



## افکار سازگار ، نوشتار نابکار

### ریاضیات گسسته

سودابه محمدهاشمی - کیمیا محمدطاهری

هرگاه نویسنده‌ای توانایی درست نوشتن را نداشته باشد در انتقال صحیح تراوشات فکری خود به خواننده ناکام می‌ماند. نوشتار در خصوص مباحث علم ریاضیات گسسته نیز علاوه بر درک درست از مفاهیم، نیاز به دانش «صحیح نوشتن» و روش به تحریر درآوردن مسائل و اثبات‌ها دارد تا بتواند هدف انتقال بی‌کم و کاست به خواننده را کسب نماید.

چیزی که واقعا اهمیت دارد این است که با درست نوشتن، خواننده درک صحیحی از راه و روش حل مسائل و اثبات‌ها کسب کند و توانایی درک و خلاقیت در کشف روش‌های حل مسائل را در خود ارتقاء بخشد. در بیشتر مواقع اثبات مسائل آسان و منطق حل مسائل بسیار دست یافتنی به نظر می‌آید ولی در واقع در زمان نوشتن حل مسائل و اثبات‌ها رویکرد اشتباهی را پیش می‌گیریم. به همین خاطر است که ما نیاز داریم یاد بگیریم که چگونه اثبات‌ها را دنبال کنیم.

هر چند که رعایت حداقل معیارهای درست نویسی و پیشبرد مرحله به مرحله حل مسائل و اثبات‌ها با استدلال‌های منطقی، خیال ما را نسبت به درست و معتبر بودن نوشته‌ی خود راحت می‌نماید ولی مطالعه‌ی متون فنی و تعمق در نوشتارهای غنی ما را به مرحله‌ای از بلوغ در نویسندگی می‌رساند که علاوه بر رسیدن به بهترین نتیجه‌ی ممکن، ما را در انتقال صحیح معنا و مفهوم و درک صحیح نوشته بسیار موفق می‌سازد و در نهایت زمانی که فرا بگیریم، چگونه با اتکا به استدلال‌های درست اثباتمان را کامل کنیم، به فهم عمیق‌تری از مسائل می‌رسیم. پایه و بنیاد درست نویسی بسیار آسان است. تنها کافی است که دقت نماییم تا جملات استفاده شده به یکی از اشکال زیر باشد:

۱. خود فرض مسئله باشد.

۲. به صورت کاملاً شفاف و واضح از جملات قبلی نتیجه شده باشد.

۳. درستی آن قبلاً اثبات شده باشد.

در این جزوه تمام سعی و کوشش ما بر این بوده است تا شما را بیشتر با «درست نویسی» و نکاتی که خواننده را به این جهت سوق دهد آشنا کنیم. امید است که فراگیری نکات «درست نویسی» در تمامی مراحل زندگی راهبر و راهنمای شما باشد.

### انواع نکات

در این جزوه با سه دسته نکته مواجه هستیم:

۱. دسته  $E$ : نکات درست نویسی که رعایت نکردن آن باعث ناقص شدن اثبات و در نتیجه کسر نمره می‌شود.

۲. دسته  $N$ : نکات درست نویسی که رعایت کردن آن‌ها واجب نیست، اما به خوانایی راه حل، ابهام زدایی، پرهیز از تکرار و جلوگیری از خطا کمک می‌کنند.

۳. دسته  $T$ : دام‌های آموزشی و خطاهای رایج در حل سوالات.

## فصل ۱ : شمارش

### سؤال ۱.۱.

سه مهره رخ متمایز و صفحه شطرنجی  $8 \times 8$  داریم. به چند روش می توان این سه مهره را در سه خانه از این صفحه قرار داد به طوری که حداقل یک مهره وجود داشته باشد که توسط هیچ مهره ای تهدید نمی شود؟

پاسخ .

سوال را با اصل متمم حل می کنیم:  
- کل حالات:

$$64 \times 63 \times 62$$

- حالات نامطلوب: حالتی که همه رخ ها تهدید بشوند.  
رخ اول برای قرار گیری در صفحه شطرنجی ۶۴ حالت دارد، حال چون رخ اول باید تهدید بشود رخ دوم را باید در سطر یا ستون رخ اول قرار بدهیم که ۱۴ حالت دارد. چون رخ سوم هم باید تهدید بشود باید در سطر یا ستون یکی از رخ ها باشد که در مجموع شامل ۶ خانه در سطر یا ستون مشترک دو رخ قبلی و ۱۴ خانه در سطرها یا ستون های غیر مشترک دو رخ است. پس کل حالت ها برابر است با:

$$64 \times 14 \times 20$$

- حالات مطلوب: طبق اصل متمم برابر است با:

$$64 \times 63 \times 62 - 64 \times 14 \times 20$$

نکات:

T.I : نشمردن همه حالت ها: در اینجا تمام حالات نامطلوب محاسبه نشده است، زیرا این امکان وجود دارد که رخ اول توسط رخ دوم تهدید نشود و این حالت در نظر گرفته نشده است.

N.II : بهتر بود اشاره شود که به دلیل تمایز رخ ها چنین نتیجه ای گرفته شده است.

پاسخ .

- کل حالات:

$$64 \times 63 \times 62$$

- حالات نامطلوب: حالتی که همه رخ ها تهدید بشوند.

$$64 \times 7 \times 20 \times 2$$

- حالات مطلوب: طبق اصل متمم برابر است با:

$$64 \times 63 \times 62 - 64 \times 14 \times 20$$

نکات:

N.III : نبود توضیحات کافی برای عبارت: به دلیل نبود توضیحات کافی، تشخیص چرایی غلط بودن جواب نهایی ممکن نیست.

پاسخ صحیح .

- کل حالات: به دلیل تمایز رخ ها برابر است با:

$$P(64, 3) = 64 \times 63 \times 62$$

- حالات نامطلوب: حالتی که همه رخ ها تهدید بشوند.  
دو حالت داریم:

۱. رخ اول رخ دوم را تهدید کند:  
رخ اول برای قرار گیری در صفحه شطرنجی ۶۴ حالت دارد، حال چون رخ اول باید توسط رخ دوم تهدید بشود رخ دوم را باید در سطر یا ستون رخ اول قرار بدهیم که ۱۴ حالت دارد. چون رخ سوم هم باید تهدید بشود باید در سطر یا ستون یکی از رخ ها باشد که در مجموع شامل ۶ خانه در سطر یا ستون مشترک دو رخ قبلی و ۱۴ خانه در سطرها یا ستون های غیر مشترک دو رخ است. پس کل حالت ها برابر است با:

$$64 \times 14 \times 20$$

۲. رخ اول رخ دوم را تهدید نکند:  
رخ اول برای قرار گیری در صفحه شطرنجی ۶۴ حالت دارد، حال چون رخ اول نباید توسط رخ دوم تهدید بشود رخ دوم را در خانه ای به جز سطر یا ستون رخ اول قرار بدهیم که ۴۹ حالت دارد. حال رخ سوم باید هر دو رخ را تهدید کند پس باید در یکی از محل های تقاطع سطر و ستون رخ اول و رخ دوم قرار بگیرد که دو حالت دارد، پس کل حالت ها برابر است با:

$$64 \times 49 \times 2$$

- حالات مطلوب: طبق اصل متمم برابر است با:

$$64 \times 63 \times 62 - (64 \times 14 \times 20 + 64 \times 49 \times 2)$$

سؤال ۲.۱.

اتحاد زیر را ثابت کنید.

$$1^2 \binom{n}{1} + 2^2 \binom{n}{2} + 3^2 \binom{n}{3} + \dots + n^2 \binom{n}{n} = n(n+1)2^{n-2}$$

پاسخ .

فرض کنید  $P = \sum_{k=0}^n k^2 \binom{n}{k}$  بیانگر تعداد راه های انتخاب یک کمیته از بین  $n$  کاندیدا است به طوری که یک فرد یا دو فرد متمایز، رئیس کمیته باشند. حال این شمارش را به روش دیگری انجام می دهیم.

۱. با فرض داشتن یک رئیس، رئیس را انتخاب کرده و تصمیم می گیریم که بقیه افراد حضور داشته باشند یا خیر و حالات به دست آمده را جمع می کنیم با حالاتی که ۲ رئیس را انتخاب کردیم در مورد حضور یا عدم حضور بقیه افراد تصمیم گرفتیم:

$$P = n \times 2^{n-1} + n \times (n-1) \times 2^{n-2} = n \times (n+1) \times 2^{n-2}$$

از تساوی این ۲ حالت حکم مساله اثبات می شود:

$$\sum_{k=0}^n k^2 \binom{n}{k} = n \times (n+1) \times 2^{n-2}$$

نکات:

E.IV : عدم تطابق توضیحات با فرمول نوشته شده، انتخاب دو رئیس از میان  $n$  نفر  $\binom{n}{2}$  حالت دارد نه  $n \times (n-1)$ .

N.V : بهتر است روش اثبات (دوگانه شماری) ذکر شود.

E.VI : یک طرف دوگانه شماری که نیازمند اثبات است، بدیهی در نظر گرفته شده است.

پاسخ صحیح .

سوال را با دوگانه شماری حل می کنیم:  
فرض کنید  $P$  بیانگر تعداد راه های انتخاب یک کمیته از بین  $n$  کاندیدا است به طوری که یک فرد رئیس کمیته و یک نفر معاون باشند و رئیس و معاون می توانند یک نفر باشند. شمارش این راه ها به ۲ روش امکان پذیر است.

۱. با فرض یکسان بودن رئیس و معاون، رئیس را انتخاب کرده و تصمیم می گیریم که بقیه افراد حضور داشته باشند یا خیر و حالات به دست آمده را جمع می کنیم با حالاتی که رئیس و معاون متمایز را انتخاب کردیم و در مورد حضور یا عدم حضور بقیه افراد تصمیم گرفتیم:

$$P = n \times 2^{n-1} + n \times (n-1) \times 2^{n-2} = n \times (n+1) \times 2^{n-2}$$

۲. ابتدا این که چه اعضای کمیته و رئیس و معاون را تشکیل دهند را انتخاب می کنیم که این تعداد می تواند هر عددی باشد، سپس رئیس و معاون یکسان یا متمایز را از بین آن ها انتخاب می کنیم:

$$P = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (k(k-1) + k) = \sum_{k=0}^n k^2 \binom{n}{k}$$

از تساوی ۲ حالت فوق حکم مساله اثبات می شود:

$$\sum_{k=0}^n k^2 \binom{n}{k} = n \times (n+1) \times 2^{n-2}$$

## سؤال ۳.۱.

۶۰ دانشجو در کلاس ریاضیات گسسته حضور دارند. در میان هر ۱۰ نفر از این کلاس ، حداقل ۳ نفر نمره مبانی یکسانی دارند. ثابت کنید در این کلاس ۱۵ نفر وجود دارند که نمره مبانی آن ها یکسان است.

پاسخ .

در نظر میگیریم حداکثر تعداد تکرار از یک نمره ۱۴ عدد است که در این صورت حداقل به ۵ نمره متفاوت نیاز است . در این صورت باز میتوان گروه ۱۰ تایی را از دانش آموزان انتخاب کرد که حداکثر دو نفر نمره یکسان داشته باشند . پس فرض اولیه غلط بوده و مشخص میشود که لاف از یکی از نمرات وجود دارد که ۱۵ دانش آموز یا بیشتر آن نمره را دارند.

نکات:

N.VII : در پاسخ از برهان خلف استفاده شده ولی از آن نام برده نشده است و باید توجه کنیم فرض خلف را حتما بیان کنیم.

N.VIII : باید اصل لانه کبوتری که از آن استفاده کرده است را نام میبرد و نحوه استفاده از آن مشخص شود.

T.IX : پاسخ کامل نیست. پاسخ درست و کامل در پایین آمده است.

پاسخ صحیح .

از برهان خلف استفاده می کنیم. فرض خلف : فرض کنید در این کلاس هیچ ۱۵ نفری وجود نداشته باشند که نمره ی مبانی آن ها یکسان باشد. در این صورت حداکثر ۱۴ نفر وجود دارند که نمره ی یکسان داشته باشند. بنابراین طبق اصل لانه کبوتری حداقل به اندازه ی سقف  $\frac{60}{14}$  یعنی ۵ نمره ی متفاوت در کلاس وجود دارد. مسئله را به دو حالت تقسیم می کنیم ؛

۱. اگر پنج نمره ی متمایز وجود داشته باشند که از هر کدام ۲ عضو (دو نفر در کلاس که آن نمره را دارند) وجود داشته باشد؛ در این صورت از هر کدام از این نمرات دو عضو را در نظر گرفته و به مجموعه ای ۱۰ عضوی می رسیم که هیچ سه نفری در آن نمره ی یکسان ندارند که این خلاف فرض مسئله است و به تناقض رسیدیم. پس فرض خلف رد شده و حداقل ۱۵ نفر وجود دارند که نمره ی یکسانی داشته باشند.

۲. اگر پنج نمره ی متمایز، هر کدام دارای حداقل دو عضو وجود نداشته باشند؛ در این صورت  $k \leq 4$  نمره ی متمایز با بیش از یک عضو داریم (مجموعه ی این نمرات را A بنامیم) که با توجه به فرض خلف، حداکثر تعداد  $k \times 14$  عضو را پوشش می دهند. بنابراین حداقل  $60 - 14k$  نفر باقی مانده که هیچ دو تایی نمی توانند دارای نمره ی یکسان باشند (در غیر این صورت تعداد نمره های متمایز دارای بیشتر مساوی ۲ عضو به حداقل  $k+1$  می رسد). بنابراین هر یک از این اعضا دارای نمره ای متمایز است (مجموعه ی این اعضا را B بنامیم). می توان با انتخاب دو عضو از هر نمره ی مجموعه ی A و تمام اعضای مجموعه ی B به مجموعه ای متشکل از  $N = 2k + 60 - 14k = 60 - 12k$  عضو رسید که  $N \geq 12 \Rightarrow k \leq 4$  و هیچ سه عضوی در آن دارای نمره ی یکسان نیستند. هر ده عضوی از این مجموعه انتخاب شود، نقض فرض مسئله است و به تناقض رسیدیم. پس فرض خلف رد شده و حداقل ۱۵ نفر وجود دارند که نمره ی یکسانی داشته باشند.

## سؤال ۴.۱.

ضریب عبارت  $x^{12}$  در بسط عبارت  $(1 - 4x)^{-5}$  را بیابید.

پاسخ .

طبق بسط دوجمله ای داریم:

$$\frac{1}{(1 - 4x)^5} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+4}{k} 4^k x^k$$

جمله ۱۲ ام دنباله  $a_n$  ضریب  $x^{۱۲}$  است. XI.

$$\rightarrow a_{۱۲} = \binom{۱۶}{۱۲} ۴^{۱۲}$$

نکات:

N.X : بهتر است اصل بسط دوجمله ای هم نوشته شود.

E.XI : قبل از استفاده از متغیر باید آن را تعریف کرد. تعریف دنباله  $a_n$  ضروری است.

پاسخ صحیح .

طبق جدول Useful Generating Functions از کتاب Rosen که استاد نیز به آن اشاره کردند داریم:

$$(1-x)^{-n} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{k} x^k$$

بنابراین در این سوال داریم:

$$(1-4x)^{-5} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{5+k-1}{k} (4x)^k$$

جمله  $x^{۱۲}$  به ازای مقدار  $k = ۱۲$  ساخته می شود. بنابراین جواب برابر خواهد بود با:

$$\binom{۱۶}{۱۲} (۴)^{۱۲}$$

سؤال ۵.۱.

چند عدد طبیعی حداکثر ۹ رقمی وجود دارد که مجموع ارقام آن برابر با ۳۲ باشد؟

پاسخ .

سوال را با اصل شمول و عدم شمول حل می کنیم:

$$|A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_9| = \binom{9}{1} |A_1| + \binom{9}{2} |A_1 \cap A_2| + \dots + \binom{9}{9} |A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_9|$$

حال مقدار عبارت ها را حساب می کنیم:

$$|A_1| = \binom{30}{8}$$

$$|A_1 \cap A_2| = \binom{20}{8}$$

$$|A_1 \cap A_2 \cap A_3| = \binom{10}{8}$$

برای بقیه جمله ها جواب برابر ۰ است.

حال از اصل متمم برای به دست آوردن جواب نهایی استفاده می کنیم:

- کل حالات:

$$\binom{40}{8}$$

- حالات مطلوب:

$$\binom{40}{8} - \binom{9}{1} \binom{30}{8} + \binom{9}{2} \binom{20}{8} - \binom{9}{3} \binom{10}{8}$$

نکات:

E.XII : تعریف متغیر های  $A_i$  ضروری است، چون در غیر این صورت منظور از بقیه استدلال ها به هیچ وجه مشخص نیست.

E.XIII : اثبات و یا در صورت وضوح، اشاره به تقارن میان مجموعه ها برای استفاده از اصل شمول و عدم شمول به این شکل ضروری است.

پاسخ صحیح .

رقم  $i$  ام این عدد را با  $x_i$  نشان می دهیم، بنابراین به دنبال یافتن تعداد جواب های صحیح معادله زیر هستیم:

$$\sum_1^9 x_i = 32$$

$$\forall i \in [1, 9] : x_i \leq 9$$

تعداد جواب های صحیح این معادله را به کمک اصل متمم پیدا می کنیم:

- کل حالات: تعداد جواب های صحیح نامنفی معادله  $\sum_1^9 x_i = 32$ . این یک معادله سیاله است و تعداد جواب های صحیح آن برابر است با:

$$\binom{40}{8}$$

- حالات نامطلوب: تعداد جواب های صحیح نامنفی معادله  $\sum_1^9 x_i = 32$  به طوری که:  $\exists i \in [1, 9] : x_i \geq 10$

حال اگر مجموعه حالت هایی که در آن  $x_i \geq 10$  است را با  $A_i$  نشان دهیم، کافی است تعداد اعضای اجتماع این مجموعه ها را بیابیم طبق اصل شمول و عدم شمول و با توجه به تقارن میان  $A_i$  ها داریم:

$$|A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_9| = \binom{9}{1} |A_1| + \binom{9}{2} |A_1 \cap A_2| + \dots + \binom{9}{9} |A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_9|$$

برای محاسبه مقدار عبارت ها، در معادله سیاله متناظر، در صورتی که  $x_i \geq 10$  بود قرار می دهیم  $x_i = y_i + 10$  و در غیر این صورت قرار می دهیم  $x_i = y_i$ ، حال اگر تعداد  $i$  هایی را که به ازای آن ها  $x_i \geq 10$  است را با  $k$  نشان بدهیم، حال به دنبال تعداد جواب های صحیح

نامنفی معادله سیاله  $\sum_1^9 y_i = 32 - 10k$  هستیم، که برابر است با:

$$\binom{40 - 10k}{8}$$

حال مقدار عبارت ها را حساب می کنیم:

$$|A_1| = \binom{30}{8} \quad (k=1)$$

$$|A_1 \cap A_2| = \binom{20}{8} \quad (k=2)$$

$$|A_1 \cap A_2 \cap A_3| = \binom{10}{8} \quad (k=3)$$

برای بقیه جمله ها جواب برابر ۰ است.  
پس کل حالات نامطلوب برابر است با:

$$\binom{9}{1} \binom{30}{8} - \binom{9}{2} \binom{20}{8} + \binom{9}{3} \binom{10}{8}$$

- حالات مطلوب: طبق اصل متمم برابر است با:

$$\binom{40}{8} - \binom{9}{1} \binom{30}{8} + \binom{9}{2} \binom{20}{8} - \binom{9}{3} \binom{10}{8}$$

#### سؤال ۶.۱.

با استفاده از توابع مولد نشان دهید تعداد روش های انتخاب ۴ عضو دو به دو نامتوالی از مجموعه اعداد  $1, 2, 3, \dots, n$  برابر با انتخاب ۴ از  $n-3$  است.

پاسخ .

یک زیرمجموعه از این نوع مثلاً ۱ و ۳ و ۷ و ۱۰ را انتخاب و نابرابری های اکید

$$0 < 1 < 3 < 7 < 10 < n+1$$

را در نظر میگیریم. و بررسی میکنیم چند عدد صحیح بین هر دو عدد متوالی از این اعداد وجود دارند. در اینجا ۰ و ۱ و ۳ و ۲ و ۱۰-ن را به دست می آوریم: ۰ زیرا عددی صحیح بین ۰ و ۱ وجود ندارد و ۱ زیرا تنها عدد ۲ بین ۱ و ۳ وجود دارد و ۳ زیرا اعداد صحیح ۴ و ۵ و ۶ بین ۳ و ۷ وجود دارند و ... . مجموع این ۵ عدد صحیح برابر  $0 + 1 + 3 + 2 + n - 10 = n - 4$  است. **XIV**

پس تابع مولد زیر را داریم.

$$\begin{aligned} G(x) &= (1 + x^1 + x^3 + \dots)^1 (x + x^2 + x^3 + \dots)^3 = \left( \sum_{k=0}^{\infty} x^k \right)^1 \left( \sum_{k=0}^{\infty} x^{k+1} \right)^3 = \\ &= \frac{1}{(1-x)^1} \cdot \left( \frac{x}{1-x} \right)^3 = \frac{x^3}{(1-x)^4} = x^3 (1-x)^{-4} = x^3 \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+4}{k} x^k = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+4}{k} x^{k+3} = (E.XV) \quad \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+1}{k-3} x^k \end{aligned}$$

به دنبال ضریب  $x^{n-4}$  می‌گشیم پس  $k = n - 4$  و جواب نهایی برابر است با  $\binom{n-3}{n-7} = \binom{n-3}{4}$

نکات:



**E.XIV:** مثال زدن باید به صورتی باشد که حذف آن اختلالی در فهم جواب ایجاد نکند. در اینجا اگر مثال پاراگراف اول را حذف کنیم مشخص نیست تابع مولد برچه اساسی نوشته شده است. پس باید توضیحی در مورد تابع مولد و جمله ای که به دنبال ضرب آن هستیم بدهیم.

**E.XV:** نیاز هست که کاملاً گفته شود چه تغییر متغیری انجام میشود. در اینجا تغییر متغیر  $k \rightarrow k+3$  را داریم. همیشه به هنگام تغییر متغیر توجه کنیم است کران ها تغییر کنند. در اینجا کران پایین از صفر به سه میرود. صورت اصلاح شده:  $\sum_{k=3}^{\infty} \binom{k+1}{k-3} x^k$

**N.XVI:** در طی پاسخ به سوال خوب است دقت کنیم همه ی اعداد را یا فارسی یا انگلیسی بنویسیم.

پاسخ.

تابع مولد فاصله از مبدا:

$$G(x) = (1 + x + x^2 + \dots)(x + x^2 + x^3 + \dots)^3$$

در مجموع  $n-4$  عدد داریم. توان های  $x$  باید بین مبدا و مقصد باشند پس باید توانی از  $x$  را که کوچک تر یا مساوی  $n-4$  هستند را بیابیم:

$$G(x) = \frac{x^3}{(1-x)^4} = x^3(1-x)^{-4} = x^3 \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+3}{3} x^k$$

$$\rightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \binom{x+k}{k} = \frac{1}{(1+x)^{k+1}} \rightarrow k+3 \leq n-4 \rightarrow k \leq n-7$$

$$\binom{n+1}{r+1} = \sum_{k=r}^n \binom{k}{r} \quad (1)$$

مجموع حالات:

$$\rightarrow \sum_{k=0}^{n-7} \binom{k+3}{3} \xrightarrow{(1)} \binom{n-7+4}{4} = \binom{n-3}{4}$$

نکات:

**E.XVII:** به هنگام جایگذاری در فرمول باید جایگذاری ها واضح باشد. در این مثال در فرمول (1) کران پایین از  $r$  هست ولی در قسمتی که از آن استفاده شده کران پایین از 0 است. همین مطلب گویای آن است که به توضیحات بیشتری نیاز هست. عبارت زیر صورت کامل شده این نکته است:

$$\rightarrow \sum_{k=0}^{n-7} \binom{k+3}{k} = \sum_{k=3}^{k-4} \binom{k}{k-3} = \sum_{k=3}^{n-4} \binom{k}{3} \xrightarrow[r \rightarrow 3, n \rightarrow n-4]{(1)} \binom{n-3}{4}$$

پاسخ صحیح.

تعداد عضوهای انتخاب نشده کوچکتر از عضو اول انتخاب شده را  $x_1$ ، عضوهای انتخاب نشده بین عضو اول و دوم انتخاب شده را  $x_2$ ، عضوهای انتخاب نشده بین عضو دوم و سوم انتخاب شده را  $x_3$ ، عضوهای انتخاب نشده بین عضو سوم و چهارم انتخاب شده را  $x_4$  و

عضوهای انتخاب نشده بزرگ‌تر از چهارمین عضو انتخاب شده را  $x_5$  می‌گیریم. کافی است تعداد جواب‌های صحیح نامنفی معادله زیر را با شرایط  $x_1, x_5 \geq 0, x_2, x_3, x_4 \geq 1$  بشماریم

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = n - 4$$

که برابر است با ضریب  $x^{n-4}$  در عبارت:

$$(1 + x + x^2 + \dots)(x + x^2 + x^3 + \dots)(x + x^2 + x^3 + \dots)(x + x^2 + x^3 + \dots)(1 + x + x^2 + \dots) = \frac{x^3}{(1-x)^5}$$

بنابراین کافی است ضریب  $x^{n-7}$  را در بسط  $(1-x)^{-5}$  بشماریم.

طبق جدول Useful Generating Functions از کتاب Rosen که استاد نیز به آن اشاره کردند داریم:

$$(1-x)^{-n} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{n+k-1}{k} x^k$$

بنابراین در این سوال داریم:

$$(1-x)^{-5} = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{5+k-1}{k} x^k = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+4}{k} x^k = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{k+4}{4} x^k$$

$x^{n-7}$  به ازای  $k = n - 7$  ساخته می‌شود. بنابراین جواب برابر است با:

$$\binom{n-3}{4}$$

#### سؤال ۷.۱.

اتحاد زیر را ثابت کنید.

$$\sum_{i=k}^n \binom{i}{k} = \binom{n+1}{k+1}$$

پاسخ .

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=k}^n \binom{i}{k} = \sum_{i=k}^n \binom{i+1}{k+1} - \binom{i}{k+1} = \sum_{i=k}^n \binom{i+1}{k+1} - \sum_{i=k}^n \binom{i}{k+1} \\ &= \binom{n+1}{k+1} + \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} - \left( \binom{k}{k+1} + \sum_{i=k+1}^n \binom{i}{k+1} \right) = \binom{n+1}{k+1} + \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} - \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} = \binom{n+1}{k+1} \end{aligned}$$

نکات:

N.XVIII : باید فرمول و اتحاد های مورد استفاده و رفرنس معتبر آن ذکر شود . به عنوان رفرنس اسم اتحاد هم کافی است.

پاسخ صحیح .

طبق اتحاد پاسکال داریم:

$$\binom{n}{k} + \binom{n}{k+1} = \binom{n+1}{k+1}$$

پس طبق این اتحاد می توان نوشت:

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^n \binom{i}{k} &= \sum_{i=k}^n \left( \binom{i+1}{k+1} - \binom{i}{k+1} \right) = \sum_{i=k}^n \binom{i+1}{k+1} - \sum_{i=k}^n \binom{i}{k+1} \\ &= \binom{n+1}{k+1} + \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} - \left( \binom{n}{k+1} + \sum_{i=k+1}^n \binom{i}{k+1} \right) = \binom{n+1}{k+1} + \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} - \sum_{i=k}^{n-1} \binom{i+1}{k+1} = \binom{n+1}{k+1} \end{aligned}$$

## فصل ۲ : منطق

### سؤال ۱.۲.

گزاره های زیر همگی درست هستند، با در نظر گرفتن آن‌ها، درستی یا نادرستی گزاره های ۱ و ۲ را بررسی کنید.

- اگر کار نداشته باشم یا پولدار باشم، تفریح می کنم.
- اگر تفریح بکنم، فیلم می بینم یا بستنی می خورم.
- بستنی نمی خورم و می خوابم.
- اگر بخوابم، فیلم نمی بینم.

گزاره ها:

۱. من کار دارم.
۲. من پولدار هستم.

پاسخ .

چون خوابیدم، فیلم هم ندیدم، پس چون فیلم ندیدم، تفریح هم نکردم، پس طبق شرط اول، من پولدار نیستم و کار دارم.

نکات:

N.XIX : بهتر است برای جلوگیری از اشتباه، از نوشتار منطقی استفاده کرده و فارسی ننویسیم.

E.XX : باید فقط از تبدیلات تعریف شده استفاده کرد و استفاده از تبدیلات دیگر بدون اثبات صحیح نیست، مثلاً در اینجا فیلم ندیدن مستقیماً تفریح نکردن را نتیجه نمی دهد.

پاسخ صحیح .

هر گزاره را با یک حرف نشان می دهیم:

- من کار دارم  $p$
- من پولدار هستم  $q$
- من تفریح می کنم  $r$
- من فیلم می بینم  $s$

$$\bullet \text{ من بستنی می خورم } t =$$

$$\bullet \text{ من می خوابم } u =$$

فرض ها:

$$\bullet q \vee \neg p \implies r$$

$$\bullet r \implies s \vee t$$

$$\bullet \neg t \wedge u$$

$$\bullet u \implies \neg s$$

حال داریم:

$$1. \neg t \wedge u \text{ (فرض)}$$

$$2. u \text{ (طبق ۱: ساده سازی عطفی)}$$

$$3. \neg s \text{ (فرض) } u \implies \neg s$$

$$4. \neg s \text{ (طبق ۳ و ۴)}$$

$$5. \neg t \text{ (طبق ۱: ساده سازی عطفی)}$$

$$6. \neg t \wedge \neg s \text{ (طبق ۳ و ۴: ترکیب عطفی)}$$

$$7. r \text{ (فرض) } s \vee t \implies r$$

$$8. \neg r \text{ (طبق ۷: عکس نقیض)}$$

$$9. \neg r \text{ (طبق ۸: دمورگان)}$$

$$10. \neg r \text{ (طبق ۹ و ۶)}$$

$$11. r \text{ (فرض) } q \wedge \neg p \implies r$$

$$12. \neg(q \vee \neg p) \text{ (طبق ۱۱: عکس نقیض)}$$

$$13. \neg(q \vee \neg p) \text{ (طبق ۱۰ و ۱۲)}$$

$$14. \neg q \wedge p \text{ (طبق ۱۳: دمورگان)}$$

$$15. \neg q \text{ (طبق ۱۴: ساده سازی عطفی)}$$

$$16. p \text{ (طبق ۱۴: ساده سازی عطفی)}$$

پس ۱ صحیح و ۲ غلط است.

## سؤال ۲.۲.

صفحه‌ای دو بعدی را در نظر بگیرید که از هر دو طرف تا بینهایت ادامه دارد و با دو رنگ آن را رنگ کرده‌ایم (حتما از هر دو رنگ استفاده شده است). آیا دو نقطه به فاصله  $d$  (عدد حقیقی) وجود دارد که هم‌رنگ باشند؟

پاسخ .

درستی نقیض خواسته سوال را اثبات می‌کنیم.

حکم سوال: دو نقطه به فاصله  $d$  (عدد حقیقی) وجود دارد که هم‌رنگ باشند.

نقیض حکم سوال: وجود دارد دو نقطه به فاصله  $d$  که دو رنگ مختلف باشند.

دو نقطه با دو رنگ متفاوت را در نظر می‌گیریم. فاصله این دو نقطه  $kd + r$  است به طوری که  $k$  عدد صحیح نامنفی و  $r < k$  است. اگر  $k$  بیشتر مساوی یک باشد از نقطه چپ، به اندازه  $d$  سمت راست می‌آییم. این نقطه باید هم‌رنگ باشد و این انتقال را آنقدر ادامه می‌دهیم تا  $k = 0$  شود. حالا به دو نقطه ای رسیده‌ایم که فاصله‌ای کمتر از  $d$  دارند و از دو رنگ متفاوت هستند. سپس نقطه سوم به فاصله  $d$  از این دو نقطه در نظر می‌گیریم. یک مثلث متساوی الساقین تشکیل می‌شود. بنابراین راس سوم حتماً با یکی از دو راس دیگر رنگ متفاوت خواهد داشت. در اینجا ثابت کردیم نقیض حکم سوال درست است پس حکم سوال نادرست می‌باشد.

نکات:

**T.XXI**: نقیض حکم سوال به نادرستی بیان شده است. فرض کنید  $P(x,y)$  هم‌رنگ بودن دو نقطه  $x$  و  $y$  باشد.  $D(x,y)$  به فاصله  $d$  بودن دو نقطه  $x$  و  $y$  باشد.

حکم سوال بیان میکند که:  $\exists x, y (D(x, y) \wedge P(x, y))$   
برای نقیض کردن آن داریم:

$$\neg \exists x, y, (D(x, y) \wedge P(x, y)) = \forall x, y, (\neg (D(x, y) \wedge P(x, y)) = \forall x, y, (\neg D(x, y) \vee \neg P(x, y))$$

به صورت فارسی می‌توان گفت: هیچ دو نقطه به فاصله‌ی  $d$  هم‌رنگ نیستند.

در صورتی که جمله‌ی 'وجود دارد دو نقطه به فاصله  $d$  که دو رنگ مختلف باشند.' به شکل منطقی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\exists x, y, (D(x, y) \wedge \neg P(x, y))$$

در گزاره‌های منطقی واضح است نقیض کردن اشتباه انجام شده است.

**E.XXII**: به طور کلی در نظر داشته باشد، توجه به نگرش پایه‌ای و گام به گام منطق در تمامی حل سوالات (حتی مباحث غیرمنطق) به تمیزتر نوشتن و پرهیز از اشتباه کمک می‌کند. به همین علت مهم و مورد انتظار است.

پاسخ صحیح.

اصل لانه‌ی کبوتری: به ازای  $n$  لانه و  $n + 1$  کبوتر با فرض اینکه هر کبوتر در یکی از لانه‌ها قرار دارد؛ دو کبوتر وجود دارند که در یک لانه قرار دارند.

قبل از شروع اثبات اسم رنگ اول را قرمز و رنگ دوم را آبی می‌گذاریم.

حال مثالی متساوی‌الاضلاع را در نظر بگیرید که اندازه‌ی هر ضلع آن  $d$  است. بدیهی است که این مثلث را می‌توان در صفحه (طبق فرض مسئله صفحه بی‌نهایت است) در نظر گرفت که طبق اصل لانه‌ی کبوتری روی سه نقطه و دو رنگ، دو نقطه از این سه نقطه هم‌رنگند. این دو نقطه، دو نقطه به فاصله  $d$  و هم‌رنگند.

نکات:

N.VIII

سؤال ۳.۲.

چگونگی اثبات درستی یا نادرستی جمله زیر را توضیح دهید.

تابع  $q(x,y)$  را تعریف می‌کنیم اگر  $p(x)$  درست باشد  $p(x+y)$  و در غیر این صورت نقیض  $p(x-y)$  را نتیجه می‌دهد.

پاسخ.

جمله بالا را به صورت یک گزاره منطقی می نویسیم.

$$(\forall x, p(x)) \rightarrow (\exists y, q(x, y))$$

حال با یک مثال ، نادرستی گزاره فوق را نشان می دهیم.

سمت چپ گزاره  $(\forall x, p(x))$  را P و سمت راست  $(\exists y, q(x, y))$  را Q می نامیم. پس داریم:  $P \rightarrow Q$   
 $x_1$  را در نظر می گیریم طوری که P درست باشد. سپس  $y_1$  را طوری انتخاب می کنیم که Q نادرست باشد.

$$P = True \rightarrow Q = False$$

بنابراین طبق جدول truth-table گزاره فوق نادرست خواهد بود.

نکات:

E.XXII

T.XXIII : از سورها به نادرستی تعبیر شده است. در عبارت Q سور وجودی داریم. بنابراین نمی توان  $y_1$  را طوری انتخاب کرد که Q نادرست باشد.

پاسخ صحیح .

جمله بالا را به صورت یک گزاره منطقی می نویسیم.

$$(\forall x, p(x)) \rightarrow (\exists y, q(x, y))$$

چون در قسمت سمت چپ از سور عمومی استفاده شده است  $x_1$  را طوری می یابیم که ناقض P باشد. بنابراین طبق truth-table درستی یا نادرستی Q اهمیتی ندارد.

$$P = False \rightarrow Q = -$$

پس در کل گزاره فوق درست است.

## فصل ۳ : ناوردایی

### سؤال ۱.۳.

اعداد ۱ تا ۲۰ را روی تخته نوشته‌ایم. هر بار می‌توانیم دو عدد  $a, b$  را از روی تخته پاک کرده و عدد  $b + a + ab$  را روی تخته بنویسیم. عدد نهایی روی تخته را بیابید.

پاسخ .

در هر بار حاصل ضرب اعداد روی تخته  $+ ۱$  ثابت است. این عدد برابر  $۲۱!$  است. پس عدد نهایی  $۱ - ۲۱!$  خواهد بود.

نکات:

**N.XXIV** : از نوشتن جملات فارسی که ایجاد ابهام می‌کنند بپرهیزید و حتی الامکان عبارات را به صورت ریاضی بنویسید. از جمله بالا می‌توان  $۱ + a_1 * a_2 * a_3 * \dots * a_n$  را تعبیر کرد در صورتی که مقصود  $(a_1 + 1) * (a_2 + 1) * (a_3 + 1) * \dots * (a_n + 1)$  بوده است.

**E.XXV** : اثبات ناوردا بودن یک مقدار از مهم‌ترین موارد مساله‌های ناوردایی می‌باشد. در این پاسخ، این مورد اثبات نشده است.

پاسخ صحیح .

مساله را با ناوردائی حل می‌کنیم. سوال را برای اعداد دلخواه حل کرده سپس اعداد یک تا بیست را در نتیجه‌ی نهایی لحاظ می‌کنیم. فرض می‌کنیم در ابتدای مساله اعداد  $x_1, x_2, \dots, x_{19}, x_{20}$  را داریم. به ازای هر عدد  $x_i, y_i$  را به این صورت در نظر می‌گیریم:  $y_i = x_i + 1$

مقدار ناوردا را  $S$  در نظر می‌گیریم و آن به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S = y_1 \times y_2 \times \dots \times y_{19} \times y_{20}.$$

ادعا می‌کنیم در هر مرحله با برداشتن دو عدد دلخواه  $a$  و  $b$  و گذاشتن عدد  $a + b + ab$  به جای آن، مقدار  $S$  ثابت می‌ماند. حال به اثبات آن می‌پردازیم:

فرض می‌کنیم در مرحله‌ی اول دو عدد دلخواه  $x_i$  و  $x_j$  را انتخاب می‌کنیم و به جای آن  $x_i + x_j + x_i x_j$  قرار می‌دهیم. این مقدار درواقع معادل  $(x_i + 1)(x_j + 1) - ۱$  می‌باشد. بدین ترتیب مقدار  $S$  که تاکنون برابر  $(x_1 + 1)(x_2 + 1) \dots (x_{20} + 1)$  بوده است، به صورت زیر به‌روزرسانی خواهد شد:



$$\begin{aligned}
 S &= \left( \prod_{k=1, k \neq i, j}^{20} (x_k + 1) \right) (((x_i + 1)(x_j + 1) - 1) + 1) \\
 &= \left( \prod_{k=1, k \neq i, j}^{20} (x_k + 1) \right) (x_i + 1)(x_j + 1) \\
 &= (x_1 + 1)(x_2 + 1) \dots (x_{20} + 1)
 \end{aligned}$$

بنابراین در هرگام و با انتخاب هر دو عدد دلخواه، مقدار تعریف شده برای  $S$  ثابت خواهد ماند. بدین ترتیب عدد باقیمانده روی تخته برای اعداد یک تا بیست برابر است با:

$$(1+1)(2+1) \dots (20+1) - 1 = 21! - 1$$

(از آنجایی که مقدار ناوردا بر اساس  $y_i$  تعریف شده است. در نهایت مقدار نهایی که براساس  $x_i$  است، یک واحد از مقدار ناوردا کمتر خواهد بود.)

### سؤال ۲.۳.

در یک ردیف ۲۰۰۰ عدد نوشته شده است. فرض کنید به ازای هر عدد  $a$  در این دنباله،  $f(a)$  برابر با تعداد دفعاتی باشد که  $a$  در دنباله آمده است. در هر مرحله به ازای هر عضوی از دنباله مثل  $x$  مقدار  $f(x)$  را زیر آن می‌نویسیم تا یک دنباله ۲۰۰۰ تایی جدید حاصل شود. آیا می‌توان این دنباله را تا ابد ادامه داد به طوری که هیچ دو دنباله متوالی باهم برابر نباشند؟

پاسخ .

خیر این حالت امکان‌پذیر نیست. چون لازم است تعداد اعداد تکرار شده در هر مرحله باهم متفاوت باشد و پس از گذر از چند مرحله این امکان از بین می‌رود.

نکات:

E.XXVI : استدلال فوق شهودی است و شهود به هیچ عنوان ارزش ریاضی ندارد.

پاسخ .

عددها در هر ستون را ناوردا در نظر می‌گیریم. واضح است این اعداد کران‌دار هستند پس یک جایی همه این ثابت می‌مانند و دو دنباله متوالی وجود خواهد داشت که باهم برابر باشند.

نکات:

E.XXV

T.XXVII : اشاره و اثبات نوع ناوردا ضروری است. نوع ناوردا می‌تواند ثابت یا افزایشی یا کاهشی باشد. در این پاسخ نوع ناوردا غیر نزولی است زیرا اعداد در یک ستون از عدد دوم به بعد یا افزایش می‌یابند یا ثابت می‌مانند. توجه کنید ممکن است در سؤالاتی که ناوردا کاهشی یا افزایشی دارند تغییرات یک متغیر ناوردا باشد و نه مقدار آن. این موضوع را در پاسخ صحیح همین سوال مورد توجه قرار دهید.

پاسخ صحیح .

با ناوردایی مساله را حل می کنیم. مقدار ناوردا در این مساله، تعداد جملات متمایز و متفاوت است. اولین دنباله‌ی جدید ایجاد شده را در نظر بگیرید. در این دنباله به تعداد عددهایی که در دنباله‌ی قبلی  $i$  بار آمده بودند، جمله با مقدار  $i$  داریم. یعنی اگر در دنباله‌ی قبلی  $x$  عدد داشتیم، که هر یک  $i$  بار تکرار شده باشند، در دنباله‌ی جدید،  $x \times i$  جمله با مقدار  $i$  خواهیم داشت. بدین ترتیب در هر گام تعداد جملات متمایز موجود در دنباله (ناوردا) همواره کاهش می یابد یا ثابت می ماند چرا که  $x \geq 1$  است. اگر زمانی باشد که این تعداد ثابت بماند، دنباله در مرحله‌ی بعد و دومرحله بعد آن یکسان خواهند بود و مساله حل است. در غیر این صورت یک تابع ناوردای کاهشی داریم. از طرفی کران گام نیز داریم. چون تعداد عدد صحیح می باشد، این کران یک خواهد بود. هم چنین چون مقدار ناوردای کاهشی داریم و همواره در طی گامها مقدار ناوردای انتخابی کم می شود و کران پایین هم داریم (تعداد جملات در کمترین حالت ممکن می توانند صفر باشند)، بالاخره به نقطه‌ای خواهیم رسید که تعداد جملات متمایز یک خواهد بود و تمام جملات دنباله یکسان می شوند و از آن پس دیگر دنباله‌ی متمایز نخواهیم داشت.

### سؤال ۳.۳.

ثابت کنید ۱۰۰۰۰۰ عدد طبیعی متوالی می توان یافت که در بین آن ها دقیقا ۵ عدد اول وجود دارد.

پاسخ .

اعداد ۱ تا ۱۰۰۰۰۰ را در نظر بگیرید، بین این اعداد بیشتر از ۵ عدد اول وجود دارد. **XXIX.**

حال دنباله اعداد

$$99999 + 100000!, \dots, 2, 100000! + 1, 100000!, 100000!$$

را در نظر بگیرید، این دنباله حداکثر ۱ عدد اول دارد **XXIX.** بنابراین قطعا بین این دنباله و دنباله اعداد ۱ تا ۱۰۰۰۰۰ دنباله‌ای وجود دارد که دقیقا ۵ عدد اول دارد.

نکات:

**E.XXVIII :** لازم است که گام ناوردا ذکر و اثبات شود.

**E.XXIX :** اثبات حکم های اشاره شده ضروری است .

**E.XXX :** لازم است به استفاده از پیوستگی گسسته در این اثبات اشاره شود.

پاسخ صحیح .

اعداد ۱ تا ۱۰۰۰۰۰ را در نظر بگیرید، بین این اعداد حداقل ۶ عدد اول وجود دارد. (۲،۳،۵،۷،۱۱،۱۳).

حال دنباله اعداد

$$99999 + 100000!, \dots, 2, 100000! + 1, 100000!, 100000!$$

را در نظر بگیرید، این دنباله حداکثر ۱ عدد اول دارد. چون به ازای تمام  $i$  های بین ۲ و ۹۹۹۹۹ داریم:

$$100000! + i = i \left( \frac{100000!}{i} + 1 \right)$$

پس این اعداد اول نیستند و تنها عددی که ممکن است اول باشد عدد  $100000! + 1$  است.

حال از دنباله اولیه شروع می کنیم و در هر گام، کوچک ترین عدد دنباله را حذف کرده و عدد بعد از بزرگ ترین عدد را به آن اضافه می کنیم. در هر گام تعداد اعداد اول دنباله حداکثر یک واحد تغییر می کند. بنابراین چون در ابتدا دنباله بیش از ۵ عدد اول و در زمان رسیدن به دنباله دوم، حداکثر ۱ عدد اول دارد، طبق پیوستگی گسسته، دنباله‌ای در این گامها وجود دارد که دقیقا ۵ عدد اول دارد.

### سؤال ۴.۳.

سه دسته سنگریزه داریم که به ترتیب شامل ۱۱، ۱۸۵ و ۱۸۹ سنگریزه هستند. در هر حرکت می توانیم دو دسته از سنگریزه ها را با هم ترکیب کرده

و یا یک دسته که تعداد زوجی سنگریزه دارد را به دو دسته با تعداد سنگریزه های یکسان تقسیم کنیم. آیا می توانیم در نهایت به ۳۸۵ دسته برسیم که هر کدام ۱ سنگریزه دارند؟

پاسخ .

مشاهده می شود که برای این که به دسته های با یک سنگریزه برسیم، باید تعداد سنگریزه دسته ها مقسوم علیه مشترک بزرگتر از ۱ نداشته باشند زیرا مقسوم علیه مشترک در اینجا یک ناوردا است. در مورد این دسته ها هم این موضوع صدق می کند، پس می توان این تقسیم را انجام داد.

نکات:

E.XXV

T.XXXI : نمی توان از برقرار بودن شرط لازم برای برقراری یک حکم، به درست بودن آن رسید. مثلاً در این جواب، مقسوم علیه مشترک بیشتر از یک نداشتن دسته ها، شرط لازم برای برقراری حکم است اما کافی نیست. بنابراین نمی توان از آن برای اثبات درست بودن حکم استفاده کرد.

پاسخ .

برای شروع، از آن جایی که تعداد سنگ ها در تمامی دسته ها فرد است، فقط اجازه داریم که دو دسته را انتخاب کرده آن ها را با هم ترکیب کنیم. بر این اساس، سه حالت پیش می آید.

۱. دسته ی ۱۸۵ و ۱۸۹ تایی را جهت ترکیب شدن انتخاب کنیم. در این صورت با اجرای مرحله ی اول دو دسته ی ۳۷۴ تایی و ۱۱ تایی خواهیم داشت.

۲. دسته ی ۱۱ و ۱۸۵ تایی را انتخاب کنیم. دو دسته ی نهایی باقی مانده ۱۹۶ تایی و ۱۸۹ تایی خواهند بود.

۳. دسته ی ۱۸۹ تایی و ۱۱ تایی را برگزینیم. در نهایت دو دسته ی ۲۰۰ تایی و ۱۸۵ تایی خواهیم داشت.

مساله را با ناوردایی حل می کنیم. عددی مانند  $C$  را در نظر می گیریم. مقدار ناوردا را در هر حالت باقی مانده ی تقسیم تعداد سنگ ریزه های موجود در هر دسته بر  $C$  را در نظر می گیریم. اثبات می کنیم اگر عددی وجود داشته باشد که باقی مانده ی تعداد دسته های اولیه بر آن برابر صفر باشد، این باقی مانده در تمامی مراحل همچنان صفر خواهد ماند. فرض کنید  $C$  یک عدد اول باشد ادعا می کنیم که اگر عدد اولی با چنین شرایطی یافت شود، با هر مرحله تقسیم و ترکیب دسته ها باز هم می تواند تعداد سنگ ریزه های موجود در هر دسته بشمارد. (این بدان معنی است که تعداد سنگ ریزه های موجود در هر دسته بر عدد اول پیدا شده بخش پذیر باشد.) حال به اثبات ادعای خود می پردازیم:

طبق نظریه ی اعداد، دو حالت زیر را به ازای عدد اول  $P$  داریم  $P > 2$  برقرار است.

۱. در صورتیکه  $P$  بتواند هر دو دسته  $a$  و  $b$  را بشمارد، ترکیب آن دو را نیز می تواند بشمارد.

$$if P|a \& P|b \rightarrow P|a+b \quad (1)$$

۲. در صورتیکه  $P$  بتواند دسته ای با تعداد عضو زوج مثل  $2c$  را بشمارد، نصف آن را نیز می تواند بشمارد.

$$if P|2c \rightarrow P|c \quad (2)$$

مجددا تاکید شود که رابطه ی ۵ و ۶ به ازای عدد اول بزرگتر از ۲ برقرار است. بنابراین باقی مانده ی تعداد سنگ ریزه های هر دسته بر عددی مانند  $C$  با شرایط فوق، همواره صفر خواهد ماند و ثابت است. حال با توجه به این اثبات کافیت برای هر یکی از سه حالت بالا، عدد اولی بیابیم که هر دو دسته را بتواند بشمارد. در صورتی که چنین چیزی ممکن باشد، تعداد سنگ ریزه های موجود در هر دسته در هر یکی از حالات کران پایین خواهد داشت و به ازای هر گام، تعداد سنگ ریزه های همواره بزرگتر مساوی آن کران خواهد بود؛ که این کران همان عدد اول پیدا شده است.

برای حالت اول، عدد ۱۱، در حالت دوم، عدد ۷ و در حالت سوم، عدد ۵، سه عدد اول بزرگتر از ۲ هستند که می‌توانند تعداد سنگ‌ریزه‌های موجود در هر دو دسته را بشمارند. بدین ترتیب تعداد سنگ‌ریزه‌های موجود در هر دسته‌ی ایجاد شده هیچ‌گاه از عدد اول شمارنده‌ی آن کمتر نخواهد شد. پس هیچ‌گاه نمی‌توانیم ۱۸۱ دسته سنگ‌ریزه داشته باشیم که هریک فقط یک سنگ‌ریزه داشته باشد.

نکات:

**T.XXXII** : بالاتر ذکر شده بود که می‌خواهیم حکم را برای هر عدد دلخواه  $C$  ثابت کنیم، اما جلوتر  $C$  اول فرض شده و در نهایت هم برای  $C > 2$  اثبات شده است. تغییر فرض اثبات در مراحل بعد صحیح نیست و باید از ابتدا درست ذکر شود، چون در این حالت حکم متفاوتی با آنچه در ابتدا بیان کردیم، اثبات شده است.

پاسخ صحیح .

برای شروع، از آنجایی که تعداد سنگ‌ها در تمامی دسته‌ها فرد است، فقط اجازه داریم که دو دسته را انتخاب کرده آن‌ها را با هم ترکیب کنیم. بر این اساس، سه حالت پیش می‌آید.

۱. دسته‌ی ۱۸۵ و ۱۸۹ تایی را جهت ترکیب شدن انتخاب کنیم. در این صورت با اجرای مرحله‌ی اول دو دسته‌ی ۳۷۴ تایی و ۱۱ تایی خواهیم داشت.

۲. دسته‌ی ۱۱ و ۱۸۵ تایی را انتخاب کنیم. دو دسته‌ی نهایی باقی‌مانده ۱۹۶ تایی و ۱۸۹ تایی خواهند بود.

۳. دسته‌ی ۱۸۹ تایی و ۱۱ تایی را برگزینیم. در نهایت دو دسته‌ی ۲۰۰ تایی و ۱۸۵ تایی خواهیم داشت.

مساله را با ناوردایی حل می‌کنیم. اثبات می‌کنیم اگر عدد اول و فردی وجود داشته باشد که باقی‌مانده‌ی تقسیم تعداد سنگ‌ریزه‌ها در دسته‌های اولیه بر آن برابر صفر باشد، این باقی‌مانده در تمامی مراحل همچنان صفر خواهد ماند.

اثبات:

این عدد را  $p$  می‌نامیم، دو حالت زیر را به ازای عدد اول فرد  $P$  برقرار است.

۱. در صورتیکه  $P$  بتواند هر دو دسته‌ی  $a$  و  $b$  را بشمارد، ترکیب آن دو را نیز می‌تواند بشمارد.

$$if P|a \& P|b \rightarrow P|a+b \quad (3)$$

۲. در صورتیکه  $P$  بتواند دسته‌ای با تعداد عضو زوج مثل  $2c$  را بشمارد، نصف آن را نیز می‌تواند بشمارد.

$$if P|2c \rightarrow P|c \quad (4)$$

مجددا تاکید شود که رابطه‌ی ۵ و ۶ به ازای عدد اول بزرگتر از ۲ برقرار است.

بنابراین باقی‌مانده‌ی تعداد سنگ‌ریزه‌های هر دسته بر عددی مانند  $p$  با شرایط فوق، همواره صفر خواهد ماند و ثابت است. حال با توجه به این اثبات کافیت برای هر یکی از سه حالت بالا، عدد اولی بیابیم که هر دو دسته را بتواند بشمارد. در صورتی که چنین چیزی ممکن باشد، تعداد سنگ‌ریزه‌های موجود در هر دسته در هریکی از حالات کران پایین خواهد داشت و به ازای هر گام، تعداد سنگ‌ریزه‌های همواره بزرگتر مساوی آن کران خواهد بود؛ که این کران همان عدد اول پیدا شده است.

برای حالت اول، عدد ۱۱، در حالت دوم، عدد ۷ و در حالت سوم، عدد ۵، سه عدد اول بزرگتر از ۲ هستند که می‌توانند تعداد سنگ‌ریزه‌های موجود در هر دو دسته را بشمارند. بدین ترتیب تعداد سنگ‌ریزه‌های موجود در هر دسته‌ی ایجاد شده هیچ‌گاه از عدد اول شمارنده‌ی آن کمتر نخواهد شد. پس هیچ‌گاه نمی‌توانیم ۱۸۱ دسته سنگ‌ریزه داشته باشیم که هریک فقط یک سنگ‌ریزه داشته باشد.