

## مباحثی روی بستر راتلیف-راش یک ایده ال

امیر مافی؛ دانشگاه کردستان، دانشکده علوم پایه، گروه ریاضی

سید شهاب ارکیان؛ دانشگاه فرهنگیان استان کردستان

پذیرش ۹۷/۰۶/۲۶

دریافت ۹۷/۰۲/۲۱

### چکیده

بستار راتلیف-راش ایده‌ال نا صفر  $I$ ، در حلقه جابه‌جایی، یک‌دار و نوتری  $R$ ، به صورت  $\tilde{I} = \bigcup_{n=1}^{\infty} (I^n :_R I^{n-1})$  است. در این مقاله، ویژگی‌های بستار راتلیف-راش یک ایده‌ال را با بستار صحیح آن مقایسه شده است. به علاوه ایده‌ال‌هایی، مانند  $I$  که عمق حلقه مدرج وابسته به آن مثبت است، را به عنوان ایده‌ال‌هایی که تمام توان‌های آن راتلیف-راش است (ایده‌ال با بستار راتلیف-راش خود برابر است)، معرفی شده است. ضمن بیان این‌که هر ایده‌ال منظم یک تقلیل بستار راتلیف-راش خودش است، دستوری برای محاسبه بستار راتلیف-راش یک ایده‌ال از روی یک تقلیل آن ارائه شده است. این حقیقت که چند جمله‌ای هیلبرت یک ایده‌ال با چند جمله‌ای بستار راتلیف-راش آن یک‌سان است، از دیگر نتایج است.

واژه‌های کلیدی: بستار راتلیف-راش، بستار صحیح، چند جمله‌ای هیلبرت، عدد تقلیل

### مقدمه

در سراسر این بحث، منظور از حلقه، حلقه جابه‌جایی، یک‌دار و نوتری است. فرض کنید  $R$  یک حلقه و  $I$  یک ایده‌ال منظم  $R$  باشد ( $I$  شامل یک عنصر  $R$ ، که مقسوم علیه صفر نیست، است). در این صورت برای ایده‌ال‌هایی به صورت  $(I^n :_R I^{n-1}) = \{x \in R \mid xI^{n-1} \subseteq I^n\}$ ، برای هر  $n \in \mathbb{N}$  داریم:  $(I^n :_R I^{n-1}) \subseteq (I^{n+1} :_R I^n)$ . فرض کنید  $\tilde{I} = \bigcup_{n=1}^{\infty} (I^n :_R I^{n-1})$ . نخستین بار راتلیف<sup>۱</sup> و راش<sup>۲</sup>  $\tilde{I}$  را بررسی کردند [۱۵]. آن‌ها ثابت کردند  $\tilde{I}$  بزرگ‌ترین ایده‌ال یکتای  $R$  است که برای  $k \ll 0$  داریم  $(\tilde{I})^k = I^k$ ، [۱۵]، قضیه ۲،۱). از این رو  $\tilde{\tilde{I}} = \tilde{I}$ . ایده‌ال منظم  $I$  را که  $\tilde{I} = I$  ایده‌ال راتلیف-راش گفته،  $\tilde{I}$  را ایده‌ال راتلیف-راش  $I$  یا بستار راتلیف-راش  $I$  گوئیم. در بخش نخست این مقاله، برخی از خواص بستار راتلیف-راش ایده‌ال‌ها بررسی می‌شود. از جمله، یک سری از تشابهات و تفاوت‌های بستارهای صحیح و راتلیف-راش را ارائه می‌شود. بخش دوم، به بررسی توسیع بستار راتلیف-راش یک ایده‌ال تحت هم‌ریختی حلقه‌ها اختصاص دارد. در ادامه، ارتباط بین تقلیل یک ایده‌ال و بستار راتلیف-راش آن را بیان می‌کنیم. هم‌چنین چند جمله‌ای‌های هیلبرت یک ایده‌ال را با چند جمله‌ای‌های هیلبرت بستار راتلیف-راش آن مقایسه کرده، حالتی را در نظر می‌گیریم که این دو با هم برابر هستند. در پایان حوزه‌های نوتری که همه ایده‌ال‌های آن‌ها راتلیف-راش است، معرفی می‌شود.

### برخی ویژگی‌های بستر راتلیف-راش

ابتدا توجه داریم که اگر  $I$  یک ایده‌ال منظم نباشد، آن‌گاه لزوماً  $\tilde{I}$  بزرگ‌ترین ایده‌ال یکتای  $R$  که برای  $R = F[x]/x^k$  و  $F$  یک متغیر روی میدان  $x$ ، اگر  $F$  یک میدان، به‌عنوان مثال،  $(\tilde{I})^k = I^k$ ،  $0 \ll k$  نیست. به‌عنوان مثال،  $I = xR$  منظم نیست و  $J = xR$  بزرگ‌ترین ایده‌ال یکتای  $R$  است که برای هر  $0 \ll k$ ،  $J^k = I^k$ ؛ اما  $\tilde{I} = R$  [۱۶]. از این‌رو، در ادامه، همواره فرض می‌کنیم  $I$  یک ایده‌ال منظم  $R$  است. کوچک‌ترین عدد صحیح مثبت  $k$  را که  $\tilde{I} = (I^{k+1} :_R I^k)$ ، عدد راتلیف-راش ایده‌ال  $I$  گفته، آن را با  $k(I)$  نشان می‌دهیم. البته، برای ما مشخص نیست که مقدار  $k(I)$  چقدر می‌تواند بزرگ باشد. هم‌چنین توجه داریم که تساوی  $(I^{n+1} :_R I^n) = (I^{n+2} :_R I^{n+2})$ ، گزاره  $(I^{n+1} :_R I^n) = (I^{n+2} :_R I^{n+2})$ ، را ایجاب نمی‌کند. به‌علاوه توجه داریم که اگر  $I$  یک ایده‌ال حلقه  $R$  باشد، آن‌گاه  $\tilde{I}^n = \bigcup_{k=1}^{\infty} (I^{n+k} :_R I^k)$  به‌سادگی می‌توان دید هر عنصر  $a \in (I^n :_R I^{n-1})$  روی  $I$  صحیح است. یعنی،  $k \in \mathbb{N}$  و عناصر  $b_i \in I^i$  برای  $i = 1, \dots, k$ ، چنان موجودند که  $a^k + b_1 + a^{k-1} + \dots + b_k = 0$ . پس  $\tilde{I}$  بین  $I$  و بستر صحیح  $I$ ،  $\tilde{I}$  است (بستر صحیح  $I$ ، عبارت است از مجموعه همه عناصر  $R$  که روی  $I$  صحیح هستند). بنابراین هر ایده‌ال به‌طور صحیح بسته، یک ایده‌ال راتلیف-راش است. از طرفی چون  $\tilde{I} \subseteq \sqrt{I}$ ، پس هر ایده‌ال رادیکال نیز یک ایده‌ال راتلیف-راش است. برای هر  $0 < n$  زنجیر زیر از ایده‌ال‌ها را داریم

$$I^n \subseteq (I^{n+1} :_R I) \subseteq (I^{n+2} :_R I^2) \subseteq \dots \subseteq (I^{n+k} :_R I^k) \subseteq \dots$$

این زنجیر ایستا است. از این‌رو عدد صحیح مثبتی مانند  $t$ ، وابسته به  $n$ ، چنان وجود دارد که برای هر  $t \leq k$ ،  $I^t \subseteq \tilde{I}^t = (I^{t+1} :_R I^t)$  و برای همه اعداد صحیح نامنفی  $i$  و  $j$  داریم  $I^i \subseteq \tilde{I}^i$  و  $\tilde{I}^i \tilde{I}^j \subseteq \widetilde{(I^{i+j})}$  و  $(I^{i+1}) \subseteq \tilde{I}^i$

مثال ۱ به‌خوبی نشان می‌دهد که الزاماً در حالت کلی، ایده‌ال‌های  $\tilde{I} \cdot \tilde{I}^m$  و  $\widetilde{I^{m+1}}$  یک‌سان نیستند.

مثال ۱. فرض کنید  $F$  یک میدان،  $x, y$  دو متغیر و  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی  $F$  و  $I = (x^4, x^3y, x^2y^2, y^4)$  باشد. در این صورت  $\tilde{I} = I$  و  $\tilde{I}^2 = I^2$  ولی  $\tilde{I}^3 = I^3$  در نتیجه  $\tilde{I}^3 \subset \tilde{I}^2$  (برای محاسبه ایده‌ال‌های راتلیف-راش از مکالی [۲]، استفاده کردیم).

ایده‌ال‌هایی، مانند آنچه در مثال ۲ آمده است، وجود دارند که تمام توان‌های بزرگ‌تر از یک آن‌ها راتلیف-راش است، بدون آن‌که خود راتلیف-راش باشد.

مثال ۲. فرض کنید  $F$  یک میدان،  $x, y$  دو متغیر و  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی  $F$  و  $I = (x^4, x^3y, xy^3, y^4)$  ایده‌ال  $R$  باشد. در این صورت چون  $I^2 = (x, y)^4$ ، پس

$$\tilde{I} = (x, y)^4 = (I, x^2y^2).$$

اما  $x^2y^2 \notin I$  بنابراین  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش نیست. در این مثال برای هر  $n \geq 2$ ، به‌طور آنتگرالی بسته است و بنابراین  $I^n$  ایده‌ال راتلیف-راش است.

مثال ۳ نشان می‌دهد که مفهوم بستر صحیح یک ایده‌ال و بستر راتلیف-راش آن ایده‌ال متفاوت است.

**مثال ۳.** فرض کنید  $F$  یک میدان،  $x, y$  دو متغیر و  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی  $F$  و  $I = (x^f, x^r y, x^r y^2, y^f)$  ایده‌ال  $R$  باشد. برای هر  $n \in \mathbb{N}$   $xy^r (y^f)^n \notin I^{n+1}$  پس  $xy^r \in (\bar{I} - \bar{I})$ . فرض کنید  $I, J$  دو ایده‌ال از حلقه  $R$  چنان باشند که  $I \subseteq J \subseteq \bar{I}$  در این صورت،  $\bar{J} = \bar{I}$  زیرا  $\bar{I}$  بزرگ‌ترین ایده‌ال یکتای  $R$  است که برای  $0 \ll k$   $\bar{I}^k = I^k$  است [۶]. اما در حالت کلی از رابطه  $I \subseteq J$  نمی‌توان نتیجه گرفت  $\bar{I} \subseteq \bar{J}$ .

**مثال ۴.** فرض کنید  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی میدان  $F$ ،  $I = (x^f, x^r y, xy^r, y^f)$  و  $J = (x^r, y^r)$  آن‌گاه  $I \subseteq J$ ، اما  $x^r y^r \in \bar{I} - \bar{J}$ . همچنین برای ایده‌ال دلخواه  $I$  از حلقه  $R$  با فرض  $m < n$  داریم  $\bar{I}^n \subseteq \bar{I}^m$ .

پرسش جالب در این مورد آن است که بدانیم تحت چه شرایطی با فرض  $I \subseteq J$  می‌توان نتیجه گرفت  $\bar{I} \subseteq \bar{J}$ . مثلاً در حالتی که  $J$  روی  $I$  صحیح باشد، حکم درست است. اکنون سوالی که ممکن است مطرح شود این است که آیا همه توان‌های یک ایده‌ال راتلیف-راش، راتلیف-راش است؟ مثال زیر به خوبی نشان می‌دهد که پاسخ این پرسش منفی است.

**مثال ۵.** فرض کنید  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی میدان  $F$ ،  $I$  ایده‌الی از  $R$  تولید شده به وسیله عناصر  $x^{22}, x^{14}y^8, x^{15}y^7, x^{18}y^4, x^{22}, x^{22}, x^{11}y^{11}, x^{14}y^8, x^{15}y^7, x^{18}y^4, x^{22}$  باشد. نشان می‌دهیم  $I$  راتلیف-راش است، اما  $I^2$  چنین نیست. به سادگی می‌توان دید، چون ایده‌ال تک جمله‌ای  $I^2$ ها به وسیله تک جمله‌ای‌های  $x^f y^f, x^y y^{37}, x^8 y^{26}, x^{14} y^{20}, x^{15} y^{29}, x^{18} y^{26}, x^{22} y^{22}, x^{12} y^{22}, x^{19} y^{25}, x^{11} y^{23}, x^{26} y^{18}, x^{21} y^{23}, x^{25} y^{19}, x^{29} y^{15}, x^{19}$

تولید می‌شود،  $x^{22} y^{22}$  در  $I^2$  نیست، اما حاصل ضرب آن در  $I$  مشمول در  $I^3$  است. از این رو،  $I^2$  راتلیف-راش نیست. برای اثبات راتلیف-راش بودن  $I$  کافی است ثابت کنیم هر تک جمله عضو  $\bar{I}$ ، در  $I$  است. چون  $I$  یک ایده‌ال  $(x, y)R$ -اولیه است، کافی است ثابت کنیم هر تک جمله‌ای عضو  $(I : (x, y)) \cap \bar{I}$  در  $I$  است. اما تنها تک جمله‌ای‌های موجود در  $(I : (x, y))$  عبارتند از:

$$x^r y^{21}, x^6 y^{17}, x^y y^{14}, x^{10} y^{13}, x^{13} y^{10}, x^{14} y^y, x^{17} y^6, x^{21} y^3.$$

باتوجه به تقارن موجود، کافی است نشان دهیم چهار جمله نخست در  $\bar{I}$  نیستند. اگر  $x^r y^{21} \in \bar{I}$  آن‌گاه برای عدد صحیح و مثبت  $n$ ،  $x^r y^{21} (y^{22})^n \in (y^{22})^{n+1}$  با بررسی درجه  $x$ ، این امر ایجاب می‌کند که  $x^r y^{21} (y^{22})^n \in (y^{22})^{n+1}$  که این یک تناقض است. همچنین، اگر  $x^6 y^{17} \in \bar{I}$  به طریق مشابه،  $x^6 y^{17} (y^{22})^n \in (x^f y^{18}, y^{22})^{n+1}$  بنابراین برای یک عدد صحیح و نامنفی  $a$  که  $n+1 \geq a$  داریم  $x^6 y^{17} (y^{22})^n \in (x^f y^{18})^a (y^{22})^{n+1-a}$  بدون آن‌که از کلیت مسئله بکاهیم، با حذف توان‌های  $y^{22}$  برای یک  $n$  داریم  $x^6 y^{17} (y^{22})^n \in (x^f y^{18})^{n+1}$  و این غیر ممکن است. به طریق

مشابه،  $x^y y^{14} \notin \tilde{I}$ . در غیر این صورت، برای برخی از اعداد صحیح و نامنفی  $a, n$  که  $a \leq n+1$  داریم  $x^y y^{14} (y^{22})^n \in (x^4 y^{18})^a (x^y y^{15})^{n+1-a}$  است. بالاخره  $x^{10} y^{13} \notin \tilde{I}$  زیرا در غیر این صورت برای یک  $n$  آن امکان پذیر نیست. بنابراین  $I$  راتلیف-راش است.

مثال قبل نشان می‌دهد بررسی راتلیف-راش بودن یک ایده‌ال تا چه اندازه می‌تواند دشوار باشد. در واقع، برخلاف بستر صحیح یک ایده‌ال، الگوریتمی برای محاسبه بستر راتلیف-راش یک ایده‌ال در دست نیست. در مثال قبل  $I$  یک ایده‌ال به طور صحیح بسته نیست. هینزر<sup>۱</sup> و همکارانش در ایده‌الی تک جمله‌ای ارائه کرده‌اند که راتلیف-راش است، اما توان سوم آن راتلیف-راش نیست [۵]. مثال آن‌ها الهام بخش ساختار ایده‌ال‌های راتلیف-راش تک جمله‌ای زیر،  $I_n$ ، روی حلقه چند جمله‌ای  $R = F[x, y]$  است که  $(I_n)^n$  راتلیف-راش نیست.

مثال ۶. فرض کنید  $I_n = (x^{3n-1}, x^{2n-4} y^3, x^3 y^{3n-4}, y^{3n-1})$  که در آن  $3 \leq n$  یک عدد صحیح فرد است. ثابت می‌کنیم  $(I_n)^n$  راتلیف-راش نیست. در واقع  $(xy)^{n(3n-1)/2} \in \overline{(I_n)^n}$  اما  $(xy)^{n(3n-1)/2} \notin (I_n)^n$ .

برای اثبات تعلق کافی است ثابت کنیم برای عدد صحیح و مثبت  $m \in \mathbb{N}$   $(xy)^{n(3n-1)/2} (x^{3n-1})^{2m-1} \in (I_n)^{n+2m-1}$  چنان باشد که  $n = 2m + 1$  در این صورت

$$\begin{aligned} (xy)^{n(3n-1)/2} (x^{3n-1})^{2m-1} &= (xy)^{\epsilon m^2 + \delta m + 1} x^{12m^2 - 2m - 2} \\ &= (x^{18m^2 + 2m - 1} y^{9m + 3}) (y^{\epsilon m^2 - 4m - 2}) \\ &= (x^{(\epsilon m - 1)(3m + 1)} y^{3(3m + 1)}) \cdot (y^{(\epsilon m + 2)(m - 1)}) \\ &= (x^{3n-4} y^3)^{3m+1} (y^{3n-1})^{m-1} \in (I_n)^{3m} = (I_n)^{n+2m-1}. \end{aligned}$$

حال نشان می‌دهیم که  $(xy)^{n(3n-1)/2} \notin I_n^n$ . در غیر این صورت اعداد صحیح نامنفی  $d, c, b, a$  چنان موجودند که  $a + b + c + d = n$  و  $(xy)^{n(3n-1)/2} = (x^{3n-1})^a (x^{3n-4} y^3)^b (x^3 y^{3n-4})^c (y^{3n-1})^d$  با جای‌گزینی  $n = 2m + 1$  تساوی زیر برای توان‌های  $x$  به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} (3m + 1)(2m + 1) &= a(\epsilon m + 2) + b(\epsilon m - 1) + 3c \\ &= 2a(3m + 1) + 2b(3m + 1) + 3(c - b). \end{aligned}$$

از این رو،  $(3m+1)(2m+1-2a-2b) = 3(c-b)$  از این رو  $c-b$  مضربی از  $3m+1$ ، که این هم تنها به شرطی برقرار است که  $c=b$ . لذا  $2m+1-2a-2b=0$ . اما این معادله آخر جواب صحیح ندارد.

در نهایت مثال‌هایی از ایده‌ال‌های  $I$  را بررسی می‌کنیم که همه توان‌های آن‌ها راتلیف-راش است. قبل از آن، مفهوم تقلیل<sup>۱</sup> یک ایده‌ال را یادآوری می‌کنیم.

**تعریف ۷.** (تقلیل یک ایده‌ال) فرض کنید  $J \subseteq I$  ایده‌ال‌هایی از حلقه  $R$  باشند  $J$  را تقلیل  $I$  گوئیم هرگاه عدد صحیح و نامنفی  $n$  چنان موجود باشد که  $I^{n+1} = JI^n$ . اگر  $J$  یک ایده‌ال اصلی باشد آن را تقلیل اصلی گوئیم. ایده‌ال  $I$  دارای تقلیل اصلی است هرگاه عنصر  $x \in I$  چنان موجود باشد که برای عددی صحیح چون  $n$ ، داشته باشیم،  $I^{n+1} = xI^n$ ، [۷]، صفحه ۵۰۴ را ببینید). تقلیل  $J$  از  $I$  را مینیمال گوئیم هرگاه  $I$  دارای تقلیلی که به‌طور اکید مشمول در  $J$  است، نباشد. فرض کنید  $I$  یک ایده‌ال از حلقه موضعی  $(R, M)$  و  $J$  یک تقلیل مینیمال  $I$  باشد. عدد  $r(I) = \min \{n \mid I^{n+1} = JI^n\}$  را  $r(I)$  با  $r(I)$  نشان داده، به‌صورت  $\{J \mid \text{مینیمال تقلیل یک ایده‌ال } I \text{ است} \mid r(I) = \min \{r_j(I)\}$  تعریف می‌کنیم.

**مثال ۸.** فرض کنید  $I$  یک ایده‌ال پایدار<sup>۲</sup> در حلقه نوتری  $R$  باشد، (ایده‌ال  $I$  را پایدار گوئیم هرگاه یک تقلیل اصلی داشته باشد و عدد تقلیل آن حداکثر یک باشد). در این صورت  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش است (برای هر عدد صحیح مثبت  $n$ ، اگر  $x \in (I^{n+1})_R I^n$ ؛ آنگاه  $xI^n \subseteq I^{n+1} = a^n I$  و چون  $a$  مقسوم غیرصفر است،  $x \in I$  چون مجموعه ایده‌ال‌های پایدار نسبت به ضرب بسته است (اگر  $I^\vee = aI$  و  $J^\vee = bJ$ ، آن‌گاه  $(IJ)^\vee = (ab)(IJ)$ ))، همه توان‌های  $I$  راتلیف-راش هستند. از طرف دیگر، اگر  $J$  یک تقلیل ایده‌ال از حلقه نوتری  $R$  چنان باشد که  $JI$  راتلیف-راش باشد، آن‌گاه عدد تقلیل  $I$  نسبت به  $J$  حداکثر یک است (اگر  $JI^n = I^{n+1}$ ، آن‌گاه برای هر  $k$ ،  $(JI)^{n+k} = (I^\vee)^{n+k}$ ،  $0 \leq k$ ، بنابراین  $(JI)^{n+k} = JI \subseteq I^\vee = \widetilde{JI}$ ). به‌ویژه اگر  $I$  دارای تقلیل ایده‌ال اصلی  $aR$  بوده،  $aI$  راتلیف-راش باشد، آن‌گاه  $I$  پایدار است و همه توان‌های  $I$  راتلیف-راش هستند.

**تعریف ۹.** (حلقه مدرج وابسته) فرض کنید  $I$  یک ایده‌ال سره حلقه نوتری  $R$  باشد. حلقه مدرج وابسته<sup>۳</sup> به  $I$  را با  $G(I)$  نشان داده، به‌صورت

$$G(I) = R/I \oplus I/I^\vee \oplus \dots \oplus I^n/I^{n+1} \oplus \dots$$

تعریف می‌کنیم. این حلقه به‌طور طبیعی به‌وسیله اعداد صحیح نامنفی مدرج می‌شود و به‌عنوان نقش هم‌ریخت حلقه ریس  $I$  یا توسعه حلقه ریس  $I$  بدین‌صورت در نظر گرفته می‌شود [۸]:

$$G(I) \cong R[It]/IR[It] \cong R[t^{-1}, It]/t^{-1}R[t^{-1}, It]$$

1. reduction  
2. stable  
3. associated graded ring

ایدهال مدرج مثبت  $G(I)_+$  از  $G(I)$  عبارت است از  $G(I)_+ = \bigoplus_{n \geq 1} I^n/I^{n+1}$ . هم‌چنین حلقه مدرج وابسته به  $R$  نسبت به صافی<sup>۱</sup> راتلیف-راش را با  $\overline{G(I)}$  نشان داده و بدین صورت تعریف می‌کنیم:

$$\overline{G(I)} := \bigoplus_{i \geq 0} (I^i/I^{i+1}).$$

یادآوری می‌کنیم که لزوماً عمق  $G(I)$  مثبت نیست، اما چنان‌که در ۵ می‌بینیم، همواره عمق  $\overline{G(I)}$  مثبت است. به‌علاوه برای هر  $0 \ll i$ ،  $(\overline{G(I)})_i = (G(I))_i$ .

راتلیف و راش در  $(2, 3, 1)$  ثابت کرده‌اند که همه توان‌های ایدهال  $I$  راتلیف-راش هستند اگر عمق  $G(I)$  مثبت باشد، یعنی  $G(I)_+$  شامل یک عنصر غیرمقسوم‌علیه صفر باشد [۵]. برعکس این گزاره نیز درست است (مراجعه به برهان ۱.۲ [۴]).

**ملاحظه ۱۰.** همه توان‌های ایدهال  $I$  راتلیف راش هستند اگر و تنها اگر عمق  $G(I)$  مثبت باشد. حتی کلی‌تر، از منظر کوهمولوژی موضعی  $G(I)$  نسبت به  $G(I)_+$  برای هر عدد صحیح  $n$

$$H_{G(I)_+}^0(G(I))_n = \widetilde{I^{n+1} \cap I^n / I^{n+1}}.$$

بنابراین  $I^{n+1}$  راتلیف-راش است اگر و تنها اگر  $H_{G(I)_+}^0(G(I))_n = 0$  هم‌چنین اگر  $I$  یک ایدهال تولید شده به‌وسیله یک رشته منظم (یا حتی در حالت کلی‌تر،  $I$  به‌وسیله یک رشته شبه‌منظم<sup>۲</sup> تولید شده باشد)، آن‌گاه چون  $G(I)$ ، یک حلقه چندجمله‌ای روی  $R/I$ ، با متغیرهایی که تصویر مولدهای  $I$  هستند، (یکریخت) است،  $I$  و همه توان‌های آن راتلیف-راش هستند؛ در واقع برای همه اعداد صحیح  $n, k$ ،  $I^{n+k} : I^k = I^n$ . به‌عنوان مثالی دیگر از ایدهال‌هایی که همه توان‌های آن‌ها راتلیف-راش است می‌توان حالتی را در نظر گرفت که ایدهال  $I$  از یک حلقه کوهن-مکالی<sup>۳</sup> به‌وسیله یک رشته منظم تولید شده باشد. از این‌رو، همه ایدهال‌های پارامتری از یک حلقه کوهن-مکالی راتلیف-راش هستند. فرض کوهن-مکالی بودن حلقه، اساسی است.

**مثال ۱۱.** زیرحلقه  $R = F[x, y^2, y^3, x^2y^5, x^3y]$  از حلقه چندجمله‌ای  $F[x, y]$  روی میدان  $F$  را در نظر بگیرید. در این صورت  $I = (x, y^2)R$  یک ایدهال اولیه برای یک ایدهال ماکسیمال  $R$  با ارتفاع<sup>۴</sup> دو است و هم‌چنین  $x^2y^5 \in (I^2 : I) - I$ . از این‌رو  $I$  راتلیف-راش نیست. در این صورت  $R$  کوهن-مکالی نیست، و  $x, y^2$  رشته منظم نیست. حلقه منظم موضعی  $F[x, y]_{(x, y)}$  یک توسعه صحیح متناهی حاصل از موضعی‌سازی  $R$  در ایدهال رادیکال  $I$  است. بنابراین تکمیل<sup>۵</sup> این موضعی‌سازی، حوزه است؛ و ویژگی‌های اساسی ذکر شده برای این مثال، پس از تکمیل نیز در آن حفظ می‌شود. بنابراین حتی در یک حوزه موضعی کامل از بعد دو، لزوماً یک ایدهال پارامتری راتلیف-راش نیست.

1. filtration  
2. quasi-regular  
3. Cohen-Macaulay  
4. height  
5. completion

به علاوه، هینزر و همکاران در (قضیه ۲.۲ و نتیجه ۲.۳ [۵]) ثابت کرده‌اند که اگر ایده‌ال غیرصفر  $I$  از یک حوزه موضعی کوهن-مکالی، ایده‌ال تقاطع تقریباً کامل<sup>۱</sup> باشد، الزاماً راتلیف-راش نیست. در مثال بعد یک ایده‌ال تقاطع کامل از یک حلقه چندجمله‌ای می‌بینیم که راتلیف-راش نیست.

**مثال ۱۲.** فرض کنید  $I = (xy^5, x^6 - y^6, x^4y^2 - x^2y^4)$  ایده‌الی از حلقه چندجمله‌ای  $F[x, y]$  باشد. در این صورت  $I$  یک ایده‌ال صفر بعدی ۳-مولدی است. از این رو،  $I$  یک ایده‌ال تقاطع تقریباً کامل است. توجه داریم که  $x^3y^4 \notin I$  اما  $x^3y^4 \in \tilde{I}$  بنابراین  $x^3y^4 \in \tilde{I}$ .

اما ایده‌ال‌های تک جمله‌ای تقاطع تقریباً کامل صفر بعدی دارای این ویژگی هستند که تمام توان‌های آن‌ها راتلیف-راش هستند.

**گزاره ۱۳.** (گزاره ۱.۹ [۱۶]) فرض کنید  $R$  حلقه چندجمله‌ای  $F[x_1, \dots, x_d]$  با  $d$  متغیر روی میدان  $F$  باشد. فرض کنید  $I$  یک ایده‌ال تک جمله‌ای صفر بعدی تولید شده به وسیله  $(d + 1)$  عنصر باشد. در این صورت حلقه مدرج وابسته به  $I$ ،  $G(I)$ ، عمق مثبت دارد. به ویژه، همه توان‌های  $I$  راتلیف-راش هستند. توجه داشته باشید این گزاره را نمی‌توان برای ایده‌ال‌های تک جمله‌ای صفر بعدی که تعداد عناصر مولد مینیمال آن، دو تا بیش‌تر از بعد حلقه چندجمله‌ای است تعمیم داد.

**مثال ۱۴.** فرض کنید  $I = (x^1, y^5, xy^4, x^4y)$ ، ایده‌الی تک جمله‌ای از حلقه چندجمله‌ای  $F[x, y]$  باشد. در این صورت  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش نیست. زیرا  $x^2y^3 \in (I^2;_R I)$  اما  $x^2y^3 \notin I$ .

### بستار راتلیف-راش در تغییر حلقه

**گزاره ۱.** فرض کنید  $R$  و  $S$  حلقه‌های نوتری باشد. به وسیله همریختی  $f: R \rightarrow S$ ،  $S$  را به عنوان یک  $R$ -جبر در نظر بگیرید. فرض کنید  $I$  یک ایده‌ال منظم از حلقه  $R$  چنان باشد که  $IS$  راتلیف-راش از حلقه  $S$  و  $I = f^{-1}(IS)$  باشد. در این صورت  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش از حلقه  $R$  است. به ویژه، اگر  $f: R \rightarrow S$  پوشا باشد، آن‌گاه نگاره وارون<sup>۲</sup> هر ایده‌ال راتلیف-راش حلقه  $S$  در  $R$  که منظم باشد، راتلیف-راش است. مثال ۲ نشان می‌دهد که فرض پوشا بودن در این گزاره، اساسی است.

**مثال ۲.** فرض کنید  $R = F[[t^4, t^5]]$  و  $S = R[t^6]$  که در آن  $t$  یک متغیر روی میدان  $F$  است. به علاوه فرض کنید  $J = t^{11}S$ . در این صورت  $J$  یک ایده‌ال راتلیف-راش از حلقه  $S$  است، اما  $I = J \cap R = (t^{15}, t^{16}, t^{17})R$  راتلیف-راش نیست زیرا  $t^{18} \in R - I$  و  $I^2 = (I + t^{18}R)^2$ .

**نتیجه ۳.** فرض کنید  $R, S$  و  $f$  مانند ۱.۳ تعریف شده باشند. در این صورت برای هر ایده‌ال منظم  $I$  از  $R$ ،  $\tilde{I}S = \tilde{I} \cap S$  زیرا  $(IS)^n = (I^{n+1};_R I^n)S$  (۱۳)، قضیه ۷.۴، صفحه ۴۸). (به ویژه اگر  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش باشد، آن‌گاه  $IS$  نیز چنین خواهد بود. در نتیجه  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش است اگر و تنها اگر

1. almost complete intersection  
2. preimage

برای هر ایده‌ال اول یا هر ایده‌ال ماکسیمال  $P$  از حلقهٔ  $R$ ،  $IR_P$  راتلیف-راش باشد ([۱۲]، گزارهٔ ۳، ۱۳، صفحهٔ ۷۰) و ([۱]، گزارهٔ ۳، ۸، صفحهٔ ۴۰). حال فرض کنید  $S$  روی  $R$  یک دست باوفا<sup>۱</sup> باشد، (بنابراین  $f$  می‌تواند تابع شمول باشد)؛ در این صورت برای هر ایده‌ال منظم  $I$  از  $R$ ،  $\tilde{I}S = \tilde{I}S$  و  $IS$  یک ایده‌ال راتلیف-راش  $S$  است اگر و تنها اگر  $I$  یک ایده‌ال راتلیف-راش  $R$  باشد، زیرا فرض یک دست باوفا ایجاب می‌کند، که انقباض<sup>۲</sup> توسعه<sup>۳</sup> هر ایده‌ال  $R$  در  $S$ ، با خود آن ایده‌ال برابر باشد.

### تقلیل<sup>۴</sup> ایده‌ال و بستار راتلیف-راش

مفهوم تقلیل ایده‌ال، بین یک ایده‌ال و بستار راتلیف-راش آن ارتباط برقرار می‌کند. در این مورد ما از نتایج نورثکات<sup>۵</sup> و ریس<sup>۶</sup> استفاده می‌کنیم [۱۴]. در حلقهٔ موضعی  $(R, M)$  ایده‌ال  $J$  یک تقلیل ایده‌ال  $I$  است هرگاه  $J \subseteq I$  و  $J + MI$  یک تقلیل  $I$  باشد. اگر  $J$  یک تقلیل ایده‌ال  $I$  باشد، آن‌گاه  $I$  روی  $J$  صحیح است، و حلقه‌های ریس  $R[Jt] \subseteq R[It]$  دارای این ویژگی هستند که  $R[It]$  به‌عنوان یک توسعه حلقه  $R[Jt]$  صحیح است. هر ایده‌ال منظم یک تقلیل بستار راتلیف-راش خودش است. اما در حالت کلی این شرط روی ایده‌ال‌های  $I \subseteq J$  که  $\tilde{J} = \tilde{I}$  به معنی آن است که برای هر  $n$ ،  $0 \ll n$ ،  $J^n = I^n$  و این قوی‌تر از آن است که بگوییم ایده‌ال  $J$  یک تقلیل ایده‌ال  $I$  است. برای دریافت توضیحات بیش‌تر در این ارتباط به [۹] مراجعه کنید.

مثال ۱. فرض کنید  $F$  یک میدان،  $x, y$  دو متغیر و  $R = F[x, y]$  حلقه چندجمله‌ای روی میدان  $F$  و  $J = (x^2, y^2)R$  باشد. در این صورت  $J$  یک تقلیل  $I = (x^2, xy, y^2)R$  است. اما  $\tilde{J} = J \subset I = \tilde{I}$  در ادامه به بیان تبصره‌ای که یک روش نسبتاً ساده‌تر برای محاسبهٔ بستار راتلیف-راش یک ایده‌ال در اختیار ما قرار می‌دهد، می‌پردازیم.

ملاحظه ۲. اگر  $J = (a_1, \dots, a_d)$  یک تقلیل ایده‌ال  $I$  باشد [۱۵]، آن‌گاه

$$\tilde{J}^n = \bigcup_{k=1}^{\infty} \left( I^{n+k} :_R (a_1^k, \dots, a_d^k) \right).$$

گزارهٔ ۳ به‌خوبی ارتباط بین عدد تقلیل و عدد راتلیف-راش را برای یک ایده‌ال نشان می‌دهد. برهان آن را می‌توانید در ([۲] گزاره ۲، ۱) ببینید.

گزارهٔ ۳. فرض کنید  $R$  یک حلقه نوتری و  $I$  یک ایده‌ال منظم  $R$  باشد که یک تقلیل آن، ایده‌ال اصلی است. فرض کنید  $k(I)$  عدد راتلیف-راش  $I$  و  $r$  عدد تقلیل  $I$  باشد. در این صورت  $k(I) \leq \max\{0, r - 1\}$ . اکنون به این سؤال برمی‌گردیم که فراوانی ایده‌ال‌های راتلیف-راش چقدر است. توجه داریم که اگر عدد تقلیل ایده‌ال  $M$ -اولیه  $I$  از حلقه کوهن-مکالی  $(R, M)$ ، حداکثر یک باشد، آن‌گاه  $G(I)$  کوهن-مکالی است [۱۹]. بنابراین همهٔ توان‌های این ایده‌ال راتلیف-راش است.

1. faithfully flat  
2. contraction  
3. extension  
4. reduction  
5. Northcott  
6. Rees

## ایدهال‌های راتلیف-راش و چند جمله‌ای‌های هیلبرت

فرض کنید  $(R, M)$  یک حلقه موضعی و  $I$  یک ایدهال  $M$ -اولیه باشد در این صورت برای  $n \ll 0$ ، طول<sup>۱</sup>  $\lambda(R/I^n)$  یک چندجمله‌ای برحسب  $n$  از درجه بعد  $R$  است، ما آن را چندجمله‌ای هیلبرت  $I$  می‌گوییم و آن را با  $H_I$  نشان می‌دهیم. هم‌چنین ضریب جمله پیش‌رو  $H_I$  را چندگانگی<sup>۲</sup>  $I$  می‌گوییم و آن را با  $e_0(I)$  نشان می‌دهیم. حال سؤالی که ممکن است مطرح شود آن است که اگر ایدهال  $M$ -اولیه  $I$  از حلقه موضعی  $(R, M)$  راتلیف-راش باشد، آیا برای هر عدد صحیح مثبت  $n$ ،  $\lambda(R/I^n)$  توسط چندجمله‌ای هیلبرت  $I$  تولید می‌شود؟ پاسخ این پرسش منفی است. به‌عنوان مثال: فرض کنید  $F$  یک میدان،  $(R, M)$  زیر حلقه  $R = F[[t^3, t^4]]$  از حلقه سری‌های توانی سمبلیک  $F[[t]]$ ، باشد. در این صورت  $M$  و حتی تمام توان‌های آن راتلیف-راش است، اما چندجمله‌ای هیلبرت  $M$ ،  $P_M(n) = 3n - 3$  در شرط  $P_M(1) = \lambda(R/I) = 0$  صدق نمی‌کند. ولی عکس این گزاره درست است یعنی اگر  $I$  یک ایدهال  $M$ -اولیه از حلقه موضعی  $(R, M)$  چنان باشد که برای هر عدد صحیح مثبت  $n$ ،  $\lambda(R/I^n) = P_I(n)$ ، می‌دانیم اگر  $I$  یک ایدهال  $M$ -اولیه از حلقه موضعی کوهن-مکالی یک بعدی  $(R, M)$  باشد، آن‌گاه  $I$  یک ایدهال پایدار است. بنابراین طبق ([۱۱]، نتیجه ۱،۶) همه توان‌های آن راتلیف-راش است. در ([۱۸]، بخش ۵) مثالی را می‌توان یافت که نشان می‌دهد این گزاره در حالتی که حلقه، منظم موضعی از بعد دو باشد، درست نیست.

بستار صحیح  $I, \bar{I}$  بزرگ‌ترین ایدهالی است که  $I$  تقلیل آن است. چند جمله‌ای‌های  $H_I$  و  $H_{\bar{I}}$  چندگانگی یک‌سان دارند. اما چند جمله‌ای‌های  $H_I$  و  $H_{\bar{I}}$  مساوی هستند؛ یعنی همه ضرایب آن‌ها برابر هستند. در واقع  $\bar{I}$  بزرگ‌ترین ایدهالی از حلقه  $R$  است که چندجمله‌ای هیلبرت آن با چندجمله‌ای هیلبرت  $I$  مساوی است.

مثال ۱. فرض کنید  $F$  یک میدان،  $R$  زیر حلقه  $R = F[[t^3, t^4, t^5]]$  از حلقه سری‌های توانی سمبلیک  $F[[t]]$ ،  $I = (t^3, t^4)R$  و  $J = t^3R$  باشد. در این صورت  $I$  به‌طور اکید مشمول در  $M = (t^3, t^4, t^5)R$  است و چون  $I^3 = M^3$ ،  $\bar{I} = M$  داریم  $P_I(n) = P_M(n) = 3n - 2$ . از طرف دیگر، برای تقلیل  $J$  از  $I$  و  $M$  داریم  $P_J(n) = 3n$ .

عناصر سطحی<sup>۳</sup> نقش مهمی در ارتباط با بستار راتلیف-راش بازی می‌کنند. عنصر  $x \in R$  را یک عنصر سطحی از مرتبه  $s$  برای  $I$  می‌گوییم هرگاه  $x \in I^s$  و عدد صحیح  $c$  چنان وجود داشته باشد که برای هر  $c < n$ ،  $(I^n : Rx) \cap I^c = I^{n-c}$  می‌دانیم اگر  $R$  میدان خارج قسمتی نامتناهی داشته باشد، عناصر سطحی موجودند. به‌علاوه، اگر  $R$  دارای عمق مثبت باشد، آن‌گاه هر عنصر سطحی برای  $I$ ، یک عنصر منظم در  $R$  است. چندجمله‌ای هیلبرت حلقه مدرج وابسته  $\overline{G(I)}$  نسبت به صافی راتلیف-راش را با  $\overline{H_I}(t)$  نشان داده، به‌صورت  $\overline{H_I}(t) := \lambda_{R/\bar{I}}((G(I))_t) = \lambda(\bar{I}^t / \bar{I}^{t+1})$  تعریف می‌کنیم.

ملاحظه ۲. اگر  $x$  یک عنصر سطحی برای  $I$  چنان باشد که مقسوم‌علیه صفر نیست، آن‌گاه با استفاده از لم ارتین-ریس<sup>۴</sup>، برای هر  $j \ll 0$  داریم  $I^j : x = I^{j-1}$ . از این‌رو به سادگی می‌توان دید برای هر  $i \ll 0$ ،  $I^i = \bar{I}^i$ .

1. length  
2. multiplicity  
3. superficial  
4. Artin-Rees Lemma

بالاخره، برای هر  $0 \leq n$ ، داریم  $x = \bar{I}^n$ :  $I^{n+1}$  از این رو عمق  $\bar{G}(I)$  مثبت است.

قضیه ۲. فرض کنید  $(R, M)$  یک حلقه کوهن-مکالی موضعی از بعد یک،  $I$  یک ایده‌ال  $M$ -اولیه از  $R$ ،  $t$  یک عدد صحیح نامنفی و  $x$  یک عنصر سطحی برای  $I$  باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

$$1. \quad \bar{H}_I(t) = \bar{H}_I(t+1)$$

$$2. \quad \lambda \left( I\bar{I}^t + \bar{I}^{t+2}/x\bar{I}^t + \bar{I}^{t+2} \right) = 0$$

$$3. \quad \bar{H}_I(t) = e_0(I)$$

$$4. \quad \bar{H}_I(n) = e_0(I) \quad t \leq n$$

برای مشاهده برهان، ([۱۷]، قضیه (۲،۱) را ببینید.

### حوزه‌های نوتری که همه ایده‌ال‌های غیر صفر آن‌ها راتلیف-راش هستند

راتلیف و راش در ([۱۵]، نتیجه (۲،۴) ثابت کرده‌اند که هر ایده‌ال غیر صفر در یک حوزه ددکیند<sup>۱</sup> راتلیف-راش است. هم‌چنین در ([۱۵]، تبصره (۲،۵) آن‌ها ابراز علاقه کرده‌اند که حوزه‌های نوتری را که در آن‌ها همه ایده‌ال‌های غیر صفر راتلیف-راش هستند، دسته‌بندی کنند. گزاره زیر را در پاسخ به این امر، هینزر و همکاران در ([۴]، گزاره (۳،۱) آورده‌اند.

گزاره ۱. فرض کنید  $R$  یک حوزه نوتری باشد. اگر هر ایده‌ال غیر صفر  $R$  راتلیف-راش باشد، آن‌گاه بعد  $R$  حداکثر یک است.

اثبات. فرض کنید بعد  $R$  حداقل دو باشد. فرض کنید  $(x, y)R$  ایده‌الی از  $R$  با ارتفاع دو باشد. هم‌چنین فرض کنید  $I = (x^4, x^3y, xy^3, y^4)R$ . طبق ([۱۰]، بخش ۵، قضیه (۴،۱۴)،  $x, y$  یک مجموعه مستقل است. بنابراین  $x^3y^3 \notin I$  اما  $I^2 = ((x, y)R)^2$ ، بنابراین  $x^3y^3 \in \bar{I}$ ؛ یعنی  $I$  راتلیف-راش نیست.

طبق نتیجه ۳، در حوزه‌های نوتری یک‌بعدی مانند  $R$ ، می‌توان گفت؛ هر ایده‌ال غیر صفر در  $R$  راتلیف-راش است اگر و تنها اگر برای هر ایده‌ال ماکسیمال  $M$  در  $R$ ،  $R_M$  نیزچنین ویژگی داشته باشد. بنابراین، بدون کاستن از کلیت مسئله می‌توان فرض موضعی بودن حلقه را به گزاره زیر اضافه کرد.

قضیه ۱. ([۴]، قضیه (۳،۹) فرض کنید  $R$  یک حوزه نوتری موضعی از بعد یک و  $\bar{R}$  بستار صحیح آن باشد. در این صورت گزاره‌های زیر معادلند:

۱. هر ایده‌ال  $R$  پایدار است.

۲. هر ایده‌ال غیر صفر  $R$  راتلیف-راش است.

۳. هر  $R$ -زیرمدول  $\bar{R}$  که شامل  $R$  باشد یک حلقه است، و  $\bar{R}/M\bar{R}$  با حاصل ضرب مستقیم سه کپی از  $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$  یکرخت نیست.

۴. برای هر  $x \in \bar{R}$ ،  $\dim_{R/M}(R[x]/MR[x]) \leq 2$

1. Dedekind

و برای هر  $x, y \in \bar{R}$  ،  $\dim_{R/M}(R[x, y]/MR[x, y]) \leq ۳$  و  $\bar{R}/M\bar{R}$  با حاصل ضرب مستقیم سه کپی از  $\mathbb{Z}/۲\mathbb{Z}$  یکرخت نیست.

### منابع

1. Atiyah M. F., MacDonald I. G. , "Introduction to Commutative Algebra", Addison-Wesley, (1969).
2. D'Anna M., Guerrieri A., Heinzer W., "Invariants of ideals having principal reductions", Comm. Algebra, 29 (2) (2001) 889-906.
3. Grayson D. R., Stillman M. E. , Macaulay2, "a software system for research in algebraic geometry", Available at <http://www.math.uiuc.edu/Macaulay2>.
4. Heinzer W., Lantz D., Shah K., "The Ratliff-Rush ideals in a Noetherian ring", Comm. Algebra, 20 (1992) 591-622.
5. Heinzer W., Johnston B., Lantz D., Shah K., "Coefficient ideals in and blowups of a commutative Noetherian domain", J. Algebra, 162 (1993) 355-391.
6. Heinzer W., Johnston B., Lantz D., Shah K., "The Ratliff-Rush ideals in a Noetherian ring: a survey", Lecture Notes in Pure and Appl. Math., vol. 140, Dekker, New York, (1993) 149-159.
7. Huckaba S., "Reduction numbers for ideals of analytic spread one", J. Algebra, 108 (1987) . 503-512.
8. Huneke C., "On the associated graded ring of an Ideal", Ill. J. Math, 26 (1982). 121-137.
9. Huneke C., Swanson I., "Integral Closure of Ideals, Rings, and Modules", London Mathematical Society Lecture Note Series, vol.336, Cambridge University Press, Cambridge, (2006).
10. Kunz E., "Introduction to Commutative Algebra and Algebraic Geometry", Birkhauser, Boston, (1985).
11. Lipman J., "Stable ideals and Arf rings", Amer. J. Math., 93 (1971) 649-685.
12. Larsen M. D., McCarthy P. J. , "Multiplicative Theory of Ideals", Academic Press, New York and London, (1971).
13. Matsumura H., "Commutative Ring Theory", Cambridge Univ. Press, Cambridge, (1986).
14. Northcott D. G., Rees D., "Reductions of Ideals in local rings", Proc. Cambridge Philos. Soc., 50 (1954) 145-158.

15. Ratliff L. J., D. Rush E., "Two notes on reductions of Ideals", *Indiana Univ. Math. J.*, 27 (1978) 929-934.
16. Rossi M. E., Swason I., "Notes on the behavior of the Ratliff-Rush filtration", *American Mathematical Society, Providence, RI* (2003) 313-328 .
17. Rossi M. E., Valla G., "The Hilbert function of the Ratliff–Rush filtration", *J. Pure and Appl. Algebra*, 201 (2005) 25-41 .
18. Sally J., "Ideals whose Hilbert function and Hilbert polynomial agree at  $n=1$ ", *J. Algebra*, 157 (1993) 534-547 .
19. Valla G., "On form rings which are Cohen–Macaulay", *J. Algebra*, 58 (1979) 247-250 .