \hat{a}(\varphi) = 0\},$$

که در آن  $\Delta(A)$  فضای ساختاری  $A$  است.

تعریف ۴. فرض کنید  $M$  یک  $W^*$ -جبر، و  $\pi : M(K) \rightarrow B_\sigma(M)$  یک هم‌سان‌ریختی نرم کاهنده باشد. برای هر  $t$  در  $K$ ،  $\pi(\delta_t)$  را با  $\pi_t$  نشان می‌دهیم.  $\pi$  یک نمایش نامیده می‌شود در صورتی که در شرایط زیر صدق کند:

۱. برای هر  $t \in K$ ،  $\pi_t : M \rightarrow M$  یک  $W^*$ -خودریختی باشد.

۲. برای هر  $x \in M$  و هر  $p \in M_*$ ، تابع  $t \mapsto \langle \pi_t(x), p \rangle$  پیوسته باشد.

۳.  $\pi_e = I_M$ ، که در آن  $e$  عضو همانی  $K$  و  $I_M$  نگاشت همانی روی  $M$  است.

در این صورت  $(M, K, \pi)$  یک  $W^*$ -سیستم نامیده می‌شود.

در سراسر این مقاله  $M$  یک  $W^*$ -جبر و  $\pi$  یک نمایش از ابرگروه  $K$  روی  $M$  است.

برای هر  $\mu \in M(K)$  داریم،

$$\langle \pi(\mu)(x), p \rangle = \int_K \langle \pi_t(x), p \rangle d\mu(t)$$

که در آن  $x \in M$  و  $p \in M_*$  [9].

**تعریف ۵.۱.** طیف آروسون برای نگاشت  $\pi$  را چنین تعریف می‌کنیم

$$\text{sp } \pi := \text{hull}(\{f \in L^1(K) : \pi(f) = 0\})$$

در این صورت  $\text{sp } \pi$  زیرمجموعه بسته‌ای از  $\hat{K}$  است و  $1 \in \text{sp } \pi$  [9].

۲. فرض کنید  $x \in M$ . تعریف می‌کنیم:

$$\text{sp}_\pi(x) := \text{hull}(\{f \in L^1(K) : \pi(f)(x) = 0\})$$

۳. فرض کنید  $E$  زیرمجموعه بسته‌ای از  $\hat{K}$  باشد. در این صورت  $M(\pi, E)$  را چنین تعریف می‌کنیم

$$M(\pi, E) := \{x \in M : \text{sp}_\pi(x) \subseteq E\}.$$

**تذکره ۶.** گوییم ابرگروه  $K$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کند هرگاه به‌ازای هر دو زیرمجموعه فشرده  $E_1$  و  $E_2$  از  $\hat{K}$  و

هر عضو  $L^1(K)$  مانند  $f$  که  $\hat{f}$  بر یک همسایگی از  $E_1 * E_2$  برابر با صفر باشد، اعضای از  $L^1(K)$  مانند  $f_1$  و

$f_2$  موجود باشند که برای  $i=1,2$  بر یک همسایگی از  $E_i$  داشته باشیم  $\hat{f}_i \equiv 1$  و برای هر  $s_1, s_2 \in K$  و

تقریباً هر  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2})$

$$\kappa(s_1, s_2, t) := \int f(s) f_1(s_1 * s^-) f_2(t * s^-) dm(s) = 0.$$

آشکارا چون  $K$  جابه‌جایی است مجموعه‌های  $\text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2})$  و  $\text{supp}(\delta_{s_2} * \delta_{s_1})$  با هم برابرند اما در حالت کلی

$\kappa(s_1, s_2, t) \neq \kappa(s_2, s_1, t)$ . در بخش ۴ نشان می‌دهیم که گروه‌های موضعاً فشرده و ابرگروه‌های معرفی شده

به‌وسیله دانکل و رامیرز در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کنند.

**لم ۷.** فرض کنیم  $(M, K, \pi)$  یک  $W^*$ -سیستم باشد،  $f_1, f_2 \in L^1(K)$  و  $x_1, x_2 \in M$  به‌طوری‌که به‌ازای

$i=1,2$  بر یک همسایگی از  $\text{sp}_\pi(x_i)$  داریم  $\hat{f}_i \equiv 1$  به‌ازای  $i=1,2$  و هر  $p \in M_*$  و  $t \in K$  قرار می‌دهیم

$$h_i(t) := \langle \pi_t(x_i), p \rangle$$

$$\langle \pi(f)(x_1 x_2), p \rangle = \int_K \int_K \int_K \kappa(u, v, t) h_1(u) h_2(t) d(\delta_u * \delta_v)(t) dm(u) dm(v).$$

**اثبات.** با استفاده از ([7], 3.1 F) به‌ازای هر  $s \in K$  داریم

$$\int_K f_2(v * s^-) h_2(v) dm(v) = \int_K f_2(v * s^-) h_2(v) d(\delta_u * m)(v)$$

$$= \int_K \int_K f_2(t * s^-) h_2(t) d(\delta_u * \delta_v)(t) dm(v).$$

از این‌رو بنا بر ([9], 3.3(viii)) به‌ازای  $i=1,2$  داریم،  $\pi(f_i)(x_i) = x_i$  و برای هر  $p \in M_*$  به‌دست می‌آوریم:

$$\langle \pi(f)(x_1 x_2), p \rangle = \int_K \langle \pi_s(x_1 x_2), p \rangle f(s) dm(s)$$

$$= \int_K \langle \pi_s(x_1), p \rangle \langle \pi_s(x_2), p \rangle f(s) dm(s)$$

$$= \int_K \langle \pi_s(\pi(f_1)(x_1)), p \rangle \langle \pi_s(\pi(f_2)(x_2)), p \rangle f(s) dm(s)$$

$$= \int_K \langle \pi(\delta_s * f_1)(x_1), p \rangle \langle \pi(\delta_s * f_2)(x_2), p \rangle f(s) dm(s)$$

$$\begin{aligned} &= \int_K \int_K \int_K h_1(u * s) f_1(u) h_2(v * s) f_2(v) f(s) dm(s) dm(u) dm(v) \\ &= \int_K \int_K \int_K f(s) f_1(u * s^-) f_2(v * s^-) h_1(u) h_2(v) dm(s) dm(u) dm(v) \\ &= \int_K \int_K \int_K f(s) f_1(u * s^-) f_2(t * s^-) h_1(u) h_2(t) dm(s) d(\delta_u * \delta_v)(t) dm(u) dm(v) \\ &= \int_K \int_K \int_K \kappa(u, v, t) h_1(u) h_2(t) d(\delta_u * \delta_v)(t) dm(u) dm(v). \end{aligned}$$

**قضیه ۸.** فرض کنید  $(M, K, \pi)$  یک  $W^*$ -سیستم باشد و  $K$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق کند. در این صورت برای هر  $x_1, x_2 \in M$   $sp_\pi(x_1 x_2) \subseteq sp_\pi(x_1) * sp_\pi(x_2)$ .

**اثبات.** ابتدا فرض کنید برای  $i=1, 2$ ،  $sp_\pi(x_i)$  فشرده باشد. قرار می‌دهیم  $E_i := sp_\pi(x_i)$  و  $x := x_1 x_2$ . با استفاده از ([9], 3.3(vi)) کافی است نشان دهیم برای هر  $f \in L^1(K)$  که  $\hat{f}$  بر یک همسایگی از  $E := E_1 * E_2$  برابر صفر است داریم  $\sigma(f)(x) = 0$ .

فرض کنید  $f \in L^1(K)$  و بر یک همسایگی از  $E$ ،  $\hat{f} \equiv 0$ . از آنجا که  $K$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کند برای  $i=1, 2$  می‌توانیم عناصر  $f_i$  از  $L^1(K)$  را به‌گونه‌ای انتخاب کنیم که بر یک همسایگی از  $E_i$ ،  $\hat{f}_i \equiv 1$  و برای هر  $s_1, s_2 \in K$  و تقریباً هر  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2})$ ،  $\kappa(s_1, s_2, t) = 0$ . در این صورت بنا بر لم قبل و خاصیت  $(\alpha)$ ، به‌ازای هر  $p \in M_*$ ،  $\langle \pi(f)(x), p \rangle = 0$ ، یعنی  $\pi(f)(x) = 0$ . بنابراین با استفاده از ([9] ۳.۳ (vi))،  $x \in M(\pi, E)$  حال فرض کنید به‌ازای  $i=1, 2$ ،  $sp_\pi(x_i)$  فشرده نباشد و فرض کنید  $(f_\alpha)$  همانی تقریبی برای  $L^1(K)$  باشد ([۱] از ۲.۲.۲۸). در این صورت برای هر  $y \in M$ ،  $\pi(f_\alpha)y \rightarrow y$  با توپولوژی  $\sigma(M, M_*)$  بنابراین

$$y \in \overline{\{\pi(f)(y) \mid f \in L^1(K), \|f\|_1 \leq 1\}}^\sigma$$

و با استفاده از لم ۳ داریم

$$y \in \overline{\{\pi(f)(y) \mid f \in \mathbf{K}^1(K), \|f\|_1 \leq 1\}}^\sigma.$$

در نتیجه با توجه به ([۱] از ۱.۲.۸، ۱.۲.۱) به‌دست می‌آوریم

$$x \in \overline{\{\pi(f)(x_1)\pi(g)(x_2) \mid f, g \in \mathbf{K}^1(K), \|f\|_1, \|g\|_1 \leq 1\}}^\sigma.$$

اکنون با استفاده از قسمت ابتدای اثبات و ([9], 3.3(v))، برای هر  $f, g \in \mathbf{K}^1(K)$  که  $\|f\|_1 \leq 1$  و  $\|g\|_1 \leq 1$  داریم  $sp_\pi(\pi(f)(x_1)\pi(g)(x_2)) \subseteq E$ . در آخر از آنجا که  $M(\pi, E) - \sigma(M, M_*)$  بسته است، آشکارا  $x \in M(\pi, E)$ .

**نتیجه ۹.** فرض کنید  $(M, K, \pi)$  یک  $W^*$ -سیستم باشد و  $K$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق کند،  $E_1$  و  $E_2$  دو زیرمجموعه بسته از  $\hat{K}$  باشند و  $E = \overline{E_1 * E_2}$ . در این صورت برای هر  $x_1 \in M(\pi, E_1)$  و  $x_2 \in M(\pi, E_2)$  داریم  $x_1 x_2 \in M(\pi, E)$ .

**اثبات.** بنا بر مفروضات و قضیه ۸،

$$sp_\pi(x_1 x_2) \subseteq \overline{sp_\pi(x_1) * sp_\pi(x_2)} \subseteq \overline{E_1 * E_2} = E$$

در این صورت  $x_1 x_2 \in M(\pi, E)$ .

### مثال‌ها

در این بخش مثال‌هایی از ابرگروه‌ها را عرضه می‌کنیم که در شرایط قضیه ۸ صدق می‌کنند. در واقع نشان می‌دهیم که خاصیت  $(\alpha)$  برای گروه‌های موضعاً فشرده، ابرگروهی دو عضوی و نیز دسته‌ای مهم از ابرگروه‌های شمارا برقرار است.

**مثال ۱.** فرض کنید  $G$  یک گروه آبدی موضعاً فشرده باشد. در این صورت  $G$  با پیش استاندارد روی  $M(G)$  و نگاشت وارون به عنوان برگشت یک ابرگروه است. اینک نشان می‌دهیم  $G$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کند. فرض کنید  $E_1$  و  $E_2$  دو زیرمجموعه فشرده از  $\hat{G}$  باشند و  $f$  عضوی از  $L^1(G)$  چنان باشد که بر یک همسایگی از  $E_2 = E_1 * E_2$ ،  $\hat{f} \equiv 0$ . بنابراین یک همسایگی فشرده مانند  $V$  از  $I$  موجود است که  $\hat{f} \equiv 0$  بر  $E * V * V$ . با استفاده از لم ۲ می‌توان به‌ازای  $i = 1, 2$  عضو  $f_i$  از  $L^1(G)$  را چنان انتخاب کرد که روی همسایگی از  $E_i$   $\hat{f}_i \equiv 1$  و  $\text{supp}(\hat{f}_i) \subseteq E_i * V$  فرض کنید  $s_1, s_2 \in G$  و  $t \in \{s_1\} * \{s_2\} = \{s_1 s_2\}$ . در این صورت

$$\begin{aligned} \kappa(s_1, s_2, t) &= \kappa(s_1, s_2, s_1 s_2) = \int_G f(s) f_1(s_1 s^{-1}) f_2(s_1 s_2 s^{-1}) dm(s) \\ &= (f * (f_1 g))(s_1) \end{aligned}$$

که در آن  $g(s) = (f_2)_{s_2}(s) := f_2(s s_2)$ . اینک  $s_2$  را ثابت فرض می‌کنیم و تبدیل فوریه را برای متغیر  $s_1$  به‌دست می‌آوریم. در این صورت برای هر  $\xi \in \hat{G}$  داریم،  $(f * (f_1 g))^\wedge(\xi) = \hat{f}(\xi)(f_1 g)^\wedge(\xi)$ . از آن‌جاکه به‌ازای  $i = 1, 2$ ،  $\text{supp}(\hat{f}_i) \subseteq E_i * V$  داریم،  $\hat{f}_i \in C_c(\hat{G}) \subseteq L^2(\hat{G})$ . بنابراین برای هر  $\xi \in \hat{G}$  داریم

$$(f * (f_1 g))^\wedge(\xi) = \hat{f}(\xi)(f_1 g)^\wedge(\xi) = \hat{f}(\xi)(\hat{f}_1 * \hat{g})(\xi).$$

از آن‌جاکه  $\hat{g}(\xi) = \xi(s_2) \hat{f}_2(\xi)$ ،  $\text{supp}(\hat{f}_1 * \hat{g}) \subseteq \text{supp}(\hat{f}_1) * \text{supp}(\hat{g}) \subseteq E * V * V$ ، با توجه به این‌که بر  $E * V * V$ ،  $\hat{f} = 0$  برابر با صفر است برای هر  $\xi \in \hat{G}$  داریم  $(f * (f_1 g))^\wedge(\xi) = 0$ . بنابراین برای هر  $s_1, s_2 \in G$ ،  $-\kappa(s_1, s_2, s_1 s_2) = (f * (f_1 g))(s_1) = 0$ .

**مثال ۲.** فرض کنید  $K = \{e, a\}$  یک مجموعهٔ دو عضوی با توپولوژی گسسته، و  $\beta$  یک عدد حقیقی باشد به‌طوری که  $0 < \beta \leq 1$ . پیش و ابسته به  $\beta$  بر  $K$  را چنین تعریف می‌کنیم

$$\delta_e * \delta_e = \delta_e, \quad \delta_e * \delta_a = \delta_a, \quad \delta_a * \delta_e = \delta_a, \quad \delta_a * \delta_a = \beta \delta_e + (1 - \beta) \delta_a$$

در این صورت  $K$  یک ابرگروه هرمیتی با همانی  $e$  است. توجه کنید که  $K$  یک گروه است اگر و تنها اگر  $\beta = 1$  و  $m = \delta_e + \left(\frac{1}{\beta}\right) \delta_a$  یک اندازه هار بر  $K$  است.

$\hat{K} = \{1, \chi\}$  که در آن  $\chi(e) = 1$  و  $\chi(a) = -\beta$ . هم‌چنین  $\hat{K}$  یک ابرگروه گسسته و جابه‌جایی است و با  $K$  یک‌ریخت است [۷]. حال نشان می‌دهیم  $K$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کند.

فرض کنید  $E_1$  و  $E_2$  دو زیرمجموعه از  $\hat{K}$  باشند و  $E = E_1 * E_2$  و فرض کنید  $f$  عضوی از  $L^1(K)$  باشد که  $\hat{f}$  بر یک همسایگی از  $E$ ، صفر است.

ابتدا فرض می‌کنیم  $E_1 = \{1, \chi\}$  و  $E_2 \subseteq \hat{K}$  یا  $E_1 = E_2 = \{\chi\}$ . در هر دو حالت داریم  $E_1 * E_2 = \{1, \chi\} = \hat{K}$ . به‌ازای  $i = 1, 2$  فرض کنید  $f_i$  متعلق به  $L^1(K)$  چنان باشد که  $\hat{f}_i$  بر یک همسایگی

از  $E_i$  برابر 1 است. از آن‌جا که  $\hat{f}$  بر  $\hat{K}$  بر  $E_1 * E_2$  صفر است داریم  $f \equiv 0$ . در نتیجه برای هر  $s_1, s_2 \in K$  و  $\kappa(s_1, s_2, t) = 0, t \in \text{supp}(\delta_{s_1}, \delta_{s_2})$

فرض کنید  $E_1 = \{1\}$  و  $E_2 = \{\chi\}$  در این صورت  $E = E_1 * E_2 = \{\chi\}$ . قرار دهید  $f_1(e) := f_1(a) = \frac{\beta}{1+\beta}$  در این صورت  $\text{supp}(\hat{f}_1) = E_1$ . همچنین اگر  $f_2$  متعلق به  $L^1(K)$  را چنان انتخاب کنیم که  $f_2(e) := \frac{1}{1+\beta}$  و  $f_2(a) := \frac{-\beta}{\beta+1}$  داریم،  $\text{supp}(\hat{f}_2) = E_2$ . از آن‌جا که  $\hat{f}(\chi) = \int f \bar{\chi} dm = f(e) - f(a) = 0$  نتیجه می‌شود  $f(e) = f(a)$ . فرض کنید  $s_1 = s_2 = a$  و  $t \in \text{supp}(\delta_a * \delta_a) = \{e, a\}$  برای  $t = e$  داریم

$$\begin{aligned} \kappa(s_1, s_2, e) &= \kappa(a, a, e) \\ &= \int_K f(s) f_1(s_1 * s^-) f_2(t * s^-) dm(s) \\ &= \int_K f(s) f_1(a * s^-) f_2(e * s^-) dm(s) \\ &= f(e) f_1(a) f_2(e) m(e) + f(a) f_1(a * a) f_2(a) m(a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= f(e) f_1(a) f_2(e) m(e) + f(a) [\beta f_1(e) + (1 - \beta) f_1(a)] f_2(a) m(a) \\ &= f(e) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{1}{1+\beta} + f(a) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{-\beta}{1+\beta} \times \frac{1}{\beta} = 0 \end{aligned}$$

و برای  $t = a$  داریم

$$\begin{aligned} \kappa(s_1, s_2, t) &= \kappa(a, a, a) \\ &= \int_K f(s) f_1(s_1 * s^-) f_2(t * s^-) dm(s) \\ &= \int_K f(s) f_1(a * s^-) f_2(a * s^-) dm(s) \\ &= f(e) f_1(a) f_2(a) m(e) + f(a) f_1(a * a) f_2(a * a) m(a) \\ &= f(e) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{-\beta}{1+\beta} + f(a) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{\beta^2}{1+\beta} \times \frac{1}{\beta} = 0. \end{aligned}$$

به‌طور مشابه اگر  $s_1 = a$  و  $s_2 = e$  و  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2}) = \{a\}$  و یا  $s_1 = s_2 = e$  و  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2}) = \{e\}$  داریم

$$\kappa(s_1, s_2, t) = 0, t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2}) = \{e\}$$

در آخر فرض کنید  $E_1 = E_2 = \{1\}$ . در این صورت  $E = E_1 * E_2 = \{1\}$ . از آن‌جا که  $\hat{f}$  روی  $E = \{1\}$  صفر است داریم  $\hat{f}(1) = \int f(x) dm(x) = f(e) + \frac{1}{\beta} f(a) = 0$  و بنابراین  $f(a) = -\beta f(e)$  برای  $i = 1, 2$ .

قرار می‌دهیم  $f_i(e) = f_i(a) := \frac{\beta}{1+\beta}$  در این صورت  $\hat{f}_i(1) = 1$  و  $\hat{f}_i(\chi) = 0$  به عبارت دیگر به‌زای  $i = 1, 2$ ،  $\text{supp}(\hat{f}_i) = E_i$

فرض کنید  $s_1 = s_2 = a$  و  $t \in \text{supp}(\delta_a * \delta_a) = \{e, a\}$  برای  $t = e$  داریم



$$\begin{aligned} \kappa(s_1, s_2, t) &= \kappa(a, a, e) = \int_K f(s) f_1(s_1 * s^-) f_2(t * s^-) dm(s) \\ &= \int_K f(s) f_1(a * s^-) f_2(s^-) dm(s) \\ &= f(e) f_1(a) f_2(e) m(e) + f(a) f_1(a * a) f_2(a) m(a) \\ &= f(e) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{\beta}{1+\beta} + f(a) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{1}{\beta} = 0. \end{aligned}$$

برای  $t = a$  داریم

$$\begin{aligned} \kappa(s_1, s_2, t) &= \kappa(a, a, a) = \int_K f(s) f_1(s_1 * s^-) f_2(t * s^-) dm(s) \\ &= \int_K f(s) f_1(a * s^-) f_2(a * s^-) dm(s) \\ &= f(e) f_1(a) f_2(a) m(e) + f(a) f_1(a * a) f_2(a * a) m(a) \\ &= f(e) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{\beta}{1+\beta} + f(a) \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{\beta}{1+\beta} \times \frac{1}{\beta} = 0. \end{aligned}$$

به راحتی می‌توان دید که برای  $s_1 = a$  و  $s_2 = e$  و  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2}) = \{a\}$  و یا  $s_1 = s_2 = \{e\}$  و

$$\kappa(s_1, s_2, t) = 0 \quad t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2}) = \{e\}$$

**مثال ۳.** فرض کنید  $\mathbf{Z}_+^\infty$  فشرده سازی تک نقطه‌ای  $\{0, 1, 2, \dots\}$  و  $p$  یک عدد اول باشد. برای هر

$m, n \in \mathbf{Z}_+$ ، پیچش  $\delta_m$  و  $\delta_n$  را چنین تعریف می‌کنیم:

$$\delta_m * \delta_n := \begin{cases} \delta_{\min(n,m)} & n \neq m \\ \frac{p-2}{p-1} \delta_n + \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{1}{p^{k-n}} \delta_k & n = m \end{cases}$$

هم‌چنین برای هر  $m \in \mathbf{Z}_+$  تعریف می‌کنیم:

$$\delta_m * \delta_\infty = \delta_\infty * \delta_m := \delta_m$$

در این صورت  $\mathbf{Z}_+^\infty$  یک ابرگروه هرمیتی با همانی  $\infty$  اندازه است.

$$m(\{k\}) = \begin{cases} \left(\frac{1}{p}\right)^k \left(1 - \frac{1}{p}\right) & k = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & k = \infty \end{cases}$$

یک اندازه هار بر  $\mathbf{Z}_+^\infty$  است. دوگان  $\mathbf{Z}_+^\infty$  برابر با مجموعه  $\{\chi_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$  است که برای  $n = 0, 1, 2, \dots$

تابع  $\chi_n$  روی  $\mathbf{Z}_n^\infty$  را چنین تعریف می‌کنیم:

$$\chi_n(m) := \begin{cases} 1 & m \geq n \text{ or } m = \infty \\ \frac{-1}{p-1} & m = n-1 \\ 0 & m \leq n-2 \end{cases}$$

مجموعه  $\{\chi_n : n = 0, 1, 2, \dots\}$  کاراکترهای روی  $\mathbf{Z}_n^\infty$  هستند و در واقع  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty \cong \mathbf{Z}_+$  که  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$  دوگان  $\mathbf{Z}_+^\infty$

است. پیچش روی  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$  چنین تعریف می‌شود:

$$\delta_{\chi_n} * \delta_{\chi_m} := \begin{cases} \delta_{\chi_{\max(n,m)}} & n \neq m \\ \frac{1}{p^{n-1}(p-1)} \delta_{\chi_0} + \sum_{k=1}^{n-1} p^{k-n} \delta_{\chi_k} + \frac{p-2}{p-1} \delta_{\chi_n} & n = m \end{cases}$$

و  $\mathbf{Z}_+$  با این پیش یک ابرگروه هرمیتی با همانی  $\chi_0 = 1$  است. برای جزئیات بیشتر به [۵] مراجعه شود. اینک نشان می‌دهیم  $\mathbf{Z}_+^\infty$  در خاصیت  $(\alpha)$  صدق می‌کند.

فرض کنید  $E_1$  و  $E_2$  دو زیرمجموعه فشرده از  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty \cong \mathbf{Z}_+$  باشند،  $f \in L^1(\mathbf{Z}_+^\infty)$  و  $\hat{f}$  بر یک همسایگی از  $E = E_1 * E_2$  برابر با صفر باشد. با استفاده از لم ۲ عناصری در  $L^1(K)$  مانند  $h$  و  $g$  وجود دارند به طوری که  $\hat{g} \equiv 1$  روی  $E_1$ ، و  $\text{supp}(\hat{g}) \subseteq E_1$  و همچنین  $\hat{h} \equiv 1$  روی  $E_2$  و  $\text{supp}(\hat{h}) \subseteq E_2$ . فرض کنید  $s_1, s_2 \in \mathbf{Z}_+^\infty$  و  $t \in \text{supp}(\delta_{s_1} * \delta_{s_2})$  در این صورت

$$\kappa(s_1, s_2, t) = \int_{\mathbf{Z}_+^\infty} f(s) g(s_1 * s^-) h(t * s^-) dm(s) = ((f \cdot g_{s_1}^-) * h)(t).$$

از آن جاکه  $\mathbf{Z}_+^\infty$  هرمیتی است داریم،  $\kappa(s_1, s_2, t) = ((f \cdot g_{s_1}) * h)(t)$ . با ثابت در نظر گرفتن  $s_1$  و  $s_2$  از  $\mathbf{Z}_+^\infty$  برای هر  $\xi \in \hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$  داریم،  $((f \cdot g_{s_1}) * h)(\xi) = (f \cdot g_{s_1})(\xi) \hat{h}(\xi)$ . از آن جاکه  $f \cdot g_{s_1} \in L^1(\mathbf{Z}_+^\infty)$  و  $\text{supp}(\hat{g}_{s_1}) \subseteq \text{supp}(\hat{g})$

$$\begin{aligned} \text{supp}(f \cdot g_{s_1}) &= \text{supp}(\hat{f} * \hat{g}_{s_1}) \\ &\subseteq \text{supp}(\hat{f}) * \text{supp}(\hat{g}_{s_1}) \\ &\subseteq \text{supp}(\hat{f}) * \text{supp}(\hat{g}) \\ &\subseteq (E_1 * E_2)^c * E_1 \end{aligned}$$

در ادامه نشان می‌دهیم  $((E_1 * E_2)^c * E_1) \cap E_2 = \emptyset$ . در این صورت به‌ازای هر  $\xi \in \hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$   $((f \cdot g_{s_1}) * h)(\xi) = 0$  و در نتیجه به‌ازای هر  $s_1, s_2 \in \mathbf{Z}_+^\infty$   $\kappa(s_1, s_2, t) = 0$

از آن جاکه  $E_1$  و  $E_2$  دو زیرمجموعه فشرده از فضای گسسته  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$  هستند می‌توانیم فرض کنیم  $E_1 = \{\chi_{t_1}, \chi_{t_2}, \dots, \chi_{t_n}\}$  و  $E_2 = \{\chi_{r_1}, \chi_{r_2}, \dots, \chi_{r_m}\}$  که در آن به‌ازای هر  $1 \leq i \leq n$  و  $1 \leq j \leq m$   $r_j < r_{j+1}$  و  $t_i < t_{i+1}$ ،  $t_i, r_j \in \mathbf{Z}_+$

حالت اول:  $E_1 \cap E_2 = \emptyset$ . فرض کنید  $t_1 < r_1$ . پس به‌ازای هر  $1 \leq j \leq m$ ،  $\{\chi_{t_1}\} * \{\chi_{r_j}\} = \{\chi_{r_j}\}$ . بنابراین  $E_2 \subseteq E_1 * E_2$  و  $\{\chi_{t_1}\} * E_2 = E_2$ . فرض کنید به‌ازای  $j$  داشته باشیم:

$$\chi_{r_j} \in E_2 \cap ((E_1 * E_2)^c * E_1),$$

از آن جاکه  $(E_1 * E_2)^c \cap E_2 = \emptyset$  و نیز  $E_1 \cap E_2 = \emptyset$ . با توجه به تعریف پیش بر  $\hat{\mathbf{Z}}_+^\infty$ ، عضوی از  $(E_1 * E_2)^c \cap E_2$  مانند  $\chi_{r_j}$  موجود است که  $r_j \leq t_i$ . در این صورت  $\chi_{r_j} \in \{\chi_{t_i}\} * \{\chi_{r_j}\} \subseteq E_1 * (E_1 * E_2)^c$



7. Jewett R. I., "Spaces with an abstract convolution of measures", *Adv. in Math.* 18 (1975) 1-101.
8. Li B. R., "Introduction to Operator Algebras", World scientific, Hong Kong, London, New Jersey, Singapore(1992).
9. Medghalchi A. R., Tabatabaie S. M., "Spectral subspaces on hypergroup algebras", *Publ. Math. Debrecen*, 74 (2009) 307-320.
10. Ross K. A., "Centers of hypergroups", *Trans. Amer. Math. Soc.*, 243 (1978) 251-269.
11. Spector R., "Apercu de la theorie des hypergroups", In: *Analyse Harmonique sur les Groups de Lie*, 643–673, *Lec. Notes Math. Ser.*, 497, Springer (1975).
12. Spector R., "Measure invariante sur les hypergroups", *Trans. Amer. Math. Soc.*, 239 (1978) 147-165.