

## آزمون‌های نرمال چندمتغیره برای داده‌های چندمتغیره

محمود خراتی کوپایی<sup>۱</sup>، فاطمه سهرابی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۳۰

### چکیده:

توزیع نرمال در عمل، کاربردهای فراوانی دارد. مسئله آزمون این که آیا نمونه‌ای از مشاهدات از توزیع نرمال تبعیت می‌کند، توسط بسیاری از آماردانان مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی این مقاله ارائه روش آزمونی ساده برای آزمون کردن توزیع نرمال چند متغیره است.

**واژه‌های کلیدی:** توزیع نرمال استاندارد، آزمون شاپیرو-ویلک، توان، شبیه‌سازی مونته کارلو.

### ۱ مقدمه

کدام از این آزمون‌ها در مقایسه با آزمون‌های MSK [۱] (که ترکیبی از اندازه‌های کشیدگی و چولگی است)،  $HZ$  [۴] (که از توان دوم تفاوت بین تابع مشخصه تجربی  $Y_i = S^{-1/2}(X_i - \bar{X})$  و تابع مشخصه نرمال چندبعدي، انتگرال وزنی می‌گیرد) و  $FA$  [۳]، داده‌های چندبعدي مانند  $X_i$  را به داده‌های یک‌بعدي  $\theta^t X_i$  تبدیل می‌کند و سپس آماره شاپیرو-ویلک برای این داده‌های یک بعدي به کار می‌رود)، پرتوان‌تر هستند.

این مقاله به‌شکل زیر مرتب شده است: در بخش ۲ به‌طور خلاصه تعدادی آزمون شناخته‌شده برای بررسی نرمال بودن داده‌ها درحالت یک‌بعدي را معرفی می‌کنیم. در بخش ۳ دو آزمون برای بررسی نرمال بودن داده‌ها درحالت چندبعدي معرفی خواهیم کرد. در بخش ۴ با استفاده از شبیه‌سازی مونته کارلو به مقایسه توان این دو آزمون می‌پردازیم.

توزیع نرمال در سال ۱۷۳۳ میلادی توسط آبراهام دموآر، ریاضی‌دان فرانسوی، معرفی شد و سپس در سال ۱۸۱۲ میلادی توسط لاپلاس توسعه یافت. دلیل اهمیت توزیع نرمال، نقش این توزیع در قضیه حدی مرکزی است. تعمیم توزیع نرمال به چندین بعد، نقش اساسی در تحلیل چندمتغیری ایفا می‌کند. یک مزیت توزیع نرمال چندمتغیری از این حقیقت ناشی می‌شود که از نظر ریاضی انعطاف‌پذیری دارد و نتایج خوبی را می‌توان از آن به دست آورد. از توزیع نرمال به‌طور گسترده‌ای در بسیاری از برنامه‌های کاربردی استفاده می‌شود. مسئله آزمون این که آیا نمونه‌ای از مشاهدات از یک توزیع نرمال می‌آید، به‌طور گسترده توسط بسیاری از آماردانان مورد مطالعه قرار گرفته است. [۷] بیش از ۳۰ روش رسمی را بررسی کرده که به‌طور خاص برای آزمون نرمال بودن ارائه شده‌اند.

به‌طور کلی، آزمون‌های چندمتغیره تعمیمی از آزمون‌های یک‌متغیره از جمله، آزمون شاپیرو-ویلک و آزمون کشیدگی هستند. در این مقاله، توان دو روش جدید برای نرمال چندمتغیره را با هم مقایسه می‌کنیم. یکی از این آزمون‌ها توسط [۹] معرفی شده است که از ترکیب نسخه چندمتغیره شاپیرو-ویلک و اندازه کشیدگی به دست می‌آید. آزمون دیگر، توسط [۸] معرفی شده است که در این آزمون، پس از استانداردسازی تجربی مشاهدات از آماره‌ی شاپیرو-ویلک استفاده می‌شود. با توجه به [۸ و ۹]، هر

## ۲ آزمون‌های نرمال برای داده‌های یک‌بعدي

### ۱.۲ آزمون شاپیرو-ویلک

آزمون شاپیرو-ویلک (SW) [۶]، در اصل برای آزمون نرمال یک بعدي طراحی شده است. با توجه به داده‌های یک بعدي

<sup>۱</sup> عضو هیئت علمی گروه آمار، دانشگاه شیراز، ایران

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آمار، دانشگاه شیراز، ایران

یک بعدی و روی مشاهدات تجربی استاندارد شده است که مقادیر بحرانی را می‌توان به وسیله تبدیل‌هایی از توزیع نرمال استاندارد یک بعدی تقریب زد.

برای آزمون کردن فرض صفر نرمال بودن، آماره آزمون زیر را معرفی کردند [۸].

$$W^* = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^n W_{Y_i} \quad (۴)$$

که در آن  $W_{Y_i}$  آماره شاپیرو-ویلک محاسبه شده در  $i$ امین مؤلفه از مشاهدات تبدیل یافته  $Y_{i1}, \dots, Y_{in}$  در رابطه (۳) است. آزمون  $W^*$  در سطح  $\alpha$  فرض نرمال بودن را رد می‌کند اگر  $W^* < c_{\alpha:n,p}$  باشد.

### ۲.۳ آماره آزمون $T_n$

می‌دانیم که بردار تصادفی  $Y$  دارای توزیع نرمال  $p$ -بعدی است، اگر هر ترکیب خطی  $\Theta^t Y$  توزیع نرمال یک بعدی داشته باشد. بنا بر این اگر برای یک ترکیب خاص، توزیع نرمال نباشد، می‌توان نتیجه گرفت که  $Y$  دارای توزیع نرمال چند بعدی نیست. پس برای تشخیص غیرنرمال بودن تصویرهای یک بعدی، از آزمون SW استفاده می‌کنیم. به‌طور خاص، برای داده‌های چند بعدی  $X_1, \dots, X_n$ ، با استفاده از استانداردسازی مورد بحث در رابطه (۳)،  $\{Y_i\}_{1 \leq i \leq n}$  را به دست می‌آوریم. آماره  $G_n$  را بر اساس تصویر  $Y_i$  در جهت  $\Theta$  در نظر می‌گیریم.

$$G_n(\Theta) = W_n(\Theta^t Y_1, \dots, \Theta^t Y_n) \quad (۵)$$

[۹]، آماره آزمون برای بررسی فرض نرمال بودن داده‌ها را به شکل زیر معرفی کرده‌اند.

$$T_n = 1 - (n+p)^{-1} \sum_{\Theta \in \Theta_1 \cup \Theta_2} G_n(\Theta) I_A, \quad (۶)$$

که در آن  $G_n(\Theta)$  در رابطه (۵) معرفی شده است.  $\Theta \in \Theta_1 \cup \Theta_2$  است که  $\Theta_1 = \{\|Y_j\|^{-1} Y_j\}_{1 \leq j \leq n}$  و  $\Theta_2 = \{e_j\}_{1 \leq j \leq p}$  است و بردار  $e_j$  معرفی شده در فضای  $\Theta$ ، به شکل بردار  $e_j = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^t$  تعریف می‌شود، یعنی بردار واحدی که  $i$ امین مولفه آن ۱ و بقیه ۰ است. همچنین مولفه  $A$  در تابع نشانگر  $I_A$  به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$A = \{c_1 \leq MK \leq c_2\} \quad (۷)$$

$Z_1, \dots, Z_n$ ، آماره  $sw$  به صورت زیر به دست می‌آید،

$$W_X = \frac{[\sum_{i=1}^n a_i Z(i)]^2}{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}, \quad (۱)$$

که در آن  $Z(1), \dots, Z(n)$  آماره‌های ترتیبی  $Z_1, \dots, Z_n$ ، میانگین نمونه و ثابت  $a$  برابر است با

$$a = \frac{V^{-1}m}{\sqrt{m^t V^{-1} V^{-1} m}}. a^{t'} a = 1,$$

که در آن  $m = (m_1, \dots, m_n)^t$  و  $V$  به ترتیب میانگین و کوواریانس آماره‌های ترتیبی، از یک نمونه تصادفی نرمال استاندارد با اندازه  $n$  هستند. آماره آزمون SW را می‌توان به صورت نسبت دو برآوردگر واریانس، یعنی بهترین برآوردگر ناریب خطی (BLUE) و برآوردگر ماکسیمم درست‌نمایی (MLE) نوشت. این آزمون در سطح مشخص  $\alpha$ ، فرضیه نرمال بودن را برای  $W_X < c_\alpha$  رد می‌کند، که  $c_\alpha$  چندک  $\alpha$  ۱۰۰ ام از توزیع  $W_X$  تحت فرض صفر است.

### ۲.۴ آزمون کشیدگی

کشیدگی برای تشخیص غیر نرمال بودن در حالت یک بعدی پیشنهاد شده است. برای داده‌های عمومی چند بعدی، [۵] آماره‌ای برای اندازه‌گیری کشیدگی ارائه داده است. آماره کشیدگی MK برابر است با

$$MK = \sqrt{\frac{n}{\lambda(p+2)p}} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|Y_i\|^2 - \frac{p(p+2)(n-1)}{n+1} \right\}, \quad (۲)$$

که در آن برای  $i = 1, \dots, n$

$$Y_i = S^{-1/2}(X_i - \bar{X}) \quad (۳)$$

است. این آزمون، فرض صفر نرمال بودن را اگر  $|MK|$  بیش از حد بزرگ باشد، رد می‌کند.

## ۳ آزمون‌های نرمال بودن برای داده‌های

### چندبعدی

#### ۱.۳ آماره آزمون $W^*$

[۸] یک آزمون نیکویی برازش برای نرمال چند بعدی ارائه داده‌اند. این آزمون بر اساس آماره شاپیرو-ویلک برای نرمال

\* Best Linear Unbiased Estimator

† Maximum Likelihood Estimator

است. در این مورد،  $W^*$  همان آزمون  $W_n$  است. در حالت یک بعدی، توان آزمون  $T_n$  برای همه جایگزین‌های پیشنهاد شده، نسبت به توان آزمون  $W_n$  تفاوت چندانی ندارد. حتی در بعضی از موارد  $T_n$  توان بیشتری از  $W_n$  دارد. اگرچه میانگین توان  $T_n$  به مقدار ناچیزی از  $W_n$  کمتر است.

**جدول ۱.** مقادیر بحرانی و خطاهای نوع اول وابسته برای آزمون

| ابعاد    | خطای نوع اول |       | ناحیه بحرانی |        |
|----------|--------------|-------|--------------|--------|
|          | $T_n$        | $W^*$ | $T_n$        | $W^*$  |
| $p = 1$  | ۰/۰۵۱        | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۴۸        | ۰/۰۹۵۵ |
| $p = 2$  | ۰/۰۴۶        | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۳۵        | ۰/۰۹۶۱ |
| $p = 5$  | ۰/۰۵۱        | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۲۹        | ۰/۰۹۶۷ |
| $p = 10$ | ۰/۰۴۹        | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۴۲        | ۰/۰۹۶۹ |

در موارد چند بعدی، توزیع  $F_1 \otimes F_2$  نشان‌دهنده توزیع‌هایی با توزیع‌های حاشیه‌ای مستقل  $F_1$  و  $F_2$  است و حاصل ضرب  $k$  توزیع مستقل  $F_1$  به شکل  $F_1^k$  نشان داده می‌شود. جدول ۴ نشان‌دهنده کارایی توان در حالت دو بعدی است و در جداول ۵ و ۶ نتایج آزمون‌های نرمال بودن ۵ بعدی و ۱۰ بعدی ارائه شده است.

با توجه به نتایج، توان آزمون  $W^*$  که تعمیمی از آماره شاپیرو-ویلک است به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از توان آزمون  $T_n$  است. بنا بر این با توجه به سادگی آزمون، آزمون  $W^*$  ترجیح داده می‌شود.

**مثال ۱.۴ (۳).**، داده‌های جالبی از ارتفاع استخوان راموس (به میلی متر) مربوط به پسرهای ۸، ۸/۵ و ۹/۵ ساله ارائه کرده‌اند. در این مثال به بررسی نرمال بودن داده‌ها در حالت‌های چند بعدی می‌پردازیم. آزمون نرمال بودن دو بعدی برای ارتفاع‌های به‌دست‌آمده مربوط به سن‌های ۸ و ۹ ساله را در نظر می‌گیریم که  $p$ -مقدار یا احتمال رد فرض صفر برای  $W^*$  و  $T_n$  به ترتیب برابر است با ۰/۱۳۶ و ۰/۰۲۰ که آزمون  $T_n$ ، فرض نرمال بودن را رد می‌کند. حال اگر فرض نرمال بودن را برای این چهار رده سنی آزمون کنیم،  $p$ -مقدار مربوط به آزمون‌ها به ترتیب ۰/۰۴۵ و ۰/۰۰۴ می‌شود و هر دو آزمون، فرض نرمال بودن را رد می‌کنند.

که  $c_1$  و  $c_2$  درصد‌های خاصی از MK، تحت فرض نرمال هستند. از آن‌جا که MK به‌طور تقریبی توزیع نرمال دارد،  $c_1$  و  $c_2$  را چندک‌های ۱ درصدی و ۹۹ درصدی از MK در نظر می‌گیریم.

## ۴ شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به مقایسه توان آزمون‌های معرفی شده می‌پردازیم. به این منظور، توان آزمون‌های  $W^*$  و  $T_n$  را با هم مقایسه خواهیم کرد.

مقادیر بحرانی را با استفاده از توزیع تجربی و با روش مونت کارلو شبیه‌سازی می‌کنیم. می‌دانیم که تحت فرض  $H_0$ ، توزیع آماره‌های آزمون در نظر گرفته شده به بردار میانگین و ماتریس کوواریانس بستگی ندارد. بنا بر این می‌توانیم توزیع آنها را به‌طور مستقیم، با فرض بردار میانگین صفر و ماتریس کوواریانس همانی شبیه‌سازی کنیم.  $\tilde{F}_m(t)$  تابع توزیع تجربی برای یک نمونه مونت کارلو با اندازه  $m$  است که  $m$  تعداد تکرار در روش مونت کارلو است. در این روش مقادیر بحرانی تقریبی به‌عنوان چندک‌های  $F_m$  محاسبه می‌شوند و دقت این مقادیر در صورتی که مقدار  $m$  بزرگ باشد، بیشتر است. برای به دست آوردن این مقادیر بحرانی تقریبی،  $F_m$ ، توزیع نرمال استاندارد  $p$  متغیره و مقدار  $m = 1000$  در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی مقادیر بحرانی تجربی در سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  در جدول ۱ و همچنین جداول ۳ تا ۶ آمده است. همچنین این نتایج برای اندازه‌های مختلف نمونه در جدول ۲ آمده است.

نتایج مقایسه توان‌ها، برای توزیع‌های مختلف فرض مقابل و زمانی که  $n = 50$  باشد، محاسبه شده است. به‌علاوه میانگین توان‌ها در آخر هر جدول آورده شده است که مقادیر بزرگ‌تر نشان دهنده توان بهتر است.

در محاسبه خطاهای نوع اول تجربی از مقادیر بحرانی حاصل از ۱۰۰۰ نمونه مونت کارلو شبیه‌سازی شده، استفاده شده، که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

در جدول ۳، نتایج توان مربوط به داده‌های یک بعدی آمده

جدول ۲. مقادیر بحرانی آزمون نرمال بودن  $p$ -بعدی با سطح  $\alpha = 0.05$

| اندازه نمونه | $p = 1$ | $p = 2$ | $p = 5$ | $p = 10$ |
|--------------|---------|---------|---------|----------|
| $W^*$        |         |         |         |          |
| $n = 20$     | ۰/۹۰۳   | ۰/۹۱۸   | ۰/۹۳۲   | ۰/۹۳۹    |
| $n = 25$     | ۰/۹۲۲   | ۰/۹۳۱   | ۰/۹۴۳   | ۰/۹۴۸    |
| $n = 30$     | ۰/۹۳۳   | ۰/۹۳۸   | ۰/۹۴۹   | ۰/۹۵۴    |
| $n = 35$     | ۰/۹۳۸   | ۰/۹۴۶   | ۰/۹۵۵   | ۰/۹۵۹    |
| $n = 40$     | ۰/۹۴۶   | ۰/۹۵۱   | ۰/۹۶۰   | ۰/۹۶۴    |
| $n = 45$     | ۰/۹۵۰   | ۰/۹۵۸   | ۰/۹۶۴   | ۰/۹۶۷    |
| $n = 50$     | ۰/۹۵۵   | ۰/۹۶۱   | ۰/۹۶۷   | ۰/۹۶۹    |
| $T_n$        |         |         |         |          |
| $n = 20$     | ۰/۰۹۶۸  | ۰/۰۷۰۹  | ۰/۰۶۷۱  | ۰/۰۱۲۲۳  |
| $n = 25$     | ۰/۰۸۵۷  | ۰/۰۵۹۱  | ۰/۰۵۴۵  | ۰/۰۹۲۴   |
| $n = 30$     | ۰/۰۶۷۷  | ۰/۰۵۱۷  | ۰/۰۴۶۴  | ۰/۰۷۴۸   |
| $n = 35$     | ۰/۰۶۳۴  | ۰/۰۴۵۴  | ۰/۰۴۱۰  | ۰/۰۶۱۴   |
| $n = 40$     | ۰/۰۵۷۲  | ۰/۰۴۱۰  | ۰/۰۳۵۹  | ۰/۰۵۳۵   |
| $n = 45$     | ۰/۰۵۵۵  | ۰/۰۳۶۹  | ۰/۰۳۲۹  | ۰/۰۴۶۸   |
| $n = 50$     | ۰/۰۴۷۸  | ۰/۰۳۵۰  | ۰/۰۲۹۷  | ۰/۰۴۱۸   |

جدول ۳. توان تجربی آزمون‌های مربوط به نرمال بودن یک بعدی در سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  برای  $n = 50$

| فرض‌های مقابل         | $W_n$  | $T_n$  |
|-----------------------|--------|--------|
| $N(0, 1)$             | ۰/۰۵۴  | ۰/۰۵۱  |
| $Exp(1)$              | ۱      | ۱      |
| $Lognormal(0, 1)$     | ۱      | ۱      |
| $Lognormal(0, 0.5^2)$ | ۰/۴۲   | ۰/۴۲   |
| $Gamma(5, 1)$         | ۰/۵۹   | ۰/۵۸   |
| $\chi^2(1)$           | ۱      | ۱      |
| $\chi^2(2)$           | ۱      | ۱      |
| $\chi^2(5)$           | ۰/۹۰   | ۰/۸۷   |
| $\chi^2(10)$          | ۰/۵۸   | ۰/۵۸   |
| $Cauchy(0, 1)$        | ۱      | ۱      |
| $t(2)$                | ۰/۸۸   | ۰/۸۴   |
| $t(5)$                | ۰/۳۶   | ۰/۳۸   |
| $Logistic(0, 1)$      | ۰/۲۰   | ۰/۷۱   |
| $Beta(1, 1)$          | ۰/۷۶   | ۰/۸۲   |
| $Beta(1, 2)$          | ۰/۸۴   | ۰/۱۵   |
| $Beta(2, 2)$          | ۰/۱۶   | ۰/۲۱   |
| $Halfnormal$          | ۰/۹۳   | ۰/۹۲   |
| $Weibull(0.8)$        | ۱      | ۱      |
| $Weibull(1)$          | ۱      | ۱      |
| $Weibull(1/5)$        | ۰/۸۸   | ۰/۸۶   |
| Average power         | ۰/۷۶۳۲ | ۰/۷۵۴۷ |

جدول ۴. توان تجربی آزمون‌های مربوط به نرمال بودن دوبعدی در سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  برای  $n = 50$

| فرض‌های مقابل                | $W^*$  | $T_n$  |
|------------------------------|--------|--------|
| $N(0, 1)^2$                  | 0.050  | 0.046  |
| $Exp(1)^2$                   | 1      | 1      |
| $Lognormal(0, 1)^2$          | 1      | 1      |
| $Lognormal(0, 0.5^2)^2$      | 0.62   | 0.53   |
| $Gamma(0.5, 1)^2$            | 1      | 1      |
| $Gamma(5, 1)^2$              | 0.81   | 0.71   |
| $\chi^2(1)^2$                | 1      | 1      |
| $\chi^2(2)^2$                | 1      | 1      |
| $\chi^2(5)^2$                | 0.99   | 0.95   |
| $\chi^2(10)^2$               | 0.81   | 0.70   |
| $\chi^2(15)^2$               | 0.62   | 0.51   |
| $Cauchy(0, 1)^2$             | 1      | 1      |
| $t(2)^2$                     | 0.98   | 0.97   |
| $t(5)^2$                     | 0.55   | 0.49   |
| $Logistic(0, 1)^2$           | 0.27   | 0.25   |
| $Beta(1, 1)^2$               | 0.94   | 0.57   |
| $Beta(1, 2)^2$               | 0.98   | 0.84   |
| $Beta(2, 2)^2$               | 0.22   | 0.90   |
| $Halfnormal^2$               | 0.99   | 0.97   |
| $Weibull(0.8)^2$             | 1      | 1      |
| $Weibull(1)^2$               | 1      | 1      |
| $Weibull(1/5)^2$             | 0.99   | 0.94   |
| $N(0, 1) \otimes Exp(1)$     | 0.99   | 0.97   |
| $N(0, 1) \otimes \chi^2(5)$  | 0.81   | 0.68   |
| $N(0, 1) \otimes t(5)$       | 0.29   | 0.25   |
| $N(0, 1) \otimes Beta(1, 1)$ | 0.48   | 0.29   |
| $N(0, 1) \otimes Beta(1, 2)$ | 0.61   | 0.41   |
| Average power                | 0.8058 | 0.7354 |

جدول ۵. توان تجربی آزمون‌های مربوط به نرمال بودن پنج‌بعدی در سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  برای  $n = 50$

| فرض‌های مقابل                              | $W^*$  | $T_n$  |
|--------------------------------------------|--------|--------|
| $N(0, 1)^{\Delta}$                         | ۰/۰۵۳  | ۰/۰۵۱  |
| $Exp(1)^{\Delta}$                          | ۱      | ۱      |
| $Lognormal(0, 1)^{\Delta}$                 | ۰/۸۵   | ۱      |
| $Lognormal(0, 0.5^2)^{\Delta}$             | ۱      | ۰/۶۸   |
| $Gamma(0.5, 1)^{\Delta}$                   | ۱      | ۱      |
| $Gamma(5, 1)^{\Delta}$                     | ۰/۹۸   | ۰/۸۴   |
| $\chi^2(1)^{\Delta}$                       | ۱      | ۱      |
| $\chi^2(2)^{\Delta}$                       | ۱      | ۱      |
| $\chi^2(5)^{\Delta}$                       |        | ۰/۹۹   |
| $\chi^2(10)^{\Delta}$                      | ۰/۹۸   | ۰/۸۴   |
| $\chi^2(15)^{\Delta}$                      | ۰/۸۸   | ۰/۶۵   |
| $Cauchy(0, 1)^{\Delta}$                    | ۱      | ۱      |
| $t(2)^{\Delta}$                            | ۱      | ۱      |
| $t(5)^{\Delta}$                            | ۰/۷۷   | ۰/۷۳   |
| $Logistic(0, 1)^{\Delta}$                  | ۰/۴۲   | ۰/۳۸   |
| $Beta(1, 1)^{\Delta}$                      | ۱      | ۰/۲۹   |
| $Beta(1, 2)^{\Delta}$                      | ۱      | ۰/۶۲   |
| $Beta(2, 2)^{\Delta}$                      | ۰/۴۰   | ۰/۰۴   |
| $Halfnormal^{\Delta}$                      | ۱      | ۰/۹۹   |
| $Weibull(0.8)^{\Delta}$                    | ۱      | ۱      |
| $Weibull(1)^{\Delta}$                      | ۱      | ۱      |
| $Weibull(1/5)^{\Delta}$                    | ۱      | ۰/۹۸   |
| $N(0, 1) \otimes Exp(1)^{\Phi}$            | ۱      | ۱      |
| $N(0, 1) \otimes \chi^2(5)^{\Phi}$         | ۱      | ۰/۹۷   |
| $N(0, 1) \otimes t(5)^{\Phi}$              | ۰/۷۰   | ۰/۵۸   |
| $N(0, 1) \otimes Beta(1, 1)^{\Phi}$        | ۰/۹۷   | ۰/۱۴   |
| $N(0, 1) \otimes Beta(1, 2)^{\Phi}$        | ۰/۹۹   | ۰/۵۰   |
| $N(0, 1)^{\Phi} \otimes Exp(1)^{\Psi}$     | ۱      | ۰/۹۸   |
| $N(0, 1)^{\Phi} \otimes \chi^2(5)^{\Psi}$  | ۰/۹۴   | ۰/۷۰   |
| $N(0, 1)^{\Phi} \otimes t(5)^{\Psi}$       | ۰/۴۳   | ۰/۳۴   |
| $N(0, 1)^{\Phi} \otimes Beta(1, 1)^{\Psi}$ | ۰/۵۳   | ۰/۶۰   |
| $N(0, 1)^{\Phi} \otimes Beta(1, 2)^{\Psi}$ | ۰/۶۸   | ۰/۲۲   |
| Average power                              | ۰/۸۸۷۷ | ۰/۷۲۶۵ |

جدول ۶. توان تجربی آزمون‌های مربوط به نرمال بودن دهبعدی در سطح معناداری  $\alpha = 0.05$  برای  $n = 50$

| فرض‌های مقابل                    | $W^*$  | $T_n$  |
|----------------------------------|--------|--------|
| $N(0, 1)^{10}$                   | 0.49   | 0.49   |
| $Exp(1)^{10}$                    | 1      | 1      |
| $Lognormal(0, 1)^{10}$           | 1      | 1      |
| $Lognormal(0, 0.5^2)^{10}$       | 0.96   | 0.71   |
| $Gamma(0.5, 1)^{10}$             | 1      | 1      |
| $Gamma(5, 1)^{10}$               | 1      | 0.90   |
| $\chi^2(2)^{10}$                 | 1      | 1      |
| $\chi^2(5)^{10}$                 | 1      | 1      |
| $\chi^2(10)^{10}$                | 1      | 0.89   |
| $\chi^2(15)^{10}$                | 0.97   | 0.67   |
| $Cauchy(0, 1)^{10}$              | 1      | 1      |
| $t(2)^{10}$                      | 1      | 1      |
| $t(5)^{10}$                      | 0.90   | 0.84   |
| $Logistic(0, 1)^{10}$            | 0.55   | 0.43   |
| $Beta(1, 1)^{10}$                | 1      | 0.52   |
| $Beta(1, 2)^{10}$                | 1      | 0.63   |
| $Beta(2, 2)^{10}$                | 0.49   | 0.14   |
| $Halfnormal^{10}$                | 1      | 0.99   |
| $Weibull(0.8)^{10}$              | 1      | 1      |
| $Weibull(1)^{10}$                | 1      | 1      |
| $Weibull(1.5)^{10}$              | 1      | 0.99   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Exp(1)$       | 0.78   | 0.40   |
| $N(0, 1)^5 \otimes \chi^2(1)$    | 0.45   | 0.18   |
| $N(0, 1)^5 \otimes t(1)$         | 0.19   | 0.10   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(1, 1)$   | 0.12   | 0.03   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(1, 2)$   | 0.12   | 0.07   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(2, 2)$   | 0.05   | 0.05   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Exp(1)^5$     | 1      | 1      |
| $N(0, 1)^5 \otimes \chi^2(5)^5$  | 1      | 0.90   |
| $N(0, 1)^5 \otimes t(5)^5$       | 0.63   | 0.49   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(1, 1)^5$ | 0.70   | 0.08   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(1, 2)^5$ | 0.79   | 0.20   |
| $N(0, 1)^5 \otimes Beta(2, 2)^5$ | 0.12   | 0.05   |
| $N(0, 1)^2 \otimes Exp(1)^8$     | 1      | 1      |
| $N(0, 1)^2 \otimes \chi^2(5)^8$  | 1      | 0.99   |
| $N(0, 1)^2 \otimes t(5)^8$       | 0.84   | 0.72   |
| $N(0, 1)^2 \otimes Beta(1, 1)^8$ | 0.99   | 0.37   |
| $N(0, 1)^2 \otimes Beta(1, 2)^8$ | 1      | 0.40   |
| $N(0, 1)^2 \otimes Beta(2, 2)^8$ | 0.31   | 0.08   |
| Averagepower                     | 0.7884 | 0.6268 |

## مراجع

- [1] Bowman, K. O. and Shenton, L. R. (1975). Omnibus test contours for departures from normality based on  $\sqrt{b_1}$  and  $b_2$ . *Biometrika*, **62**(2), 243-250.
- [2] Elston, R. C. and Grizzle, J. E. (1962). Estimation of time-response curves and their confidence bands. *Biometrics*, **18**(2), 148-159.
- [3] Fattorini, L. (1986). Remarks on the use of Shapiro-Wilk statistic for testing multivariate normality. *Statistica*, **46**(2), 209-217.
- [4] Henze, N., Zirkler, B. (1990). A class of invariant consistent tests for multivariate normality. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, **19**(10), 3595-3617.
- [5] Mardia, K. V. (1970). Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*, **57**(3), 519-530.
- [6] Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, **52**(3/4), 591-611.
- [7] Thode, H. C. (2002). *Testing for normality*, (Vol. 164). CRC press.
- [8] Villasenor Alva, J. A., Estrada, E. G. (2009). A generalization of Shapiro-Wilk's test for multivariate normality. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, **38**(11), 1870-1883. 1883.
- [9] Zhou, M., Shao, Y. (2014). A powerful test for multivariate normality. *Journal of applied statistics*, **41**(2), 351-363.